

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ

“___” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Проектування системи електропостачання підприємства гірничодобувної промисловості»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

Іван БОНДАРЕНКО

«___» _____ 2026 р.

Керівник роботи

професор, доктор. техн. наук

Сергій ОСАДЧИЙ

«___» _____ 2026 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

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

Бондаренка Івана Ігоровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства гірничодобувної промисловості

Design of a power supply system for a mining enterprise

2. Керівник роботи Осадчий Сергій Іванович, доктор техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 01.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є проектування системи електропостачання підприємства гірничодобувної промисловості. Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання: 1. Провести розрахунок електричних навантажень. 2. Провести розрахунок картограми електричних навантажень. 3. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання. 4. Провести розрахунок режимів реактивної потужності системи електропостачання. 5. Здійснити вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства. 6. Провести розрахунок струмів коротких замкнень та здійснити вибір високовольтного обладнання. 7. Провести розрахунок спеціального розділу роботи.

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
<i>1</i>	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>13.04-20.04</i>	
<i>2</i>	<i>Картограма електричних навантажень</i>	<i>21.04-25.04</i>	
<i>3</i>	<i>Техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання</i>	<i>26.03-01.05</i>	
<i>4</i>	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>	<i>02.05-08.05</i>	
<i>5</i>	<i>Вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства</i>	<i>09.05-11.05</i>	
<i>6</i>	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i>	<i>12.05-18.05</i>	
<i>7</i>	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>19.05-25.05</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>26.05-28.05</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>29.05-31.05</i>	

Дата видачі завдання
«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Сергій ОСАДЧИЙ

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Іван БОНДАРЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 66 с.; 16 рис.; 23 табл.; 5 джерел

Бондаренко І. О. Проектування системи електропостачання підприємства гірничодобувної промисловості. – Рукопис.

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

Робота присвячена створенню надійної системи електричного живлення підприємства гірничодобувної промисловості. Проведено детальне вивчення вимог промислового комплексу щодо обсягів електроенергії з урахуванням специфіки функціонування окремих виробничих ділянок. Окрім того, проаналізовано зміну електричних навантажень протягом робочих змін та загалом за добу.

Було виконано розрахунок параметрів струмів аварійного замикання для всіх сегментів розподільної мережі. Також у цій роботі наведено рекомендації стосовно інтеграції новітніх комплексів релейної автоматики та засобів точного контролю за використаним ресурсом. На основі отриманих результатів обчислень було здійснено обґрунтований підбір необхідного обладнання.

Ключові слова: розрахункові навантаження, система електропостачання, компенсація реактивної потужності, релейний захист

ABSTRACT

Qualification work: 66 p.; 16 Fig.; 23 tables; 5 sources

Bondarenko I. Design of a power supply system for a mining enterprise. – Manuscript.

Bachelor's 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 work is devoted to the creation of a reliable power supply system for a mining enterprise. A detailed study of the requirements of the industrial complex for the volume of electricity was carried out, taking into account the specifics of the functioning of individual production areas. In addition, the change in electrical loads during work shifts and in general per day was analyzed.

The calculation of emergency short-circuit current parameters for all segments of the distribution network was performed. Also, this work provides recommendations for the integration of the latest relay automation complexes and means of precise control over the used resource. Based on the obtained calculation results, a reasonable selection of the necessary equipment was made.

Keywords: design loads, power supply system, reactive power compensation, relay protection

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	10
1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ...	10
1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень.....	12
1.3 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою вище 1кВ	12
1.4 Графіки електричних навантажень підприємства	15
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	19
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	21
3.1 Вибір схеми зовнішнього електропостачання підприємства	21
3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання підприємства.....	23
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	25
4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності	25
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв	26
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	28
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	30
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	30
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ	38
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....	39
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб.....	40

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бондаренко І.І.				Проектування системи електропостачання підприємства гірничодобувної промисловості Design of a power supply system for a mining enterprise	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.	Осадчий С.І.						6	66
						ЦНТУ зр. ЕЕ-23мб		
Н. контр.								
Затвер.	Плешков П.Г.							

ВСТУП

Робота присвячена комплексному розв'язанню проблеми створення ефективної схеми енергозабезпечення для промислового об'єкта, який функціонує у сфері видобутку корисних копалин.

Головна ціль проєкту полягає у розробці надійної, безпечної та економічно вигідної мережі електроживлення вказаного гірничого комбінату.

Щоб успішно реалізувати поставлену мету, передбачено поетапне виконання такого переліку інженерних та аналітичних завдань:

- визначення обсягів споживання електроенергії окремими групами приймачів та підприємством загалом.

- побудова картограми навантажень, що дозволить визначити центр електричних навантажень та оптимальне місце для розташування головної знижувальної підстанції.

- виконання техніко-економічного аналізу задля порівняння та затвердження найкращого варіанту конфігурації розподільчих мереж.

- дослідження режимів компенсації реактивної енергії в межах об'єкта з метою підвищення загальної енергоефективності.

- обґрунтування оптимальної кількості та вибір номінальної пропускної здатності силових трансформаторних установок.

- обчислення струмів короткого замикання (КЗ), що є критично важливим етапом для правильного підбору апаратів захисту та комутаційного високовольтного устаткування.

- глибоке опрацювання питання релейного захисту двигуна в межах спеціального розділу дослідження.

Під час виконання проєктувальних робіт першочергово враховуються номінальні характеристики споживачів, специфіка їхнього територіального базування, а також доступні джерела та конфігурації підключення до зовнішньої енергосистеми. Оскільки підприємство належить до гірничо-видобувного сектору, додатковий акцент робиться на безперебійності живлення споживачів першої

						Арк.
						8

категорії (наприклад, систем водовідливу та вентиляції) та використанні обладнання, адаптованого до важких умов експлуатації (підвищена запиленість, вологість, вібрації). Саме ці базові фактори та галузеві вимоги слугують фундаментом для прийняття подальших рішень і безпосередньо спрямовують хід виконання проєкту.

						Арк.
						9

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ

Для наочної демонстрації далі представлено процедуру обчислення електроспоживання ремонтно-механічної дільниці.

$$P_{зм} = P_{сум} \cdot K_B = 293,5 \cdot 0,41 = 120,33 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 120,33 \cdot 1,27 = 152,82 \text{ квар}$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot P_{сум}}{P_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot 293,5}{80,96} = 7,25 \approx 7$$

$$P_p = P_{зм} \cdot K_M = 120,33 \cdot 1,58 = 190,1 \text{ кВт}$$

$$Q_p = 1,1 \cdot Q_{зм} = 1,1 \cdot 152,82 = 168,1 \text{ квар}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{190,1^2 + 168,1^2} = 253,8 \text{ кВА}$$

Зведені дані обчислень енергоспоживання силового устаткування заводу продемонстровано у таблиці 1.1.

						Арк.
						10

Таблиця 1.1. Підсумкові показники визначення електронавантажень мереж до 1 кВ по підприємству

№	Назва групи споживачів	К-сть ЕС	Р одн. min, кВт	Р одн. max, кВт	Рсум, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Рзм, кВт	Qзм, квар	пeф	Км	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
1	Управлінський корпус	20	0,1	2,02	41,5	20	0,7	0,8	0,75	29	21,8	20	1,1	32,8	21,8	39,4
2	Ремонтно-механічна дільниця															
	Зварювальні апарати	2	15	15,2	30,36	-	0,3	0,35	2,68	9,1	24,4	-	-	-	-	-
	Зварювальні машини	3	10	81	172	-	0,4	0,6	1,33	60,2	80,1	-	-	-	-	-
	Машини дугового зварювання	2	10	10,1	20,24	-	0,4	0,5	1,73	7,1	12,3	-	-	-	-	-
	Преси	3	10	20,2	50,6	-	0,5	0,7	1,02	25,3	25,8	-	-	-	-	-
	Вентилятор	2	20	20,2	20,24	-	0,7	0,8	0,75	13,2	9,9	-	-	-	-	-
	Разом	12	10	81	293,5	8	0,4	0,6	1,27	120,3	152,8	7	1,6	190,1	168,1	253,8
3	Дробарно-сортувальний комплекс															
	Дробарки конусні середньої фракції	2	162	162	323,8	-	0,7	0,75	0,88	226,7	199,5	-	-	-	-	-
	Дробарки конусні дрібної фракції	2	101	101	202,4	-	0,7	0,85	0,62	141,7	87,9	-	-	-	-	-
	Конвеєр	2	1	20,2	40,5	-	0,6	0,63	1,23	24,3	29,9	-	-	-	-	-
	Транспортери стрічкові (< 170 кВт)	2	101	101	202,4	-	0,6	0,79	0,78	121,4	94,7	-	-	-	-	-
	Транспортери стрічкові (> 170 кВт)	2	202	202	404,8	-	0,6	0,79	0,78	242,9	189,5	-	-	-	-	-
	Екскаватори одноковшові	4	51	50,6	202,4	-	0,7	0,5	1,73	131,6	227,7	-	-	-	-	-
	Вентилятори до дробарок	6	51	152	607,2	-	0,6	0,79	0,78	364,3	284,2	-	-	-	-	-
	Скрепери	4	10	30,4	81	-	0,6	0,79	0,78	48,6	37,9	-	-	-	-	-
	Компресори	2	162	162	323,8	-	0,7	0,8	0,75	226,7	170	-	-	-	-	-
	Піскові насоси	3	10	50,6	121,4	-	0,8	0,8	0,75	97,2	72,9	-	-	-	-	-
	Вентилятори сантехнічні	4	10	30,4	20,2	-	0,7	0,75	0,88	13,2	11,6	-	-	-	-	-
	Вентилятори виробничі	3	30	202	161,9	-	0,7	0,78	0,8	113,3	90,6	-	-	-	-	-
	Разом	36	1	202	2692	200	0,6	0,8	0,78	1751,8	1494,1	27	1,2	2028	1494	2519
4	Відділення каменерізки та обробки															
	Електросвердла колонкові	12	15	22,3	144,7	-	0,4	0,7	1,02	57,9	59,1	-	-	-	-	-
	Станки УОБ	8	11	40,5	228,7	-	0,5	0,65	1,17	102,9	120,4	-	-	-	-	-
	Станки обертового бурення	6	11	26,3	119,4	-	0,5	0,7	1,02	53,7	54,8	-	-	-	-	-
	Дробарки мілкого подріблення	4	101	101	404,8	-	0,7	0,8	0,75	263,1	197,3	-	-	-	-	-
	Живителі лоткові	11	5,1	12,1	102,2	-	0,5	0,72	0,96	51,1	49,1	-	-	-	-	-
	Грохоти	3	10	10,1	20,2	-	0,5	0,75	0,88	10,1	8,9	-	-	-	-	-
	Вентилятори част. провітрення	6	51	202	455,4	-	0,7	0,8	0,75	296	222	-	-	-	-	-
	Насоси	8	2	16,2	40,5	-	0,2	0,65	1,17	8,1	9,5	-	-	-	-	-
	Кран-балки	3	2	18,2	36,4	-	0,2	0,5	1,73	5,5	9,5	-	-	-	-	-
	Разом	61	1	202	1552	200	0,5	0,8	0,86	848,5	730,7	15	1,3	1068	730,7	1293,6
5	Складське господарство	4	0,5	10,1	15,2	20	0,5	0,8	0,75	7,6	5,7	3	1,9	14,1	6,3	15,4
	Всього на шинях 0,4 кВ	133	0,1	202	4595	###	0,6	0,8	0,87	2757,2	2404,6	45	1,1	3083	2405	3909,5

1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень

Далі продемонстровано зразок обчислення параметрів електроосвітлення для управлінського корпусу.

$$P_{\text{БСТ}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 3279 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 32,79 \text{ кВт}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot P_{\text{БСТ}} = 0,8 \cdot 32,79 = 26,23 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 26,23 \cdot 1,732 = 45,43 \text{ кВар}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{26,23^2 + 45,43^2} = 52,46 \text{ кВА}$$

Таблиця 1.2. Підсумки визначення параметрів освітлювальних електроустановок

№ з/п	Назва об'єкту	F , м ²	P_0 , Вт/м	$P_{\text{вст}}$, кВт	K_{Π}	K_1	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{р}}$, кВт	$Q_{\text{р}}$, квар	$S_{\text{р}}$, кВА
1	Управлінський корпус	3279	10	32,79	0,8	1,12	0,5	1,73	26,23	45,43	52,46
2	Ремонтно-механічна дільниця	3643	12	43,72	1	1,12	0,5	1,73	43,72	75,72	87,45
3	Дробарно-сортувальний комплекс	1184	10	11,84	1	1,12	0,5	1,73	11,84	20,51	23,69
4	Відділення каменерізки та обробки	1202	10	12,02	0,95	1,12	0,5	1,73	11,42	19,78	22,84
5	Складське господарство	1539	12	18,47	0,85	1,12	0,5	1,73	15,7	27,19	31,4
6	Освітлювальна мережа кар'єру	14573	4	58,29	0,95	1,12	0,5	1,73	55,38	95,92	110,76
7	Підсвічування проммайданчика	341550	0,02	6,83	1	1,12	0,5	1,73	6,83	11,83	13,67
	Всього			183,96					171,12	296,38	342,27

1.3 Розрахунок електричних навантажень в силових мережах вище 1000 В

Результати розрахунку навантажень вище 1 кВ наведено в табл. 1.3.

						Арк.
						12

Таблиця 1.3. Силові ел. навант. в мережі вище 1000 В

Назва групи споживачів	К-сть ЕС	Р одн. min, кВт	Р одн. max, кВт	Рсум., кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Рзм, кВт	Qзм, квар	пф	Км	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
ТП№1-3															
Дробарно-сортувальний комплекс															
силова	36	1	200	2692	200	0,6	0,79	0,8	1752	1494,14	27	1,16	2027,94	1494,14	2518,92
освітлювальна													11,98	20,75	
Всього по шинах 0,4 кВ ТП1 - ТП-3															
силова	36	1	200	2692	200	0,7	0,76	0,9	1752	1494,14	27	1,13	1985,35	1494,14	2484,76
освітлювальна													11,98	20,75	
Всього													1992,18	1505,96	2497,33
БСК														-759	
З урахуванням БСК													1992,18	746,96	
Потужність трансформ.: 630 кВА															
К-сть трансформаторів: 5															
Втрати в ТП													21,65	173,33	
Всього на шинах 10 кВ ТП-1 - ТП-3													2013,83	920,28	2214,14
ТП№ 4-5															
Відділення каменерізки та обробки															
силова	61	1	200	1552	200	0,6	0,76	0,9	848,46	730,66	15	1,26	1067,48	730,66	1293,59
освітлювальна													11,55	20	
Всього	61	1	200	1552	200	0,6	0,76	0,9	848,46	730,66	15	1,26	1074,31	742,48	1305,92
Складське господарство															
силова	4	0,5	10	15,18	20	0,5	0,8	0,8	7,59	5,7	3	1,85	14,04	6,26	15,37
освітлювальна													15,88	27,5	
Всього	4	0,5	10	15,18	20	0,5	0,8	0,8	7,59	5,7	3	1,85	29,74	33,43	44,74
Ремонтно-механічна дільниця															
силова	12	10	80	293,48	8	0,4	0,62	1,3	120,33	152,28	7	1,58	190,03	167,5	253,31
освітлювальна													44,24	76,62	
Управлінський корпус															
силова	20	0,1	2	41,49	20	0,7	0,8	0,8	29,04	21,79	20	1,13	32,81	21,79	39,38
освітлювальна													26,54	45,97	
Всього	20	0,1	2	41,49	20	0,7	0,8	0,8	29,04	21,79	20	1,13	59,04	67,17	89,42
Підсвічування проммайданчика															

Продовження табл. 1.3

силова																
освітлювальна													6,91	11,97		
Всього													6,91	11,97	13,82	
Всього по на шинах 0,4 кВ ТП-4 - ТП-5																
силова	65	1	150	1567,6	150	0,6	0,76	0,9	856,05	736,36	21	1,21	1037,89	736,36	1272,57	
освітлювальна													22,53	38,98		
Всього	65	1	150	1567,6	150	0,6	0,76	0,9	856,05	736,36	21	1,21	1060,41	775,34	1313,64	
БСК															-151,8	
З урахуванням БСК													1060,41	623,54		
Потужність трансформ.: 630 кВА																
К-сть трансформаторів: 3																
Втрати в ТП													11,07	96,58		
Всього на шинах 10 кВ ТП-4 - ТП-5													1071,49	720,12	1290,99	
Всього по заводу																
силова	133	0,2	200	4594,5	2000	0,6	0,75	0,9	2757,19	2404,55	45	1,12	3082,54	2404,55	3909,47	
освітлювальна													173,14	299,87		
Компенсуючі пристрої															-1269,05	
Всього													3253,66	1431,53	3554,66	
Втрати в трансформаторах													32,72	269,9		
Всього по заводу													3286,38	1701,45	3700,7	
Високовольтні двигуни																
Асинхронні двигуни	4	250	250	1012	1	0,8	0,75	0,9	759	669,38			759	669,38	1012	
Всього по заводу													4045,38	2370,81	4688,91	
Компенсуючі пристрої 10 кВ															-1821,6	
Всього на шинах 10 кВ													4045,38	549,21	4082,49	
$\operatorname{tg}\varphi = 0,14$																

1.4 Графіки електричних навантажень підприємства

Результати розрахунків наведено в табл. 1.4 – 1.5 та на рис. 1.1 – 1.5.

Таблиця 1.4. Вихідні дані до розрахунку графіків електричних навантажень

№ з/п	Робочі дні Р, %	Робочі дні Q, %	Вихідні дні Р, %	Вихідні дні Q, %
1	75,9	91,1	28,3	55,7
2	60,7	81,0	28,3	55,7
3	45,5	67,8	28,3	55,7
4	45,5	67,8	28,3	55,7
5	40,5	62,7	28,3	55,7
6	50,6	68,8	28,3	55,7
7	45,5	67,8	28,3	55,7
8	81,0	87,0	28,3	55,7
9	86,0	93,1	25,3	50,6
10	99,2	83,0	25,3	50,6
11	83,0	91,1	25,3	50,6
12	78,9	87,0	25,3	50,6
13	82,0	91,1	25,3	50,6
14	93,1	96,1	25,3	50,6
15	101,2	101,2	25,3	50,6
16	81,0	90,1	25,3	50,6
17	60,7	79,9	25,3	50,6
18	75,9	86,0	25,3	50,6
19	78,9	87,0	26,3	52,6
20	78,9	87,0	26,3	52,6
21	75,9	86,0	28,3	55,7
22	78,9	87,0	28,3	55,7
23	83,0	89,1	28,3	55,7
24	75,9	87,0	28,3	55,7

P , кВт
 Q , кВар

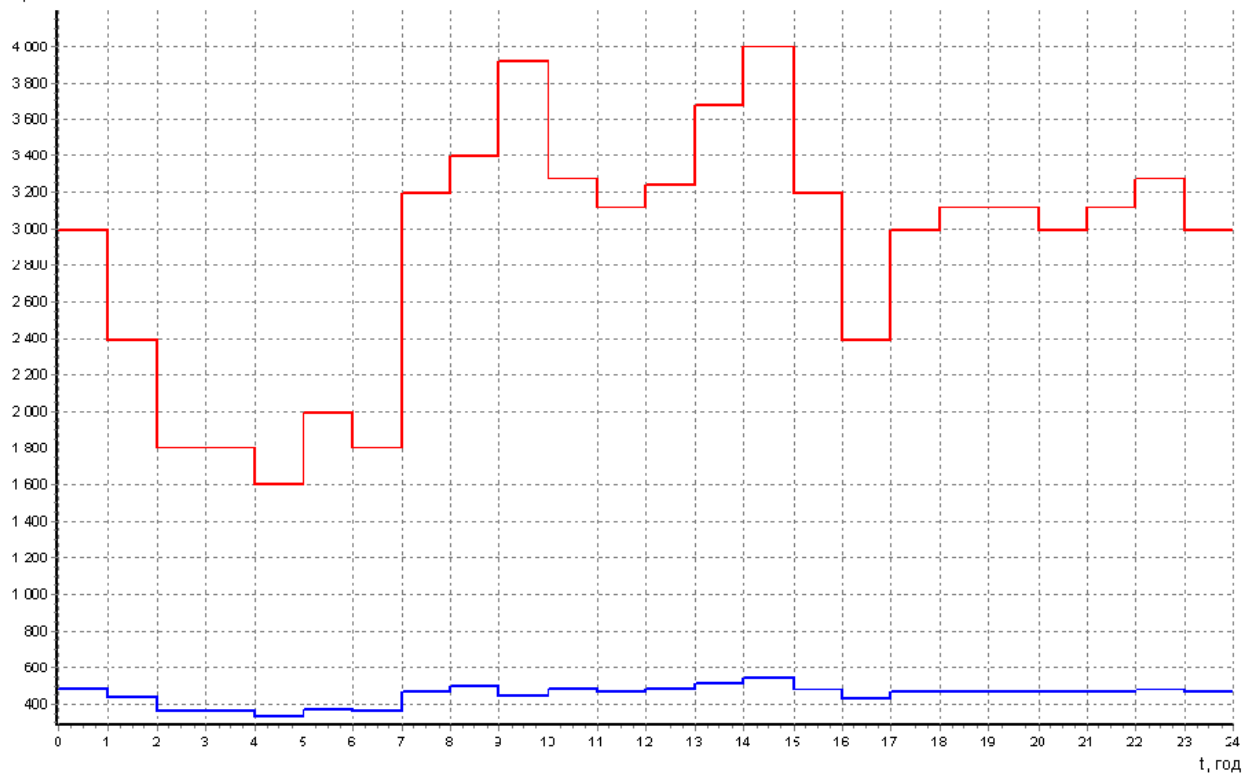


Рис. 1.1. Добовий графік P , Q (зимові робочі дні)

P , кВт
 Q , кВар

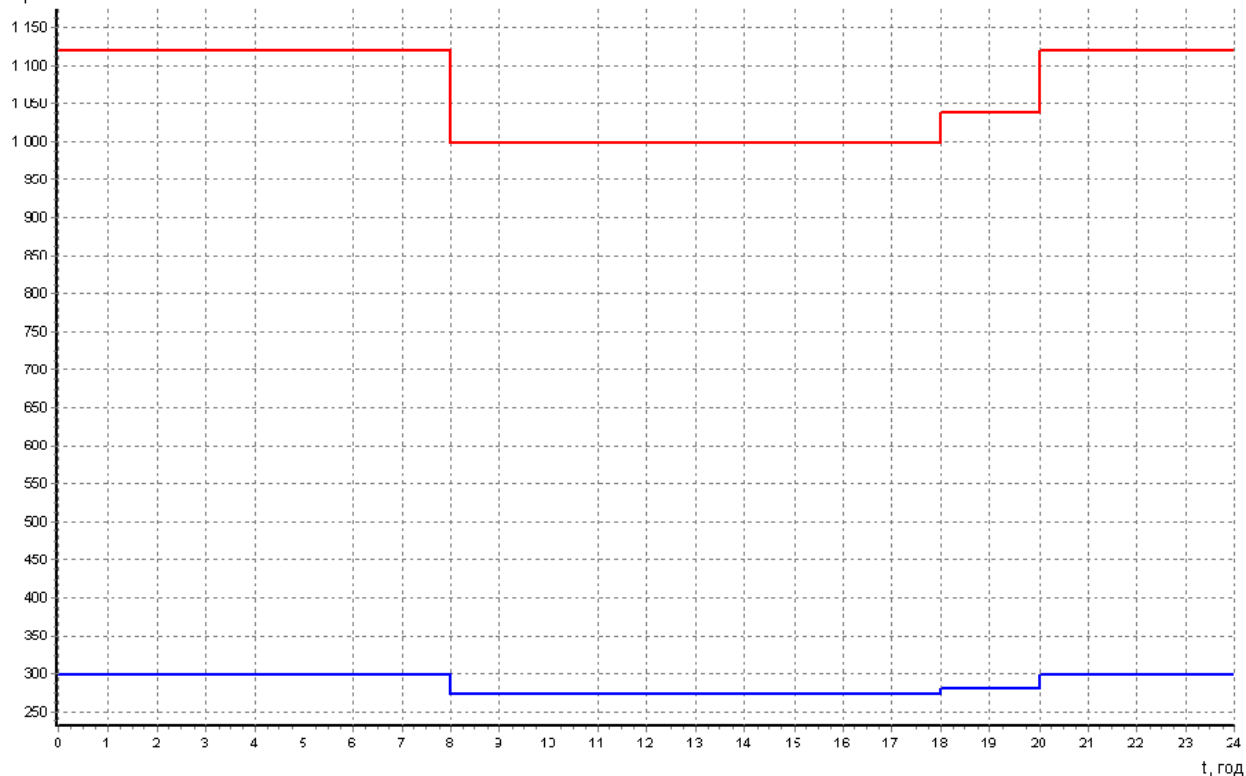


Рис. 1.2. Добовий графік P , Q (зимові вихідні дні)

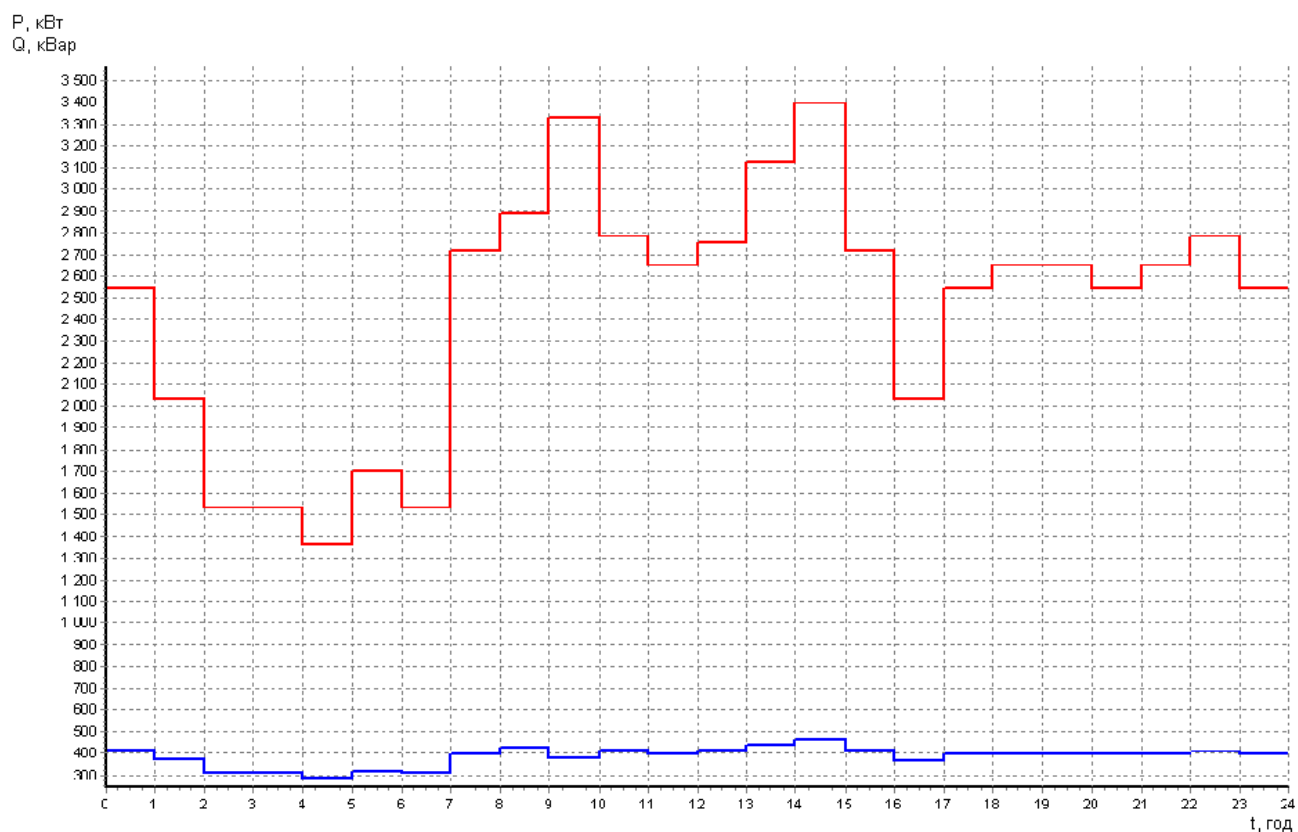


Рис. 1.3. Добовий графік P , Q (літні робочі дні)

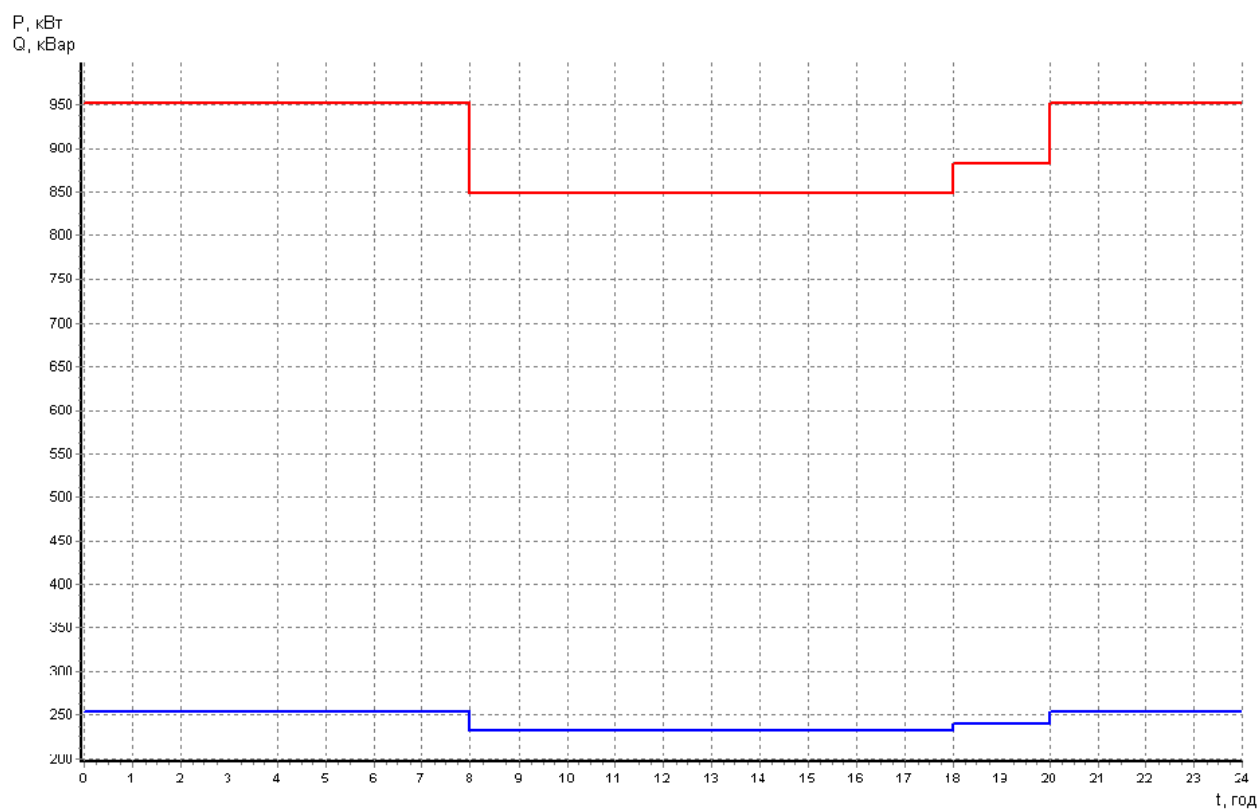


Рис. 1.4. Добовий графік P , Q (літні вихідні дні)

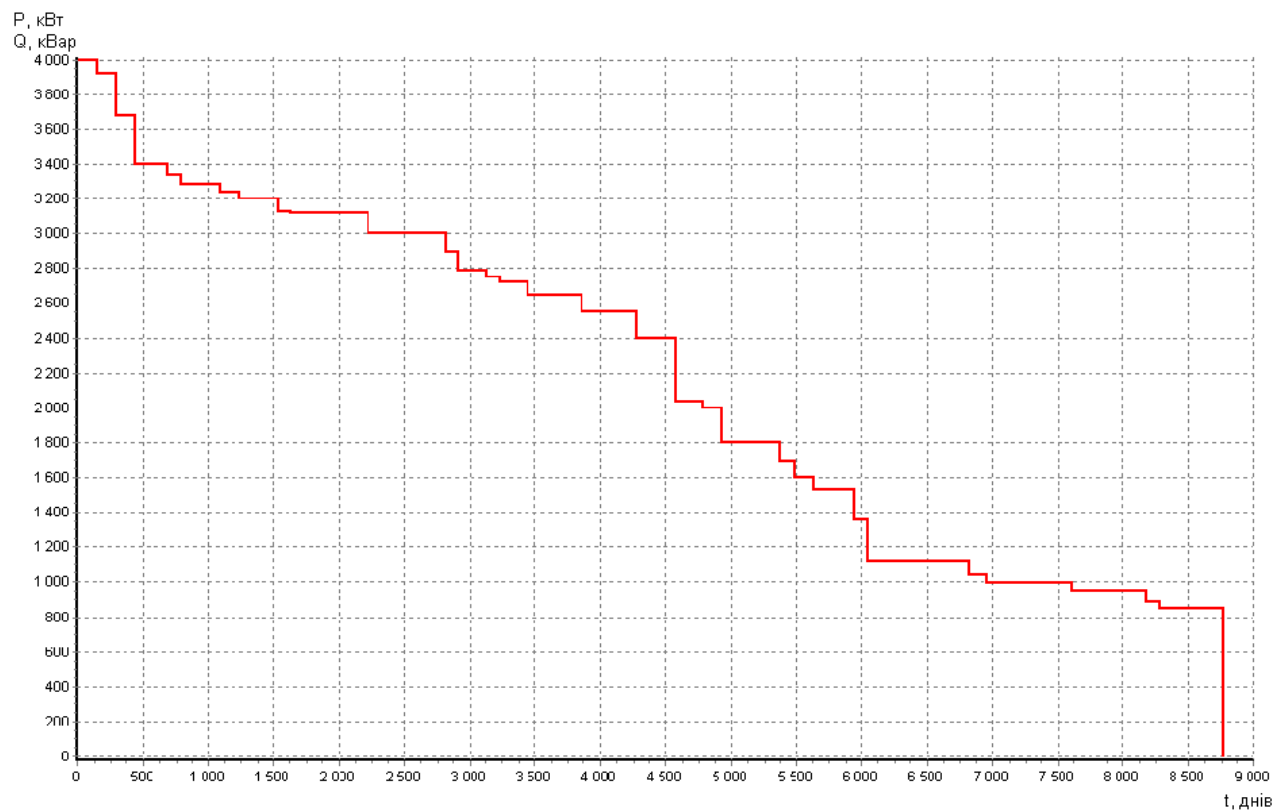


Рис. 1.5. Річний графік активного навантаження P , Q за тривалістю

Таблиця 1.6 Обчислені показники графіків електричного навантаження

№ з/п	Величина	Значення	Одиниця виміру
1	Розрахункова повна потужність, S_p	4082,12	МВА
2	Річне споживання активної електроенергії (зимові робочі дні), $W_{з.р.}$	10328982	кВт·год
3	Річне споживання реактивної електроенергії (зимові робочі дні), $V_{з.р.}$	1609478	квар·год
4	Річне споживання активної електроенергії (зимові вихідні дні), $W_{з.в.}$	1677127	кВт·год
5	Річне споживання реактивної електроенергії (зимові вихідні дні), $V_{з.в.}$	452040	квар·год
6	Річне споживання активної електроенергії (літні робочі дні), $W_{л.р.}$	6270828	кВт·год
7	Річне споживання реактивної електроенергії (літні робочі дні), $V_{л.р.}$	976742	квар·год
8	Річне споживання активної електроенергії (літні вихідні дні), $W_{л.в.}$	1052545	кВт·год
9	Річне споживання реактивної електроенергії (літні вихідні дні), $V_{л.в.}$	283587	квар·год
10	Сумарне річне споживання активної електроенергії, W_p	19329481	кВт·год
11	Сумарне річне споживання реактивної електроенергії, V_p	3321846	квар·год
12	Час використання максимуму навантаження, T_m	4862	год
13	Час максимальних втрат, t_m	3239	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Як зразок покажемо алгоритм розрахунку щодо управлінського корпусу:

$$R = \sqrt{\frac{P_{p.сил} + P_{p.осв}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{32,81 + 26,54}{3,14 \cdot 0,2}} = 10 \text{ мм},$$

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot P_{p.осв}}{P_p} = \frac{360^\circ \cdot 26,54}{59,35} = 161^\circ.$$

Обчислення щодо решти підрозділів зведено до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Результати розрахунку картограми електричних навантажень

№ п/п	Найменування	$P_{p.сил},$ кВт	$P_{p.осв},$ кВт	$P_p,$ кВт	m	$R,$ мм	α	$x,$ м	$y,$ м	$P \cdot x,$ кВт · м	$P \cdot y,$ кВт · м
1	Управлінський корпус	32,81	26,54	59,35	0,2	10	161	213	106	12641,55	6291,10
2	Ремонтно-механічна дільниця	190,03	44,24	234,27	0,2	19	68	349	106	81760,23	24832,62
3	Дробарно-сортувальний комплекс	2027,9 4	11,98	2039,9 2	0,2	57	2	228	46	465101,7 6	93836,32
4	Відділення каменерізки та обробки	1067,4 8	11,55	1079,0 3	0,2	41	4	334	46	360396,0 2	49635,38
5	Складське господарство	14,04	15,88	29,92	0,2	7	191	30	288	897,60	8616,96
6	Освітлювальна мережа кар'єру	-	56,04	56,04	0,2	9	360	97	52	5435,88	2914,08
7	Підсвічування проммайданчика	-	6,91	6,91	0,2	3	360	97	52	670,27	359,32
	Всього по заводу	3332,3 0	173,1 4	3505,4 4						926903,3 1	186485,7 8

Просторові координати центру навантажень:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{926903,31}{3505,44} = 264 \text{ м},$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{186485,78}{3505,44} = 53 \text{ м}.$$

						Арк.
						20

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Вибір схеми зовнішнього електропостачання підприємства

В роботі розглядалось 2 варіанти схем (рис. 3.1)

1. КЛ 10 кВ.

2. ПЛ 35 кВ.

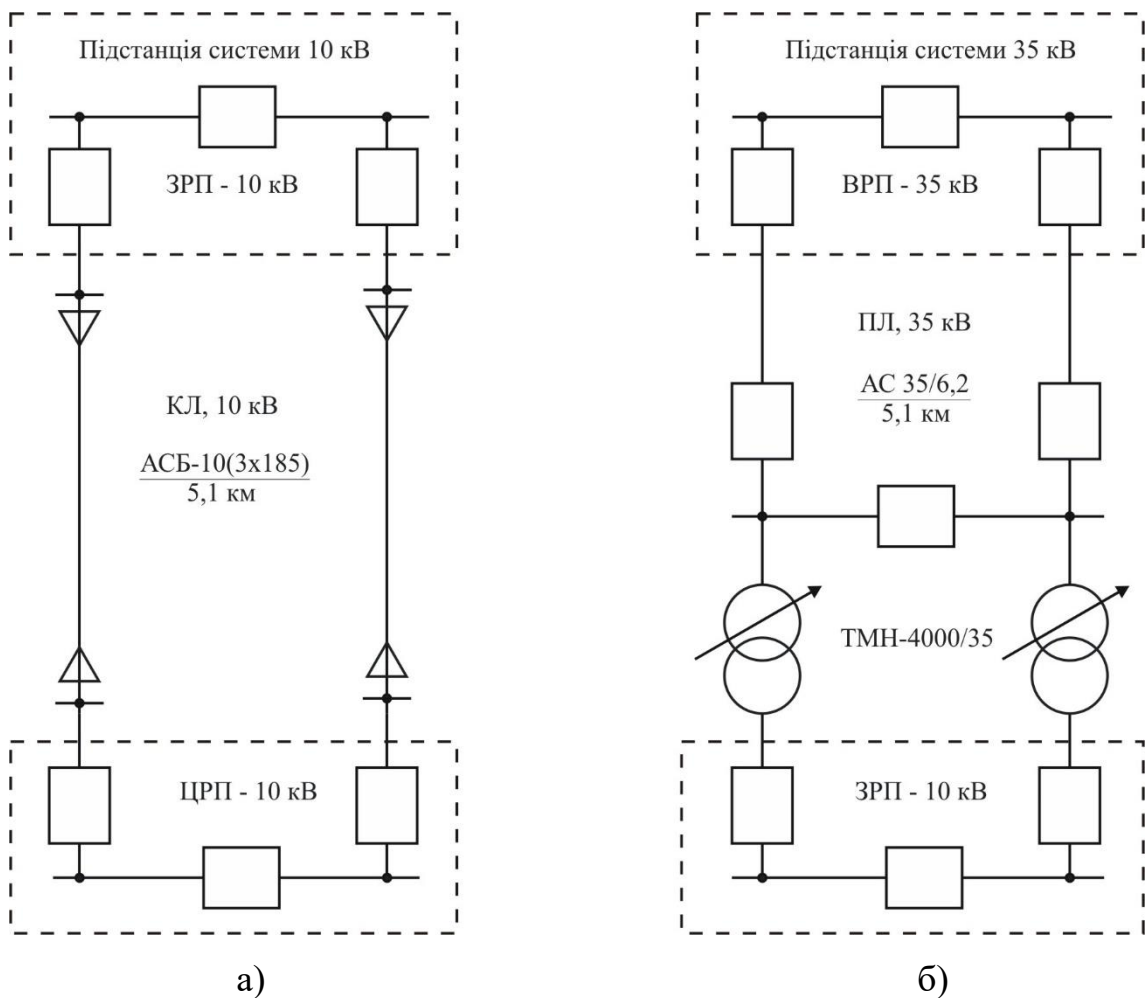


Рис. 3.1. Варіанти схем зовнішнього електропостачання

Розрахунковий струм, А:

$$I_{\max} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{4034}{\sqrt{3} \cdot 10} = 232,90$$

$$I_p = 116,45 \text{ A} \leq K_n I_{\partial on} = 0,92 \cdot 235 = 216,2 \text{ A}$$

$$I_{p.08} = 2I_p = 2 \cdot 116,45 = 232,9 \text{ A} \leq K_{an} K_n' I_{don} = 1,25 \cdot 1 \cdot 235 = 293,75 \text{ A}$$

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{don}} = \frac{116,45}{235} = 0,5$$

$$\Delta P_{KL} = \Delta P_{1KL} l_{\Sigma} K_3^2 = 22 \cdot 10,2 \cdot 0,25 = 56,1 \text{ кВТ}$$

$$\Delta W_{\tau} = \Delta P_{\tau} \tau = 56,1 \cdot 3200,02 = 179521,12 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

$$C_{\text{emp}} = \Delta W_{\Sigma} C_0 = 179521,12 \cdot 4,293 \cdot 0,001 = 770,68 \text{ тис.грн.}$$

Таблиця 3.1. Підсумки обчислення капіталовкладень щодо першого варіанту
схеми

№ вар.	Назва елемента схеми	Од. вим.	Кількість	Вартість, тис. грн	Всього, тис. грн
1	КЛ	км	10,32	212,50	2193,00
	Траншея	км	5,16	14,47	74,66
	Шафи КРП	шт.	2	10,83	21,66
	Всього				2289,32

						Арк.
						22

Таблиця 3.2. Дані щодо визначення експлуатаційних витрат першого варіанта мережі

№ вар	Назва елемента схеми	К _і , тис. грн.	Р _{аі} , %	С _{аі} , тис. грн.	Р _{эі} , %	С _{аі} , тис. грн.	С _і , тис. грн.
1	КЛ	2193,00	5	109,65	5	109,65	219,30
	Траншея	74,66	5	3,73	5	3,73	7,46
	Шафи КРП	21,66	15	3,25	5	1,08	4,33
	Всього						231,09

Зведені витрати для варіанту № 1, тис. грн./рік:

$$Z_i = E_{\text{н}} K_i + C_i + C_{\text{втр.і}} + Y_i =$$

$$= 0,12 \cdot 2236,33 + 225,77 + 770,68 + 0,59 = 1265,4 \text{ тис.грн./рік}$$

Таблиця 3.3. Підсумкові показники техніко-економічного зіставлення варіантів зовнішньої системи живлення

Показники	Варіант 1	Варіант 2
Капітальні вкладення	2289,32	1018,10
Поточні витрати	231,09	151,90
Вартість втрат електроенергії	779,90	663,50
Збиток	0,61	0,71
Зведені витрати	1280,60	938,20

Таким чином, обираємо варіант № 2.

3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання підприємства

Організація надійної та безперебійної системи розподілу електричної енергії безпосередньо на території промислового об'єкта є одним із ключових етапів проектування. Для забезпечення живлення технологічних комплексів підприємства було ухвалено рішення про впровадження радіальної топології внутрішньозаводської мережі. Передача енергії від головного розподільчого

пристрою до споживачів здійснюватиметься за допомогою підземних кабельних ліній, що оперують класом напруги 10 кВ.

Варто зазначити, що остаточне затвердження вказаної конфігурації відбулося на основі експертного інженерного аналізу без залучення детальних техніко-економічних порівнянь. Такий підхід є цілком виправданим та спирається на багаторічну практику проектування аналогічних промислових об'єктів. Відмова від багатоваріантних економічних зіставлень у даному випадку базується на кількох беззаперечних технологічних перевагах, які роблять альтернативні варіанти менш доцільними.

Радіальна архітектура побудови мережі об'єктивно гарантує найвищі показники надійності живлення порівняно з магістральними чи змішаними (комбінованими) аналогами. Кожна цехова трансформаторна підстанція отримує енергію по індивідуальній, повністю незалежній лінії. Це означає, що у разі виникнення аварійної ситуації чи пошкодження ізоляції на одній із ділянок, релейний захист локалізує проблему і відключить лише пошкоджений промінь. Усі інші виробничі підрозділи продовжать працювати у штатному режимі, що критично важливо для недопущення масової зупинки технологічного процесу.

Територіальне планування підприємства характеризується досить компактним розміщенням споруд. Фізичні відстані від центру живлення до локальних трансформаторних підстанцій номіналом 10/0,4 кВ є порівняно невеликими. З огляду на коротку довжину трас прокладання, можна впевнено стверджувати, що падіння напруги та втрати активної потужності у кабельних провідниках будуть незначними і не вийдуть за межі жорстких нормативних допусків. Відповідно, впровадження більш складних схем не дасть фінансового виграшу, здатного перекрити витрати на ускладнення комутаційної апаратури.

Повна візуалізація розробленої архітектури внутрішнього енергозабезпечення, включно з топологією з'єднань та розташуванням вузлів навантаження, детально наведена на відповідних кресленнях у графічній частині кваліфікаційної роботи.

						Арк.
						24

РОЗДІЛ 4
РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності

Розрахунок балансу РП наведено нижче

$$P_p = P_n + \Delta P_m + P_e = 3293 + 32,3 + 750 = 4075,3 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_n + \Delta Q_m + Q_e = 2392 + 266,7 + 661 = 3319,7 \text{ квар}$$

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 4075,3 \cdot 0,15 = 611,3 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_e = 3319,7 - 611,3 = 2708,4 \text{ квар}$$

$$N_0 = \frac{P_n}{\beta \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{3293}{0,7 \cdot 630} = 7,47 \approx 8 \text{ шт.}$$

Варіант 1. $N = 8$ шт.

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{\text{ном}})^2 - (P_n + \Delta P_m)^2} = \sqrt{(8 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 3325,3^2} = 1178,63 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КН}} = (Q_n + \Delta Q_m) - Q_1 = 2658,7 - 1178,63 = 1480,07 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КВ}} = Q_{\text{КП}} - Q_{\text{КН}} = 2708,4 - 1480,07 = 1228,33 \text{ квар}$$

						Арк.
						25

Таблиця 4.1. Підсумки обчислення необхідної генерації реактивної енергії

<i>№ варіанту</i>	<i>Кількість тр-рів</i>	<i>Q_l, квар</i>	<i>Q_{KH}, квар</i>	<i>Q_{KB}, квар</i>
1	8	1192,77	1497,83	1243,07
2	9	2192,87	497,73	2243,17
3	10	2931,39	0,00	2740,90

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв

Таблиця 4.2. Підбір конденсаторних установок за умови $N_t = 8$

<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>К-сть та потужність БК, шт. квар</i>	<i>Сума $Q_{БК}$, квар</i>	<i>$Q_{кп} - Q_{БК}$, квар</i>	<i>K_z</i>	<i>S_p, кВА</i>
1, 2, 3	5	1992,18	1505,96	1004,41	501,55	5·50; 5·100	750	-248,45	0,68	2130,79
4, 5	3	1060,41	775,34	817,17	0	3·50	150	-150	0,65	1231,06

Таблиця 4.3. Підбір конденсаторних установок за умови $N_t = 9$

<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>К-сть та потужність БК, шт. квар</i>	<i>Сума $Q_{БК}$, квар</i>	<i>$Q_{кп} - Q_{БК}$, квар</i>	<i>K_z</i>	<i>S_p, кВА</i>
1, 2, 3	6	1992,18	1505,96	1788,81	0		0	0	0,66	2497,34
4, 5	3	1060,41	775,34	817,19	0		0	0	0,69	1313,63

Таблиця 4.4. Підбір конденсаторних установок за умови $N_t = 10$

<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>К-сть та потужність БК, шт. квар</i>	<i>Сума $Q_{БК}$, квар</i>	<i>$Q_{кп} - Q_{БК}$, квар</i>	<i>K_z</i>	<i>S_p, кВА</i>
1, 2, 3	7	1992,18	1505,96	2406,03	0		0	0	0,57	2497,34
4, 5	3	1060,41	775,34	817,17	0		0	0	0,69	1313,63

РОЗДІЛ 5
ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ
ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Обчислення номінальної потужності головної знижувальної підстанції:

$$S_{\text{НОМ.Т}} = \frac{K \cdot S_{\text{max}}}{1,4(n-1)} = \frac{0,8 \cdot 4082,49}{1,4(2-1)} = 2332,85 \text{ кВА.}$$

Приймаємо до встановлення апарат марки ТМН 4000/35.

Фактичний рівень завантаженості агрегату становитиме:

$$K_3 = \frac{S_{\text{max}}}{n \cdot S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{4082,49}{2 \cdot 4000} = 0,51.$$

Критерії підтвердження коректності підбору силового обладнання щодо ТП-1:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{880,45}{2 \cdot 630} = 0,70,$$

$$2 \cdot S_{\text{НОМ.Т}} = 2 \cdot 630 = 1260 \geq 815 = \frac{S_p}{1,08},$$

$$S_{\text{НОМ.Т}} = 630 \geq 629 = \frac{S_p}{1,4}.$$

Зупиняємо вибір на комплектній підстанції ТП-630/10/0,4.

Таблиця 5.1. Підсумки обґрунтування параметрів цехових трансформаторних пунктів

№ ТП	К-сть	$S_{роз},$ кВА	Марка	K_3	$S_{ном} > S_p/K_1$	$S_{ном} > S_p/K_2$
ТП-1	2	880,45	ТМ-630	0,70	815	629
ТП-2	2	880,45	ТМ-630	0,70	815	629
ТП-3	1	440,23	ТМ-630	0,70	408	314
ТП-4	2	859,18	ТМ-630	0,68	796	614
ТП-5	1	429,58	ТМ-630	0,68	398	307

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

струмів к.з. наведено нижче

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{\kappa 3}} = \frac{37^2}{50000} = 0,03 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{0,03}{25} = 0 \text{ OM}$$

$$R_{\text{J}} = r_0 \cdot l = 0,249 \cdot 5,1 = 1,2699 \text{ OM}$$

$$X_{\text{г}} = x_0 \cdot l = 0,427 \cdot 5,1 = 2,18 \text{ Ом}$$

$$R_m = \frac{\Delta P_{\kappa} U_{cp,ном}^2}{S_{ном}^2} = \frac{33,5 \cdot 10,5^2}{4000^2} \cdot 10^3 = 0,23 \text{ Ом}$$

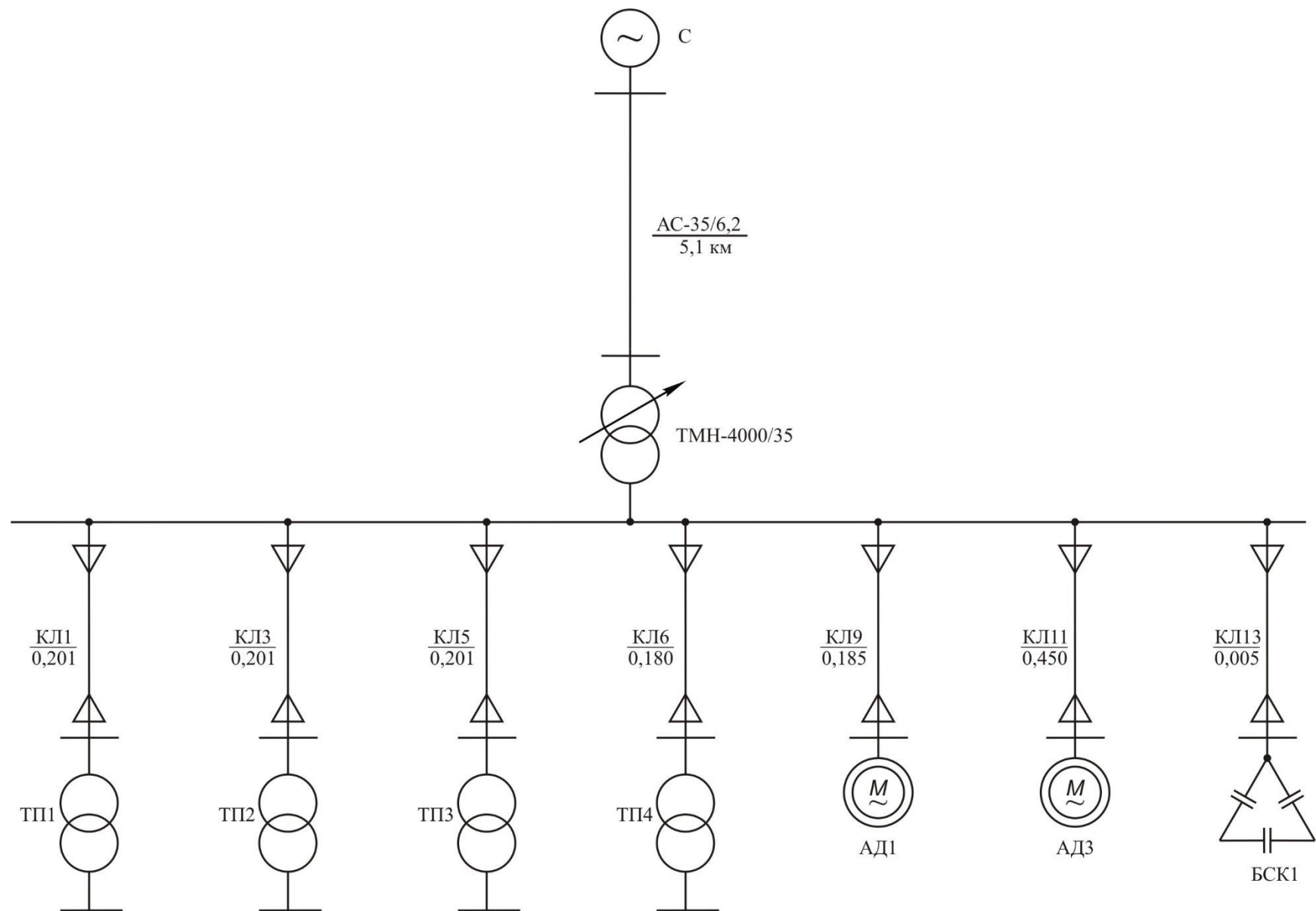


Рис. 6.1. Розрахункова схема системи електропостачання

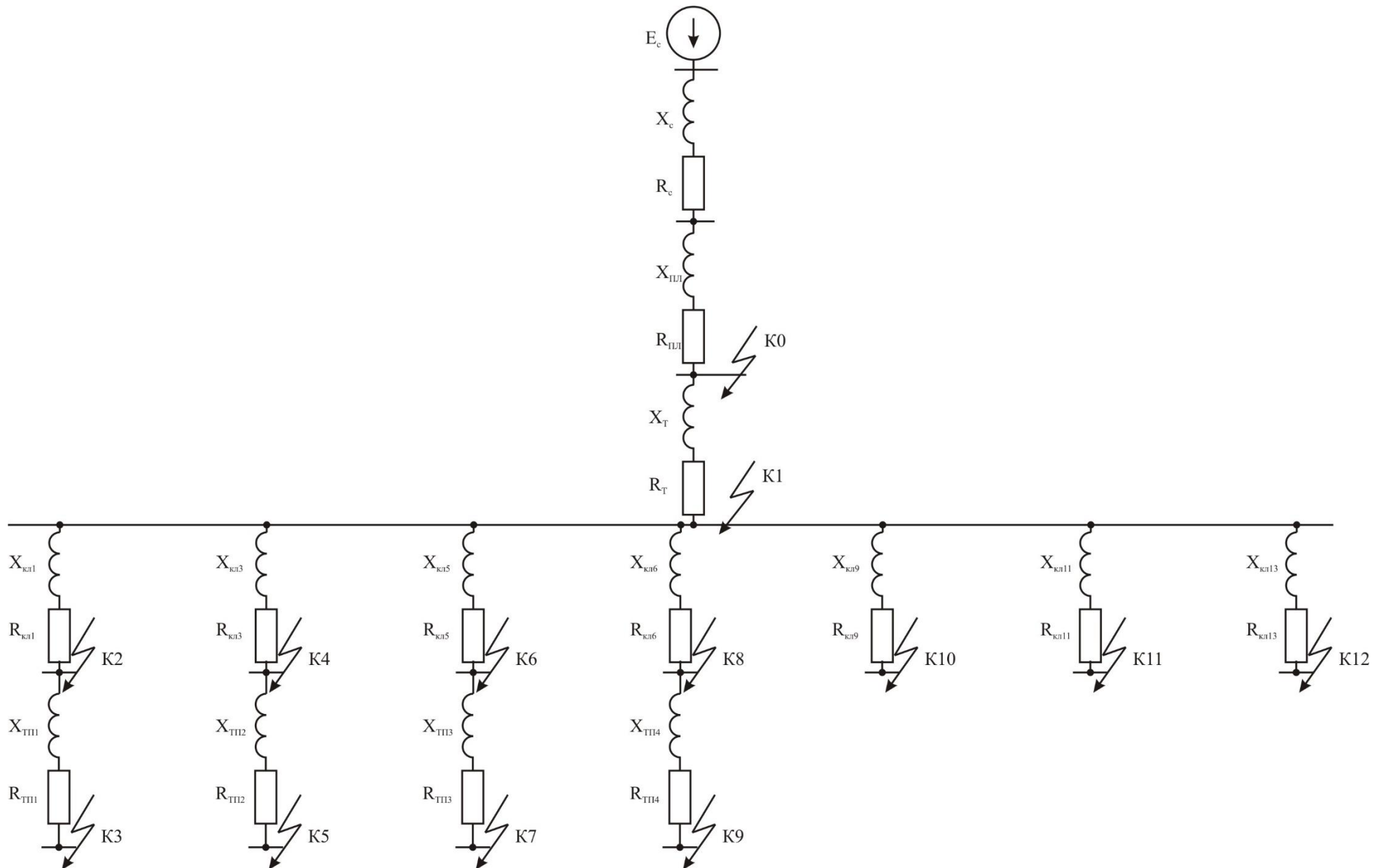


Рис. 6.1. Схема заміщення системи електропостачання

$$X_{K0} = X_c + X_{\tau} = 0,03 + 2,18 = 2,21 \text{ Ом}$$

$$R_{K0} = R_c + R_{\tau} = 0 + 1,2699 = 1,2699 \text{ Ом}$$

$$Z_{K0} = \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2} = \sqrt{1,2699^2 + 2,21^2} = 2,55 \text{ Ом}$$

$$I_{K0}'' = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} Z_{K0}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 2,55} = 8,38 \text{ кА}$$

$$T_{a0} = \frac{X_{K0}}{\omega R_{K0}} = \frac{2,21}{314 \cdot 1,2699} = 0,0055 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 0} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a0}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0055}} = 1,162$$

$$i_{y\partial 0} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K0}'' = \sqrt{2} \cdot 1,162 \cdot 8,38 = 13,77 \text{ кА}$$

$$X'_{K0} = X_{K0} \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}} \right)^2 = 2,21 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,178 \text{ Ом}$$

$$R'_{K0} = R_{K0} \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}} \right)^2 = 1,2699 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,102 \text{ Ом}$$

$$Z'_{K0} = Z_{K0} \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}} \right)^2 = 2,55 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,205 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X'_{K0} + X_m = 0,178 + 2,07 = 2,248 \text{ Ом}$$

						Арк.
						33

$$R_{K1} = R'_{K0} + R_m = 0,102 + 0,23 = 0,332 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,332^2 + 2,248^2} = 2,272 \text{ Ом}$$

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,272} = 2,67 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{2,248}{314 \cdot 0,332} = 0,0216 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0216}} = 1,629$$

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2}k_{y\partial}I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,629 \cdot 2,67 = 6,15 \text{ кА}$$

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном} \cdot \eta} = \frac{0,25}{0,75 \cdot 0,92} = 0,362 \text{ МВА}$$

$$X_{AD} = \frac{1}{I_{нук}} \frac{U_{cp.ном}^2}{S_{ном}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 0,362} = 58,57 \text{ Ом}$$

$$i_{y\partial 1(AD)} = \sqrt{2}k_{y\partial(AD)}I''_{K1(AD)} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,37 = 0,89 \text{ кА}$$

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(AD)} = 2,67 + 0,37 = 3,04 \text{ кА}$$

$$i_{y\partial 1} = i_{y\partial 1(c)} + i_{y\partial 1(AD)} = 6,15 + 0,89 = 7,04 \text{ кА}$$

Розрахунковий струм кабельної лінії КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} U_{cp.ном}} = \frac{875,2}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 24,06 \text{ A}$$

$$B_k = I_{K1}^2 (t_{p.з. min} + T_a) = 3,04^2 (0,525 + 0,0216) = 5,05 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{5,05} \cdot 10^3 = 23,91 \text{ мм}^2$$

Обираємо до кабель марки ААШВ-10(3 х 35):

$$R_{кл} = r_0 \cdot l_{кл} = 0,89 \cdot 0,201 = 0,179 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = x_0 \cdot l_{кл} = 0,095 \cdot 0,201 = 0,019 \text{ Ом}$$

Таблиця 6.1. Таблиця 6.1. Технічні характеристики кабельних магістралей 10 кВ

№ КЛ	l, км	r ₀ , Ом/км	x ₀ , Ом/км	R, Ом	X, Ом
1, 2	0,203	0,90	0,096	0,183	0,019
3, 4	0,203	0,90	0,096	0,183	0,019
5	0,203	0,90	0,096	0,183	0,019
6, 7, 8	0,182	0,90	0,096	0,164	0,017
9, 10	0,187	0,90	0,096	0,168	0,018
11, 12	0,455	0,90	0,096	0,410	0,044
13, 14	0,005	0,90	0,096	0,005	0

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{к1} = 2,248 + 0,019 = 2,267 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{к1} = 0,332 + 0,179 = 0,511 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,511^2 + 2,267^2} = 2,324 \text{ Ом}$$

$$I_{K2}'' = \frac{U_{ср.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,324} = 2,61 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{2,267}{314 \cdot 0,511} = 0,0141 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0141}} = 1,492$$

$$i_{y\partial 2} = \sqrt{2}k_{y\partial}I_{K2}'' = \sqrt{2} \cdot 1,492 \cdot 2,61 = 5,51 \text{ кА}$$

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{\kappa} U_{ср.ном.}^2}{S_{ном}^2} = \frac{6,5 \cdot 10,5^2}{630^2} \cdot 10^3 = 1,806 \text{ Ом}$$

$$X_{mp} = \frac{U_{\kappa, \%} U_{ср.ном.}^2}{S_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{630} \cdot 10 = 9,625 \text{ Ом}$$

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{6н}} \right)^2 = (2,267 + 9,625) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0173 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{mp}) \left(\frac{U_{HH}}{U_{6H}} \right)^2 = (0,511 + 1,806) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0034 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0034^2 + 0,0173^2} = 0,0176 \text{ Ом}$$

$$I_{K3}'' = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0176} = 13,12 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0173}{314 \cdot 0,0034} = 0,0162 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0162}} = 1,539$$

$$i_{y\partial 3} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,539 \cdot 13,12 = 28,56 \text{ кА}$$

Струми к. з. для інших точок наведено в табл. 6.2.

						Арк.
						37

Таблиця 6.2. Підсумкові показники визначення струмів короткого замикання

№ точки к.з.	$R, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$	$I_k'', \text{ кА}$	$T_a, \text{ с}$	$k_{уд}$	$i_{уд}, \text{ кА}$
0	1,2851	2,2365	8,48	0,0056	1,176	13,94
1	0,3360	2,2750	3,08	0,0219	1,649	7,12
2	0,5171	2,2942	2,64	0,0143	1,510	5,58
3	0,0035	0,0175	13,28	0,0164	1,557	28,90
4	0,5171	2,2942	2,64	0,0143	1,510	5,58
5	0,0035	0,0175	13,28	0,0164	1,557	28,90
6	0,5171	2,2942	2,64	0,0143	1,510	5,58
7	0,0035	0,0175	13,28	0,0164	1,557	28,90
8	0,4979	2,2922	2,65	0,0149	1,524	5,65
9	0,0034	0,0175	13,28	0,0169	1,568	29,08
10	0,5030	2,2932	2,64	0,0147	1,520	5,61
11	0,7418	2,3185	2,55	0,0101	1,384	4,94
12	0,3400	2,2750	2,70	0,0216	1,645	6,21

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Розрахунковий струм КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}} = \frac{875,2}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 24,06 \text{ А}$$

Обираємо до встановлення кабель ААШВ-10(3х35):

$$I_p = 24,06 \text{ А} \leq K_n \cdot I_{\text{дон}} = 0,92 \cdot 80 = 73,6 \text{ А}$$

						Арк.
						38

$$I_{ас} = 48,12 \text{ A} \leq K_{ан} \cdot K'_n \cdot I_{дон} = 1,25 \cdot 1 \cdot 80 = 100 \text{ A}$$

$$B_k = I_{K1}''^2 (t_{p.з. \min} + T_a) = 3,04^2 (0,525 + 0,0216) = 23,91 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{5,05} \cdot 10^3 = 23,91 \text{ мм}^2$$

Таблиця. 6.3. Підсумкові дані щодо підбору кабельних магістралей

№ КЛ	n, шт	S _p , МВА	I _p , А	I _{p.ав.} , А	B _k , кА ² с	F _{min} , мм ²	Марка кабелю	I _{дон} , А	K _n	K _n I _{дон} , А	K _{ан}	K' _n	$\frac{K_{ан}}{K'_n} I_{дон}$, А
1, 2	2	880,4 5	24,35	48,70	5,11	24,20	ААШВ-10(3х35)	80	0,92	73,6	1,25	1	100
3, 4	2	880,4 5	24,35	48,70	5,11	24,20	ААШВ-10(3х35)	80	0,92	73,6	1,25	1	100
5	1	440,2 3	24,35	-	5,11	24,20	ААШВ-10(3х35)	80	1	80	-	-	-
6, 7, 8	3	1291, 31	23,67	47,34	5,11	24,20	ААШВ-10(3х35)	80	0,87	69,6	1,25	0,92	92
9, 10	2	631,4 9	17,37	-	5,11	24,20	ААШВ-10(3х35)	80	0,92	73,6	-	-	-
11, 12	2	631,4 9	17,37	-	5,11	24,20	ААШВ-10(3х35)	80	0,92	73,6	-	-	-
13, 14	2	1821, 60	50,08	-	5,11	24,20	ААШВ-10(3х35)	80	0,92	73,6	-	-	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Результати вибору ввідного вимикача 110 кВ наведено в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Підсумки перевірки параметрів головного комутаційного апарата на 35 кВ

Умови вибору	Розрахунок
$U_{уст} \leq U_{ном}$	$35 \leq 35$
$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$93,49 \leq 1600$
$I''_{к0} \leq I_{ном.відкл}$	$8,48 \leq 20$
$i_a \leq \sqrt{2} I_{ном.відкл} \beta_\tau$	$0 \leq 11,45$
$\sqrt{2} I_\Pi + i_a \leq \sqrt{2} I_{ном.відкл} (1 + \beta_\tau)$	$1,41 \cdot 8,48 + 0 \leq 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $11,96 \leq 39,48$
$I_\Pi \leq I_{терм}$	$8,48 \leq 52$
$i_{уд} \leq 1,8 \sqrt{2} I_{ном.відкл}$	$13,94 \leq 132,37$
$B_k \leq I_{терм}^2 t_{терм}$	$76,44 \leq 1200$

$$\tau = t_{пз.min} + t_{с.с} = 0,02 + 0,05 = 0,07 \text{ с}$$

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 8,38 \cdot e^{\frac{-0,07}{0,0055}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_k = I''^2 (t_{с.с.} + t_{пз.max} + T_a) = 8,38^2 (0,05 + 1,02 + 0,0055) = 75,53 \text{ кА}^2 \text{ с}$$

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема підключення ТВП наведена на рис. 6.3.

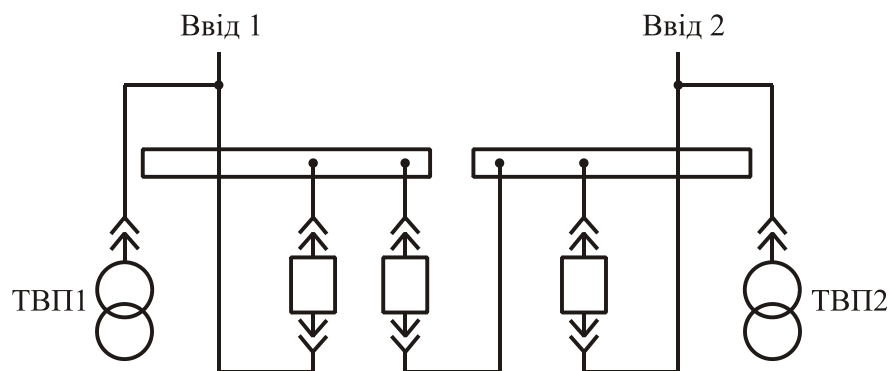


Рис. 6.3. Схема під'єднання ТВП на ГЗП із змінним оперативним струмом

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{98,7^2 + 40^2} = 106,5 \text{ кВА}$$

$$S_p = K_c S_{уст} = 0,8 \cdot 106,5 = 85,2 \text{ кВА}$$

Обираємо ТМ-63/10.

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{85,2}{2 \cdot 63} = 0,68$$

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ДВИГУНА

Цей розділ кваліфікаційної роботи фокусується на проектуванні комплексу протиаварійної автоматики для високовольтної електричної машини змінного струму з номінальною напругою 10 кВ. Забезпечення безперебійності роботи потужних промислових агрегатів є критично важливим завданням, оскільки їх аварійне пошкодження неминуче веде до значних фінансових втрат та порушення складних технологічних циклів на виробництві. Саме тому впровадження високоточних мікропроцесорних терміналів є обґрунтованим і необхідним кроком при модернізації систем електропостачання підприємств.

7.1. Організація цифрового релейного захисту високовольтного двигуна

Організація протиаварійного керування електроприводом реалізується за двома ключовими ступенями. Ця конфігурація містить функцію запобігання тепловим перевантаженням та блок швидкісного (миттєвого) відключення при виникненні струмів короткого замикання. Подібна архітектура гарантує повноцінну безпеку як самої обертової машини, так і живильної магістралі, повністю нівелюючи ризики руйнування ізоляційних матеріалів від надмірного термічного впливу чи руйнівних електродинамічних зусиль.

Слід окремо наголосити, що застосування відсічки зі штучною витримкою часу (селективної) категорично не рекомендується для подібних електроприводів. Затримка ліквідації міжфазних замикань провокує глибоку посадку напруги у всій розподільчій мережі, що неодмінно призводить до гальмування суміжних механізмів та повної втрати динамічної стійкості вузла навантаження. Зі свого боку, функція контролю перевантажень використовує зворотнозалежну ампер-секундну характеристику, що дозволяє точно моделювати процес нагрівання статорних обмоток.

						Арк.
						42

На рисунку 7.1 проілюстровано базову топологію підключення вимірювальних та логічних ланок обертання електроустановки.

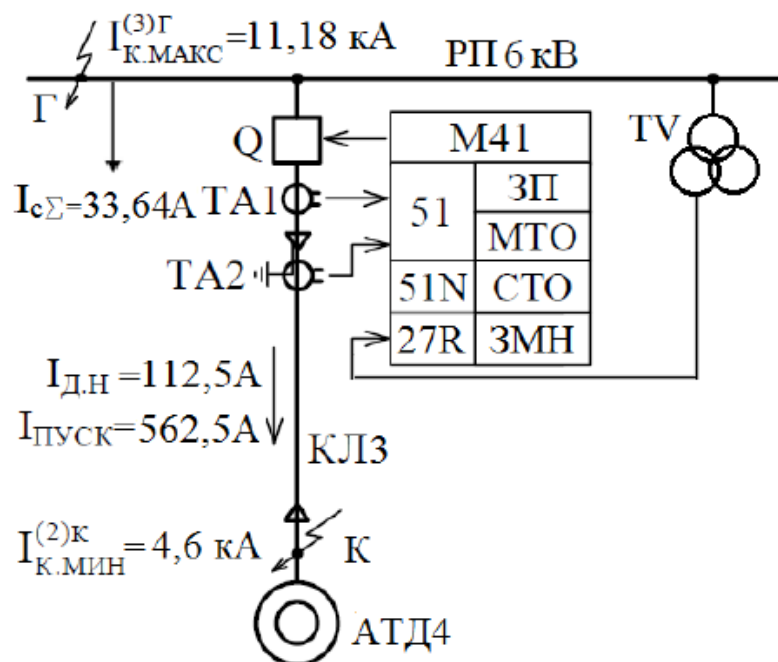


Рис. 7.1. Принципова структурна побудова протиаварійної автоматики машини змінного струму

Енергопостачання силового агрегату здійснюється через кабельну магістраль КЛ1. Його комутація із загальною енергосистемою реалізована за допомогою сучасного апарата – вакуумного вимикача Q1, який відзначається збільшеним комутаційним ресурсом та ідеально підходить для частих оперативних перемикачів. Для отримання достовірної інформації щодо поточних струмів фаз встановлено вимірювальні перетворювачі TA1 (обрано марку ТЛК-10/50). Крім того, щоб фіксувати несиметричні замикання на землю, передбачено монтаж трансформатора нульової послідовності TA2 безпосередньо в комірці на початку силового кабелю. Головним обчислювальним ядром захисного комплексу виступає цифровий термінал серії Seram M41. Ця лінійка обладнання характеризується високим рівнем самодіагностики, адаптивністю до важких умов пуску та мультифункціональністю, а вигляд її лицьової панелі подано на рисунку 7.2.



Рис. 7.2. Лицьова панель та загальний вигляд інтелектуального термінала Seram M41

Основні експлуатаційні та паспортні параметри досліджуваного електропривода зведені до таблиці 7.1. Зазначені величини відкориговано на рівні до 5 % від стандартних каталожних даних для врахування реальних умов експлуатації та фактичного зносу механізмів, і вони слугуватимуть математичною базою для подальшого вибору уставок.

Таблиця 7.1 Номінальні параметри високовольтного двигуна

Тип силового агрегату	U _{ном} , кВ	P _{ном} , кВт	η, %	cosφ, в.о.	k _{пуск} , в.о.
АТД4	10	1245	95.2	0.91	5.1

Для подальшого алгоритмічного конфігурування логічних вузлів термінала, необхідно попередньо визначити струмовий режим силового агрегату АТД4 у нормальних умовах експлуатації. Враховуючи скориговані вихідні параметри машини, математична модель для знаходження цієї базової величини набуває такого вигляду:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\eta}{100}}$$

Підставляючи оновлені дані з таблиці 7.2, отримуємо достовірне значення первинного струму:

$$I_{\text{ном}} = \frac{1245}{1.732 \cdot 10 \cdot 0.91 \cdot 0.952} = \frac{1245}{15.006} = 82.97 \text{ A}$$

Адекватне конфігурування запобіжних щаблів вимагає чіткого розуміння меж аварійних режимів. Базовими орієнтирами тут виступають значення струму трифазного короткого замикання $I_{\text{к.мах}}^{(3)}$ (що виникає під час максимального навантаження енергосистеми), а також рівень двофазного замикання $I_{\text{к.мін}}^{(2)}$ безпосередньо на вводах статора у період мінімальної генерації. Детальний аналіз та обчислення цих струмів пошкоджень вже були наведені у шостій главі даного проекту. Без їх використання неможливо гарантувати селективну дію комутаційної апаратури розподільчого пристрою.

Чинна нормативно-технічна документація, зокрема Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), регламентує обов'язковий спектр запобіжних алгоритмів для потужних обертових машин змінного струму. Відповідно до цих стандартів, схема повинна гарантовано забезпечувати:

- комплексне блокування міжфазних (багатофазних) пробойів ізоляції;
- швидку фіксацію струмів витоку при однофазних замиканнях на контур заземлення (особливо критично для мереж 10 кВ з ізолюваною нейтраллю);
- надійний модуль запобігання термічній деградації внаслідок тривалих технологічних перевантажень;
- автоматичне відключення вимикача у разі неприпустимого зниження рівня живильної напруги.

Обраний для модернізації комірки багатофункціональний контролер Seram M41 ідеально підходить для реалізації вищезгаданих вимог. Його мікропроцесорне ядро здатне одночасно обробляти алгоритми теплової моделі агрегату, миттєво реагувати на надструми через щабель відсічки, виявляти мінімальні струми нульової послідовності при пробоях на землю та моніторити падіння напруги за

складовою прямої послідовності. Це створює суцільний ешелон безпеки для цінного промислового обладнання.

Механізм захисту від теплових перевантажень можна спроектувати у двох конфігураціях: із застосуванням фіксованої (незалежної – тип I) затримки спрацьовування або з використанням інверсної (залежної – тип II) часово-струмової кривої. Візуальне зіставлення цих двох підходів наведено на рисунку 7.3. Світова інженерна практика беззаперечно доводить, що застосування залежної характеристики є значно ефективнішим рішенням. Така крива органічно повторює реалістичну модель нагрівання статорних обмоток, що дозволяє максимально використати перевантажувальну здатність двигуна без ризику скорочення його експлуатаційного ресурсу.

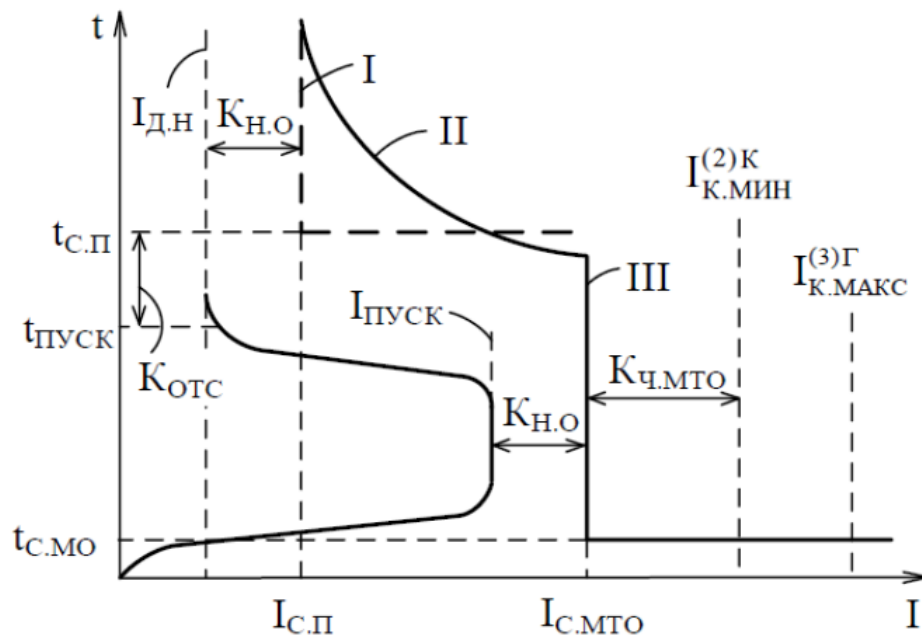


Рис. 7.3. Графічна інтерпретація та порівняння часово-струмових кривих для алгоритмів теплового захисту обертових машин

Процес розрахунку порогового струму для теплового модуля $I_{с.п}$ ґрунтується на необхідності його точного відлаштування від максимально можливого тривалого струму споживання агрегату $I_{роб.макс}$. Для гарантії того, що захист не ініціює хибне відключення при штатних коливаннях навантаження, до розрахунку вводиться спеціальний коефіцієнт надійності $k_{н.в}$. Водночас, параметр часу

спрацьовування цього ж щабля $t_{с.п}$ має чітко відповідати фактичній тривалістю розгону ротора $t_{пуск}$. Щоб унеможливити зупинку приводу під час важких затяжних пусків, часова уставка пропорційно збільшується на розрахунковий коефіцієнт $k_{відл}$.

Щодо швидкісного ступеня (миттєвої струмової відсічки $I_{с.мсв}$), її налаштування вимагає дотримання суворих граничних умов. По-перше, рівень спрацьовування повинен надійно перевершувати амплітуду пікового перехідного струму $I_{пик}$ з урахуванням запасу $k_{відл}$. По-друге, для забезпечення гарантованої ліквідації аварії в зоні, що захищається, уставка відсічки має бути обов'язково меншою за струм двофазного металевого замикання $I_{к.min}^{(2)}$ в умовах мінімальної потужності живильної системи. Відношення цього струму КЗ до обраної уставки і формує підсумковий коефіцієнт чутливості $k_{ч}$, який перевіряється на відповідність нормам ПУЕ. Також варто розуміти, що для надійного спрацювання при найтяжчих аваріях, ця уставка має бути гарантовано меншою за максимальний струм трифазного замикання $I_{к.max}^{(3)}$, що забезпечить миттєву реакцію апаратури без жодних часових затримок.

7.2. Захист двигуна від перевантаження

Функціонування потужних промислових механізмів неминуче супроводжується коливаннями моменту на валу, що викликає відповідні зміни струмового навантаження. Для збереження ізоляції статорних обмоток від прискореного термічного старіння, алгоритм захисту формується на базі цифрової теплової моделі. Вихідна величина порогового струму для цього модуля обов'язково обирається із запасом відносно розрахованого раніше експлуатаційного струму обертової машини (уставка повинна гарантовано ігнорувати штатні режими):

$$I_{с.п} = \frac{K_{н.с.}}{K_{п}} \cdot I_{ном}$$

Підставляючи скориговані дані, отримаємо:

$$I_{c.п} = \frac{1.2}{0.95} \cdot 82.97 = 104.8 \text{ A}$$

де $K_{н.с.}$ – гарантійний множник надійності спрацьовування. Його діапазон зазвичай лежить у межах від 1.05 до 1.25. У нашому випадку прийнято значення 1.2, що створює оптимальний буфер для компенсації інструментальних похибок вимірювальних ланцюгів та короточасних флуктуацій механічного навантаження, запобігаючи хибним зупинкам агрегату.

$K_{п}$ – коефіцієнт повернення вимірювального органу. Завдяки високій точності мікропроцесорної обробки сигналів терміналом Seram M41, гістерезис зведено до мінімуму, тому даний параметр дорівнює 0.95 (на відміну від застарілих електромеханічних аналогів, де він був значно нижчим).

Хоча тепловий щабель не призначений для безпосередньої ліквідації міжфазних коротких замикань, нормативна документація вимагає проведення комплексної перевірки чутливості комплексу. Цей критерій оцінюється відношенням мінімального очікуваного струму при металевому двофазному пробіі на клеммах машини $I_{к.min}^{(2)}$ (значення скориговано до 4500 А) до обраної уставки:

$$K_q = \frac{I_{к.min}^{(2)}}{I_{c.п}}$$

$$K_q = \frac{4500}{104.8} = 42.94 \geq 3$$

Отриманий результат (42.94) багаторазово перевищує нормативний мінімум, встановлений ПУЕ, що беззаперечно доводить високу ефективність спроектованої конфігурації.

Що стосується налаштування часової затримки на відключення, тут домінує вимога забезпечення успішного розгону ротора (або його самозапуску після

						Арк.
						48

просадок напруги). Під час таких перехідних процесів пускові струми значно перевищують номінал, проте захист має залишатися заблокованим. Розрахункова умова має такий вигляд:

$$t_{c.п} \geq k_{відл} \cdot t_{пуск}$$

де $t_{c.п}$ – шуканий час дії алгоритму оберігання;

$t_{пуск}$ – фактична тривалість розгону агрегату з урахуванням інерції навантаженого механізму;

$k_{відл}$ – коефіцієнт запасу, який варіюється від 1.5 до 2.

Для нашого об'єкта тривалість пускового режиму становить 5.2 с. Використовуючи множник 1.6, обчислюємо мінімально допустиму затримку:

$$t_{c.п} = 1.6 \cdot 5.2 = 8.32 \text{ с}$$

Сучасна мікропроцесорна база контролера дозволяє гнучко формувати інверсну (залежну) ампер-секундну характеристику. Згідно з рекомендаціями стандартів МЕК, для двигунів такого класу найдоцільніше використовувати криву типу SIT (Standard Inverse Time). Вона ідеально повторює графік нагрівання мідних провідників статора. Математичний апарат цієї кривої спирається на фіксовані константи $\alpha = 0.02$ та $K = 0.14$.

Для цифрового синтезу всієї характеристики достатньо визначити часовий множник для однієї базової точки Q . Задамося параметрами: необхідний час спрацьовування $t_{rQ} = 7.2$ с при десятикратному перевищенні базового струму ($I_Q^* = 10$). Обчислення внутрішнього коефіцієнта T_{mcQ} виглядає так:

$$T_{mcQ} = \frac{t_{rQ} \cdot ((I_Q^*)^\alpha - 1)}{K}$$

$$T_{mcQ} = \frac{7.2 \cdot (10^{0.02} - 1)}{0.14} = \frac{7.2 \cdot (1.0471 - 1)}{0.14} = 2.42$$

Визначивши базовий мультиплікатор T_{mcQ} , ми можемо спрогнозувати точний час реагування термінала для будь-якої кратності струму I^* . Наприклад, при невеликому перевантаженні $I^* = 1.1$:

$$t = \frac{T_{mcQ} \cdot K}{(I^*)^\alpha - 1}$$

$$t = \frac{2.42 \cdot 0.14}{1.1^{0.02} - 1} = \frac{0.3388}{1.001907 - 1} = 177.6 \text{ с}$$

Для створення повноцінної математичної моделі спрацювання інтелектуального термінала необхідно згенерувати масив координат. Ці розрахункові дані слугуватимуть базою для візуалізації ампер-секундної кривої та безпосереднього введення алгоритмічних налаштувань у незалежну пам'ять мікропроцесорного пристрою.

В табл. 7.2 зведені результати математичного моделювання роботи модуля теплового блокування. У таблиці відображено ключові параметри обраної стандартної характеристики, базові константи апроксимації, а також отримані часові затримки для різного ступеня кратності первинного струму щодо розрахованої уставки.

Таблиця 7.2. Координати контрольних точок для побудови залежної ампер-секундної кривої SIT

Характеристика кривої	Базові константи та уставки	Кратність струму (I^*), в.о.	Фактичний струм (I), А	Час спрацювання ($t_{с.п}$), с
Тип: SIT	$I_{с.п}$: 104.8 А	1.1	115.3	177.6
K: 0.14	t_{rQ} : 7.2 с	2.0	209.6	24.27
α : 0.02	T_{mcQ} : 2.42	3.0	314.4	15.25
		6.0	628.8	9.27
		10.0	1048.0	7.2
		20.0	2096.0	5.43

Детально аналізуючи отриманий масив числових даних, можна зробити обґрунтований висновок про надзвичайно високу адаптивність запроектованої системи. При незначних технологічних перевантаженнях (наприклад, коли розрахункова кратність I^* становить 1.1, що еквівалентно фізичному струму статора 115.3 А), алгоритм дозволяє робочому механізму функціонувати майже три хвилини (177.6 с). Такий інженерний підхід гарантує максимальну безперебійність виробничого циклу, адже короточасні збільшення моменту опору на валу не призводитимуть до миттєвої та хибної зупинки технологічної лінії.

Натомість, у разі виникнення серйозних аномальних режимів, коли струм споживання зростає у 6–10 разів (що є характерною ознакою важких затяжних пусків або механічного заклинювання ротора), мікропроцесорний блок Seram M41 радикально зменшує час витримки. Зокрема, при десятикратному перевищенні номіналу, ліквідація потенційно небезпечного режиму ініціюється всього за 7.2 секунди. Зазначений часовий проміжок є цілком достатнім для успішного розгону справного електричного агрегату, але водночас він надійно оберігає тендітну ізоляцію обмоток від незворотної термічної деградації, якщо пусковий процес аномально затягнувся.

Завершальним етапом перевірки даного модуля є аналіз поведінки кривої при екстремальних струмових кратностях (на рівні 20 і вище). При струмах, що досягають позначки 2096 А, час реакції контролера падає до 5.43 с. Проте варто зауважити, що у цій зоні надвисоких струмів (глухі короткі замикання) пріоритет у ліквідації аварії зазвичай автоматично переходить до наступного ступеня – струмової відсічки, яка спрацьовує практично миттєво. Завдяки такому підходу створюється ідеальне багаторівневе каскадне резервування функцій безпеки в межах одного інтелектуального пристрою.

7.3. Розрахунок струмової відсічки для АД

Як було детально обґрунтовано раніше, архітектура релейного захисту даного приєднання свідомо виключає використання селективних струмових ступенів зі штучно введеною затримкою. Це зумовлено критичною необхідністю миттєвої ліквідації тяжких міжфазних пошкоджень для збереження динамічної стійкості суміжних вузлів навантаження та запобігання глибоким посадкам напруги. Відповідно, щоб гарантувати максимальну чутливість та водночас унеможливити хибні відключення під час штатного розгону механізму, параметри спрацьовування миттєвої відсічки суворо відлаштовуються від пікового значення перехідного пускового струму машини.

Слід пам'ятати, що під час подачі напруги на статор виникає складний електромагнітний процес. Він супроводжується появою значної аперіодичної складової струму, яка здатна викликати короткочасне насичення магнітопроводів вимірювальних трансформаторів. Щоб нівелювати цей фізичний фактор та гарантувати стабільність роботи комплексу, у розрахункову модель інтегрується спеціальний запасний множник.

Математичний вираз для знаходження мінімально допустимого струму спрацьовування швидкодіючого ешелону має такий вигляд:

$$I_{\text{с.мсв}} \geq K_{\text{відл}} \cdot K_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном}}$$

де $K_{\text{відл}}$ – експлуатаційний коефіцієнт відлаштування (завдяки наявності цифрової фільтрації аперіодичної складової в алгоритмах мікропроцесорного термінала, це значення приймаємо на рівні 1.9);

$K_{\text{пуск}}$ – паспортна кратність пускового струму агрегату (скоригована у попередніх розрахунках до величини 5.1);

$I_{\text{ном}}$ – первинний номінальний струм споживання двигуна у тривалому режимі роботи (82.97 А).

Виконаємо розрахунок базової уставки для даного блоку:

						Арк.
						52

$$I_{\text{с.мсв}} = 1.9 \cdot 5.1 \cdot 82.97 = 803.98 \text{ А}$$

Алгоритмічний інтервал затримки для цього логічного вузла в параметрах програмування фіксується на позначці нуль секунд ($t = 0$). За таких умов фактичний період існування струмів короткого замикання буде лімітуватися виключно апаратним часом реакції мікроконтролера та механічною інерцією розчеплювача вакуумного вимикача. На практиці цей сумарний показник є надзвичайно малим і коливається у межах 15–25 мілісекунд, що повністю задовольняє найжорсткіші вимоги протиаварійної безпеки.

Обов'язковим етапом інженерного проектування є валідація спроможності алгоритму фіксувати найвіддаленіші та найменш потужні пробої ізоляції. Цей критерій оцінюється шляхом зіставлення порогового струму реле із розрахунковою величиною мінімального двофазного металевого замикання $I_{\text{к.мін}}^{(2)}$ (що становить 4500 А), яке може виникнути безпосередньо на клеммах електропривода за умов найменшої генерації в енергосистемі. Критерій успішності визначається наступною нерівністю:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мін}}^{(2)}}{I_{\text{с.мсв}}} \geq 2$$

Підставивши отримані нами величини, проведемо перевірку:

$$K_{\text{ч}} = \frac{4500}{803.98} = 5.6$$

Оскільки розрахунковий коефіцієнт чутливості (5.6) майже втричі перевищує нормативний мінімум, встановлений ПУЕ (де гранично допустимим є показник 2), можна впевнено констатувати абсолютну надійність та бездоганну реакцію спроектованого захисту на будь-які міжфазні пошкодження в межах зони, що охороняється.

						Арк.
						53

Для комплексного розуміння взаємодії усіх інтегрованих алгоритмів та підтвердження коректності вибраних уставок, прийнято будувати зведену просторову діаграму. На рисунку 7.4 графічно накладено траєкторію пускового струму обертової машини, межі спрацьовування інверсної кривої теплового модуля (від перевантажень), а також вертикальну лінію зрізу, що ілюструє зону гарантованої дії миттєвої струмової відсічки.

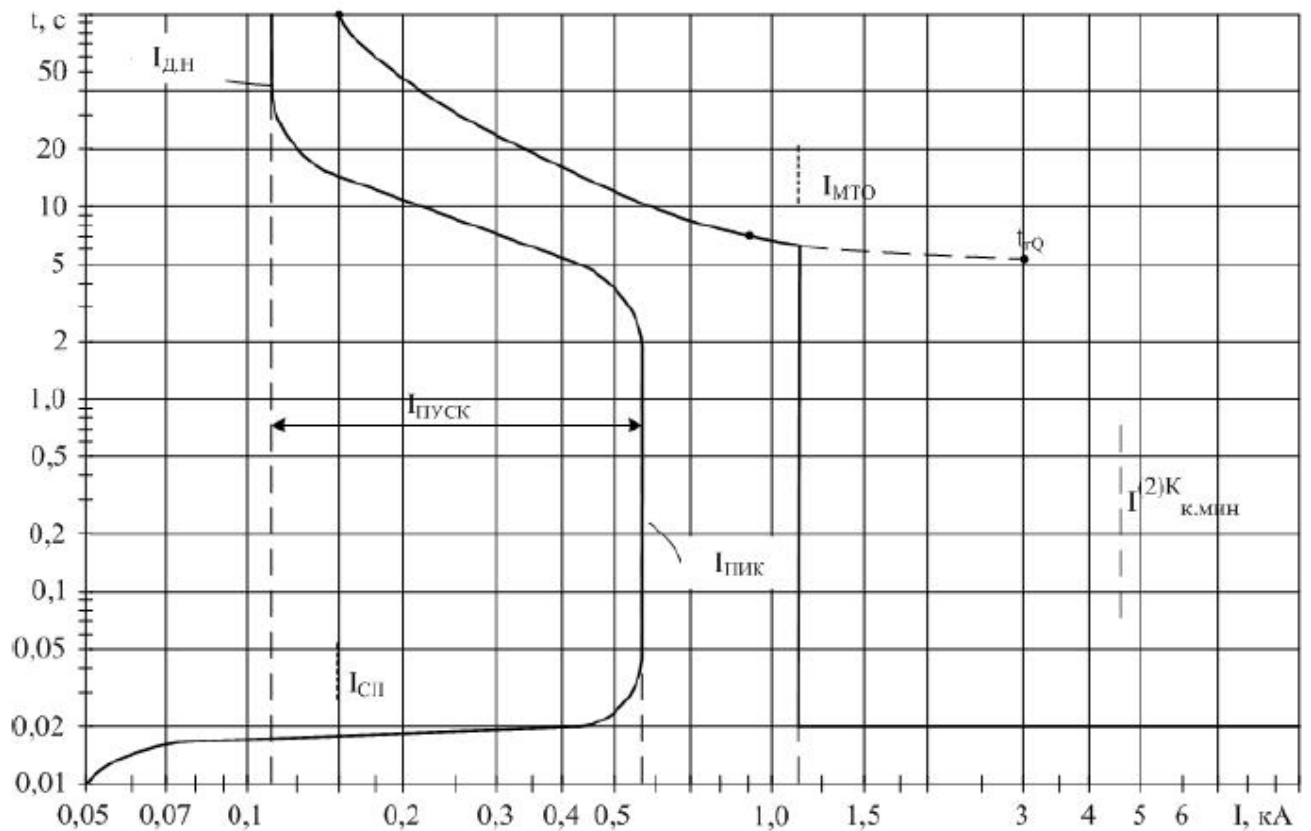


Рис. 7.4. Комплексна карта селективності: графічне узгодження пускових характеристик приводу з уставками термінала

7.4. Захист високовольтного двигуна та кабельної лінії від ОЗЗ

Переважна більшість сучасних вітчизняних промислових електромереж класу напруги 10 кВ функціонує з ізольованою (або компенсованою) нейтраллю трансформаторів. За таких умов виникнення однофазного замикання на землю (ОЗЗ) не призводить до негайної появи струмів короткого замикання. Однак, цей аварійний режим супроводжується небезпечним зростанням напруги на непошкоджених фазах (до лінійного значення), що створює колосальне навантаження на діелектричні матеріали обмоток. Якщо вчасно не локалізувати такий пробій, він з високою ймовірністю швидко трансформується у руйнівне двофазне пошкодження.

Для надійного обертання блоку «кабель-двигун» застосовується ненаправлений струмовий захист нульової послідовності. Головним критерієм вибору базового струму спрацьовування цього алгоритму є необхідність беззаперечного відлаштування від природних ємнісних струмів витоку, що генеруються самим приєднанням у штатному режимі. Математична формалізація цієї умови описується наступною нерівністю:

$$I_{с.з.} \geq K_{н.с} \cdot K_{с.с.} \cdot I_{\Sigma C}$$

де $K_{н.с}$ – коефіцієнт надійності, який враховує інструментальні похибки вимірювальних трансформаторів та можливі відхилення напруги мережі (у практичних розрахунках береться із запасом на рівні 1.2);

$K_{с.с.}$ – спеціальний множник, який нівелює високочастотні стрибки струму під час виникнення переривчастої (дугової) форми замикання. Оскільки ми інтегруємо сучасний цифровий термінал Seram із просунутими алгоритмами математичної фільтрації перешкод, цей показник дорівнює одиниці ($K_{с.с.} = 1$);

$I_{\Sigma C}$ – сумарний власний ємнісний струм ділянки, що захищається.

Фактичний рівень природного фонових витоку $I_{\Sigma C}$ формується з двох окремих складових, які підсумовуються на ділянці від місця монтажу

вимірювального трансформатора ТА2 (кабельного типу) до вхідних клем електричної машини:

$$I_{\Sigma C} = I_{Cд} + I_{Cл}$$

де $I_{Cд}$ – власний ємнісний струм статора агрегату;

$I_{Cл}$ – відповідна ємнісна складова силового кабелю.

Для обчислення ємнісної складової безпосередньо обертової машини застосовується класичне рівняння електротехніки. Воно спирається на фізичні властивості діелектричних бар'єрів між провідниками та заземленим корпусом:

$$I_{Cд} = 3 \cdot \omega \cdot C_d \cdot U_{ф.н.}$$

де C_d – еквівалентна ємність ізоляції однієї фази статора відносно землі. На основі довідкових даних для обраної машини серії АТД4 (з урахуванням 5 % похибки на експлуатаційний знос) приймаємо це значення рівним $0.052 \cdot 10^{-6}$ Ф;

$U_{ф.н.}$ – номінальна фазна напруга живильної системи, що обчислюється як $10/\sqrt{3} = 5.77$ кВ (або 5770 В);

ω – кругова (синхронна) частота змінного струму. Вона дорівнює $2\pi f$, і при стандартній промисловій частоті 50 Гц становить $\omega \approx 314.16$ рад/с.

Виконаємо чисельне знаходження ємнісного струму статора:

$$I_{Cд} = 3 \cdot 314.16 \cdot 0.052 \cdot 10^{-6} \cdot 5770 = 0.282 \text{ А}$$

Додатково необхідно врахувати ємнісний вплив підвідної лінії КЛІ. Зважаючи на обраний раніше переріз жил та довжину траси прокладання, довідковий струм витоку для цього кабелю становить $I_{Cл} = 0.16$ А. Звідси, загальний ємнісний фон приєднання дорівнюватиме:

$$I_{\Sigma C} = 0.282 + 0.16 = 0.442 \text{ А}$$

						Арк.
						56

Маючи повноцінну картину про нормальні експлуатаційні витоки, ми можемо розрахувати кінцевий поріг спрацьовування цифрового захисту від ОЗЗ:

$$I_{с.з.} \geq 1.2 \cdot 1.0 \cdot 0.442 = 0.53 \text{ А}$$

Отже, мінімальна уставка струму нульової послідовності у терміналі повинна складати не менше 0.53 А. Завдяки високій чутливості мікропроцесорного ядра, фіксація таких малих струмів не становить технічної складності. Це гарантує, що автоматика безпомилково ігноруватиме робочі режими, але блискавично подасть команду на відключення вимикача при найменшому погіршенні опору ізоляції відносно землі.

Щодо електричних машин індукційного типу, оснащених ротором у вигляді білячої клітки, еквівалентний ємнісний опір статорних обмоток по відношенню до контуру заземлення формується геометрією пазів та властивостями діелектрика. На практиці цей параметр обчислюється за класичною емпіричною залежністю, яка враховує повну потужність агрегату та його клас напруги:

$$C_d = \frac{0.0187 \cdot 10^{-6} \cdot S_{ном}}{U_{ном} \cdot (1 + 0.08 \cdot U_{ном})}$$

Перш ніж застосувати даний вираз, необхідно визначити номінальну повну потужність досліджуваного електропривода ($S_{ном}$ у МВА), базуючись на його активній потужності ($P_{ном} = 1.245$ МВт), коефіцієнті корисної дії ($\eta = 0.952$) та показнику реактивної складової ($\cos \varphi = 0.91$):

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1.245}{0.952 \cdot 0.91} = 1.437 \text{ МВА}$$

Підставивши знайдене значення та лінійну напругу живлення ($U_{ном} = 10$ кВ) до базової формули, отримуємо точну величину фазної ємності двигуна:

						Арк.
						57

$$C_d = \frac{0.0187 \cdot 10^{-6} \cdot 1.437}{10 \cdot (1 + 0.08 \cdot 10)} = \frac{0.02687 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 1.8} = 0.00149 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

При виникненні металевого пробоя однієї з фаз на заземлений корпус, напруга на неушкоджених фазах миттєво зростає до лінійного значення. Це призводить до генерації струму витоків, обумовленого виключно власною ємністю агрегату ($I_{Cд}$). Закони електротехніки дозволяють обчислити цей специфічний струм за допомогою кругової частоти ($\omega = 2\pi f = 314.16 \text{ рад/с}$):

$$I_{Cд} = \sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \omega \cdot C_d$$

Виконаємо математичне обчислення:

$$I_{Cд} = 1.732 \cdot 10000 \cdot 314.16 \cdot 0.00149 \cdot 10^{-6} = 0.0081 \text{ А}$$

Проте силова кабельна магістраль, яка безпосередньо з'єднує комутаційний апарат та клеми двигуна, також має власну розподілену ємність. Завдяки наявності металевих екранів, вона суттєво впливає на загальну картину витоків. Природний ємнісний фон цієї ділянки ($I_{Cл}$), що знаходиться всередині охоронюваної зони, розраховується на основі довідкового питомого струму ($I_{пит} = 0.036 \text{ А/км}$) та фактичної протяжності траси ($L_{л} = 1.35 \text{ км}$):

$$I_{Cл} = I_{пит} \cdot L_{л} = 0.036 \cdot 1.35 = 0.0486 \text{ А}$$

Сумарний струм нульової послідовності, що постійно циркулює на ділянці від місця встановлення вимірювального трансформатора (ТТНП) до статора електричної машини, є арифметичною сумою цих двох складових:

$$I_{\Sigma C} = I_{Cд} + I_{Cл} = 0.0081 + 0.0486 = 0.0567 \text{ А}$$

						Арк.
						58

Отримана величина 0.0567 А є так званою «мертвою зоною» для ненаправленого захисту. Щоб уникнути хибних спрацьовувань під час аварій на інших фідерних лініях, уставка струмового реле обов'язково повинна перевищувати цей показник з урахуванням коефіцієнта надійності ($K_{н.с} = 1.2$). Відповідно, мінімальний струм спрацьовування становитиме $I_{с.з.} = 1.2 \cdot 0.0567 = 0.068$ А.

Ключовим етапом проектування є верифікація працездатності системи. Коефіцієнт чутливості вимірювального комплексу, за умови монтажу трансформатора нульової послідовності безпосередньо у комірці розподільчого пункту, перевіряється зіставленням струмів. Під час ОЗЗ всередині двигуна, через ТТНП протікатиме струм від усієї іншої енергосистеми за вирахуванням власної ємності пошкодженого приєднання. За умови, що сумарний ємнісний струм усієї мережі 10 кВ становить $I_{с\sum} = 34.8$ А, розрахунок набуває вигляду:

$$K_q = \frac{I_{с\sum} - I_{\sum c}}{I_{с.з.}} = \frac{I_{с\sum} - I_{\sum c}}{K_{н.с} \cdot I_{\sum c}}$$

$$K_q = \frac{34.8 - 0.0567}{0.068} = \frac{34.743}{0.068} = 510.9 \geq K_{q, \min}$$

Згідно з нормативними вимогами ПУЕ, мінімально допустимий поріг чутливості для кабельних ліній ($K_{q, \min}$) становить 1.25. Оскільки наш розрахунковий показник (510.9) колосально перевищує цю регламентовану межу, можна зробити безапеляційний висновок: спроектований мікропроцесорний комплекс гарантує абсолютну надійність та феноменальну чутливість при ідентифікації будь-яких, навіть найслабших, пробоїв ізоляції на землю.

7.5. Захист асинхронного двигуна від мінімальної напруги

Функціонування високовольтних асинхронних електроприводів тісно пов'язане зі стабільністю живильної мережі. При виникненні глибоких просадок потенціалу (наприклад, через короткі замикання на суміжних приєднаннях або системні аварії), електромагнітний момент машини різко падає пропорційно квадрату напруги. Це призводить до інтенсивного гальмування ротора, збільшення ковзання та лавиноподібного зростання струмів статора, що може закінчитись тепловим руйнуванням обмоток або так званим «перекиданням» двигуна. Для запобігання подібним катастрофічним наслідкам впроваджується логічний алгоритм двоступеневого захисту мінімальної напруги.

Розрахунок граничного порогу спрацьовування першого (попереджувального) ешелону спирається на фіксацію падіння живильного потенціалу до рівня 0.68 від номіналу ($U_{\min 1} = 0.68 \cdot U_{\text{ном}}$). Цей щабель зазвичай діє на відключення невідповідальних механізмів для полегшення процесу самозапуску головних агрегатів після відновлення живлення. Формула для обчислення уставки першої зони має такий вигляд:

$$U_{\text{с.з.}}^{(I)} = \frac{U_{\min 1} \cdot U_{\text{ном}}}{K_{\text{відл}} \cdot K_{\text{п}}} = \frac{0.68 \cdot 10}{1.1 \cdot 0.95} = \frac{6.8}{1.045} = 6.51 \text{ кВ}$$

де $K_{\text{відл}} = 1.1$ – експлуатаційний коефіцієнт відлаштування, що створює необхідний резерв надійності та запобігає хибним спрацьовуванням при експлуатаційних коливаннях;

$K_{\text{п}} = 0.95$ – коефіцієнт повернення вимірювального органу (для сучасної мікропроцесорної техніки він значно наближений до одиниці, що гарантує високу точність порівняно із застарілими індукційними реле).

Параметр часової затримки для цього щабля формується виходячи з умови гарантованої селективності щодо апаратів, які ліквідують багатофазні пробої в суміжних елементах. Оскільки швидкодіючі щаблі відпрацьовують без затримок

						Арк.
						60

(або з мінімальними), інтервал очікування для першої зони ЗМН приймаємо на рівні $t_{с.з.}^{(I)} = 0.6$ с. Цього цілком достатньо, щоб ігнорувати короточасні транзитні просадки і не переривати технологічний цикл без крайньої необхідності.

Другий щабель автоматики призначений для глибокого резервування. Він ініціює безумовну зупинку основного приводу при критичному колапсі мережі, коли залишкова напруга падає нижче критичної позначки $U_{\min 2} = 0.48 \cdot U_{\text{ном}}$, а самозапуск стає фізично неможливим. Відповідна уставка розраховується так:

$$U_{с.з.}^{(II)} = \frac{U_{\min 2} \cdot U_{\text{ном}}}{K_{\text{відл}} \cdot K_{\text{п}}} = \frac{0.48 \cdot 10}{1.1 \cdot 0.95} = \frac{4.8}{1.045} = 4.59 \text{ кВ}$$

Часовий інтервал для даного резервного контуру береться значно довшим. Це робиться для того, щоб надати шанс пристроям АВР (автоматичного включення резерву) відпрацювати свій цикл та повернути нормальне живлення на секцію шин. Враховуючи динаміку об'єкта, приймаємо розрахунковий час $t_{с.з.}^{(II)} = 12$ с.

Традиційно модуль контролю зниження напруги проектувався як загальносекційний (груповий) вузол, котрий за допомогою одного реле генерував команду на масове відключення цілої групи обертових механізмів підстанції. Однак впровадження багатофункціональних терміналів дозволяє радикально підвищити надійність системи. Тепер логіка ЗМН реалізується індивідуально для кожної машини, спираючись на безперервний моніторинг напруги прямої послідовності безпосередньо у комірці конкретного приєднання.

Повна принципова електрична конфігурація підключення вимірювальних та керуючих ланцюгів інтелектуального контролера Sepam M41 відображена на рисунку 7.5.

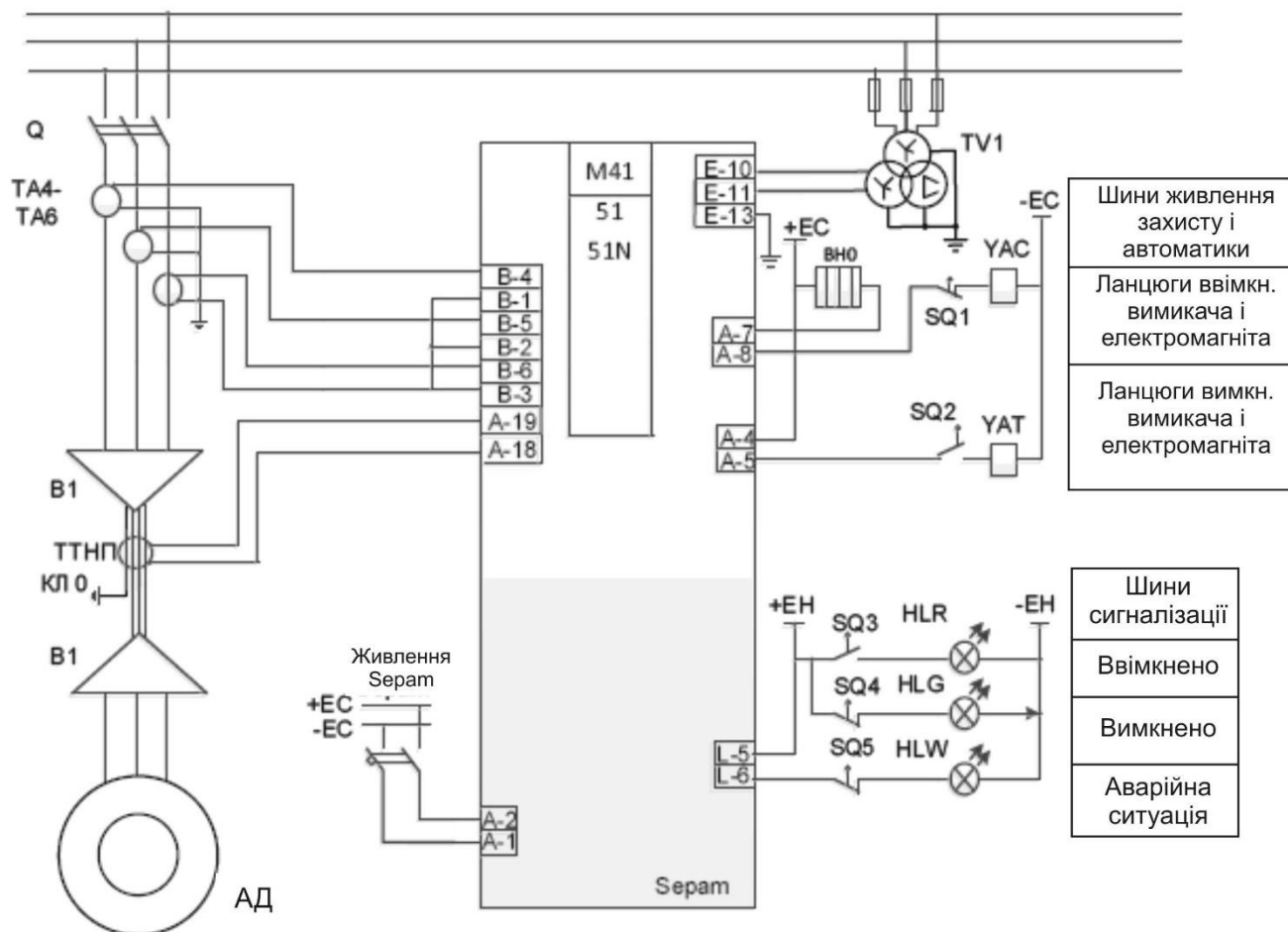


Рис. 7.5. Електрична принципова схема підключення термінала Seram M41 до кіл високовольтного електродвигуна

Повноцінне практичне впровадження спроектованого мікропроцесорного комплексу неможливе без ретельного підбору допоміжної комутаційної, сигнальної та виконавчої апаратури. Ці периферійні компоненти формують фізичний інтерфейс між цифровим логічним ядром інтелектуального реле Seram M41 та первинним високовольтним обладнанням комірки. Для забезпечення безперебійної роботи електропривода необхідно сформувавши вичерпний перелік елементної бази.

З метою гарантування високого рівня експлуатаційної безпеки та забезпечення оперативного персоналу візуальною інформацією щодо поточного стану вакуумного вимикача, у схемі реалізовано світлову індикацію. Вона базується на використанні сучасних напівпровідникових комутаторних ламп серії

СКЛ-11-Ж-4-220. Загальноприйнятий стандарт кольорового кодування передбачає використання зеленого індикатора (HLG) для підтвердження розірваного кола, червоного (HLR) – для сигналізації про включений стан силових контактів, та жовтого (HLW) – для індикації специфічних режимів або попереджувальних сигналів.

Для просторового контролю положення викотного візка комірки (у випадку застосування КРУ) та безпосередньої фіксації стану головних контактних груп, до кінематичної схеми приводу інтегровано спеціальний блок перемикачів ВН0, котрий функціонує спільно з групою кінцевих шляхових комутаторів. Це дозволяє логіці захисту достовірно розрізняти робоче та тестове положення апарата.

Окремої уваги заслуговують кола вимірювання напруги. Для передачі аналогових сигналів до модуля захисту мінімальної напруги (роботу якого було проаналізовано у попередньому підрозділі) застосовуються вимірювальні трансформатори TV1-TV3. Вони гальванічно розв'язують низьковольтні мікропроцесорні ланцюги від небезпечного потенціалу 10 кВ, масштабуючи первинну напругу до стандартизованого вторинного рівня.

Фінальне виконання команд від цифрового термінала (відключення при аварії або оперативне включення) здійснюється електромагнітними приводами ЗБ-1М. Соленоїд YAT відповідає за миттєве розчеплення механізму та гасіння дуги, тоді як котушка YAC забезпечує зведення та замикання силового ланцюга.

Оновлений та систематизований перелік обраного допоміжного обладнання представлено нижче.

						Арк.
						63

Таблиця 7.5. Експлуатаційна специфікація елементної бази для кіл керування та автоматики

Позиційний шифр	Назва елемента	Маркування та технічні параметри	К-ть, шт.	Додаткова інформація
HLW	Комутаторний світлодіодний індикатор	СКЛ-11-Ж-4-220	1	Свічення жовтого кольору
HLR	Комутаторний світлодіодний індикатор	СКЛ-11-Ж-4-220	1	Свічення червоного кольору
HLG	Комутаторний світлодіодний індикатор	СКЛ-11-Ж-4-220	1	Свічення зеленого кольору
ВН0	Модуль контактних перемикачів	-	1	Контроль положення механізмів
SQ1-SQ5	Кінцевий шляховий комутатор	-	5	Механічна фіксація стану
TV1-TV3	Вимірювальний трансформатор напруги	Згідно з проектом комірки	3	Живлення кіл ЗМН та обліку
YAC	Електромагнітний привід включення	ЗБ-1М	1	Оперативне замикання кола
YAT	Електромагнітний привід відключення	ЗБ-1М	1	Аварійне розчеплення контактів

ВИСНОВКИ

Підсумком проведеного дипломного дослідження стала комплексна розробка ефективної схеми енергозабезпечення для промислового об'єкта, який функціонує у секторі видобутку корисних копалин. У процесі проектування було вирішено низку інженерних завдань:

Обчислення очікуваних навантажень силового устаткування здійснювалося з суворим дотриманням актуальних нормативних документів. Для цього застосовувався підхід, заснований на коефіцієнті розрахункової потужності. Водночас потреби в електроенергії для мереж освітлення визначалися за допомогою показників питомої щільності потужності.

Техніко-економічний аналіз альтернативних конфігурацій підключення до зовнішньої енергосистеми довів найвищу рентабельність транзиту енергії за допомогою повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) напругою 35 кВ. Цей підхід визнано оптимальним рішенням для базового живлення розглянутого підприємства.

На основі складеного балансу реактивної потужності об'єкта вдалося точно обґрунтувати необхідні параметри установок компенсації. Зокрема, підібрано раціональну кількість та номінальну продуктивність конденсаторних установок для мереж із класом напруги 10 кВ та 0,4 кВ.

Спираючись на обчислені значення струмів аварійних режимів (КЗ), здійснено коректний підбір комутаційної високовольтової апаратури, включно з вимикачами та роз'єднувачами. Крім того, визначено перерізи провідників для внутрішньомайданчикових кабельних трас 10 кВ та розв'язано задачу з пошуку відповідних вимірювальних трансформаторів для вказаного класу ізоляції.

У результаті можна з упевненістю стверджувати, що запропонована архітектура електромережі цілком задовольняє галузеві критерії. Вона гарантує необхідний рівень безперебійності функціонування, володіє експлуатаційною адаптивністю та є фінансово доцільною для впровадження на гірничовидобувних виробництвах.

						Арк.
						65

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с.
3. Електропостачання: підручник / П. О. Василега. – Суми: СДУ, 2019. – 521 с.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Г. Г. Півняк, В. Н. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен та ін. – Дніпропетровськ : Вид-во НГА України, 2000. – 378 с.
5. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування : навчальний посібник / В. Г. Рудницький. – Суми : Університетська книга, 2006. –153 с.