

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 скляної промисловості»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–22,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

Ярослав КИБУКЕВИЧ

«___» _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

Василь ЗІНЗНУРА

«___» _____ 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

Кибукевича Ярослава Петровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства скляної промисловості

Design of a power supply system for a glass industry enterprise

2. Керівник роботи Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук, доцент

(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 скляної 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 _____

Василь ЗІНЗУРА

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Ярослав КИБУКЕВИЧ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 76 с.; 10 рис.; 27 табл.; 5 джерел

Кибукевич Я.П. Проектування системи електропостачання підприємства скляної промисловості. – Рукопис.

Бакалаврська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Дана робота фокусується на створенні надійного комплексу забезпечення електроенергією підприємства скляної промисловості. Під час дослідження було здійснено обчислення очікуваного енергоспоживання, проаналізовано баланс і компенсацію реактивної складової, а також змодельовано струми аварійних замикань. На базі цих даних обґрунтовано оптимальні конфігурації внутрішньоцехових і зовнішніх мереж, здійснено підбір відповідного високовольтного устаткування.

Окрему увагу в дослідженні приділено проектуванню комплексу автоматичного відключення пошкоджень. Ця частина охоплює забезпечення живильної кабельної магістралі напругою 10 кВ і знижувального силового апарата ТМ-1000/10. Основним керуючим пристроєм для їхньої безпечної експлуатації обрано сучасний цифровий термінал серії Seram 20, розроблений корпорацією Schneider Electric.

Ключові слова: електричні навантаження, компенсація реактивної потужності, струми коротких замикань, релейний захист.

ABSTRACT

Qualification work: 76 p.; 10 Fig.; 27 tables; 5 sources

Kybukeych Y. Design of a power supply system for a glass industry 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.

This work focuses on the creation of a reliable complex for providing electricity to a glass industry enterprise. During the study, the expected energy consumption was calculated, the balance and compensation of the reactive component were analyzed, and emergency short-circuit currents were simulated. Based on this data, the optimal configurations of internal and external networks were substantiated, and the appropriate high-voltage equipment was selected.

Special attention in the study was paid to the design of an automatic fault disconnection complex. This part covers the protection of a 10 kV supply cable line and a TM-1000/10 step-down power device. The main control device for their safe operation was a modern digital terminal of the Sepam 20 series, developed by Schneider Electric.

Keywords: electrical loads, reactive power compensation, short-circuit currents, relay protection.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	10
1.1 Розрахунок силових навантажень в мережі до 1 кВ	10
1.2 Розрахунок електричних освітлювальних навантажень	11
1.3 Розрахунок електричних навантажень напругою вище 1000 В	12
1.4 Графіки електричних навантажень	16
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	20
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	22
3.1 Вибір схеми зовнішнього електропостачання	22
3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання	24
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	26
4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності	26
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв.....	27
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	30
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	31
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	31
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ	38
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....	41
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	42
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ТЕРМІНАЛІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ БЛОКУ «ЛІНІЯ-ТРАНСФОРМАТОР».....	43
7.1 Базові принципи побудови захисних комплексів.....	43
7.2 7.2 Організація релейного захисту силового трансформатора	50
7.2.1. Алгоритм захисту силового трансформатора від струмів перевантаження.....	51
7.2.2. Розрахунок селективної струмової відсічки	58
7.2.3. Розрахунок миттєвої струмової відсічки.....	60
7.2.4. Газовий захист силового трансформатора	63

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Кибукевич Я.П.			Проектування системи електропостачання підприємства скляної промисловості Design of a power supply system for a glass industry enterprise	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		Зінзура В.В.					6	76
						ЦНТУ зр. ЕЕ-20-ЗСК		
Н. контр.								
Затвер.		Плешков П.Г.						

ВСТУП

Даний кваліфікаційний проєкт фокусується на проєктуванні високонадійної інфраструктури живлення для підприємства скляної промисловості. В умовах сучасної індустріалізації проблематика якісного енергозабезпечення виробничих об'єктів набуває першочергового стратегічного значення. Електрична енергія виступає базовим ресурсом для коректної роботи складних технологічних ліній, тому стабільність параметрів мережі безпосередньо впливає на загальну рентабельність та обсяги випуску готової продукції.

Ключовим фактором при проектуванні є гарантування абсолютної безперервності подачі напруги. Для заводів із виробництва скла це має критичний характер: раптове знеструмлення скловарних печей (які традиційно належать до споживачів першої категорії надійності) викликає незворотне застигання скломаси. Такі аварії призводять до колосальних збитків, руйнування дороговартісного устаткування та надзвичайно тривалого простою. Відповідно, будь-які збої в електромережі здатні завдати нищівного удару по фінансовому стану компанії та послабити її конкурентні позиції на ринку.

Головна ціль цього дослідження полягає у створенні комплексної, економічно доцільної та безпечної схеми енергозабезпечення вказаного промислового об'єкта.

Щоб реалізувати поставлену мету, необхідно виконати такий комплекс інженерних та аналітичних кроків:

1. Обчислення очікуваних споживаних потужностей: детальний аналіз приймачів цехів для точної оцінки сумарної потреби підприємства в електроенергії.
2. Побудова картограми навантажень: графічне визначення умовного центру електричних мас, що дозволить знайти найбільш вигідне просторове розташування головної знижувальної підстанції (ГЗП) з метою мінімізації втрат у кабелях.

3. Техніко-економічне обґрунтування мереж: вибір найкращої конфігурації підключення до районної енергосистеми (зовнішній контур) та розподілу струму безпосередньо територією заводу (внутрішній контур).

4. Оптимізація балансу реактивної енергії: розрахунок необхідної ємності конденсаторних установок для підвищення загального коефіцієнта потужності ($\cos(\varphi)$) і розвантаження живильних ліній.

5. Вибір силового обладнання підстанцій: визначення точної кількості та номінальної потужності знижувальних трансформаторів з обов'язковим урахуванням можливості їх взаємного резервування під час аварій.

6. Аналіз аварійних режимів: математичне моделювання струмів коротких замикань у різних вузлах мережі для подальшої перевірки обраних високовольтних апаратів на термічну та динамічну стійкість.

7. Розробка спецрозділу з автоматизації: проєктування сучасного комплексу релейного захисту для зв'язки «живильна магістраль – силовий трансформатор» (клас напруг 10/0,4 кВ), що гарантуватиме миттєве відключення пошкоджених ділянок.

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Розрахунок силових навантажень в мережі до 1 кВ

Продемонструємо типовий алгоритм знаходження розрахункових величин струмоприймачів на базі ділянки механічної обробки.

$$m = \frac{P_{н.мах}}{P_{н.мін}} = \frac{100}{5} = 20$$

$$P_{см} = P_{сум} \cdot K_B = 2226,4 \cdot 0,25 = 556,6 \text{ кВт}$$

$$Q_{\{см\}} = P_{\{см\}} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 556,6 \cdot 0,88 = 490,87 \text{ кВар}$$

$$n_e = \frac{2 \cdot \sum P_{н}}{P_{н.мах}} = \frac{2 \cdot 2226,4}{100} = 44,53$$

$$P_p = P_{см} \cdot K_M = 556,6 \cdot 1,3 = 723,58 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{см} = 490,87 \text{ кВар}$$

Зведені результати визначення потужностей для всього промислового підприємства подані нижче у табличній формі.

						Арк.
						10

Таблиця 1.1. Розрахунок силових навантажень заводу

№	Назва підрозділу	К-сть ЕС	P _{in} , кВт	P _{max} , кВт	P _{сум} , кВт	m	K _в	cosφ	tgφ	P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар	п _{еф}	K _м	P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	Дільниця механічної обробки	150	5	100	2226	20	0,3	0,75	0,9	557	490,9	45	1,3	723,6	490,9	874,37
2	Відділення збірки	250	2	50	3289	25	0,3	0,7	1	987	1007	132	1,1	1128	1007	1512,2
3	Відділ термічної обробки	150	10	250	4352	25	0,8	0,9	0,5	3264	1581	35	1,1	3509	1581	3848,8
4	Ковально-пресовий підрозділ	100	8	60	1164	7,5	0,5	0,7	1	524	534,3	39	1,2	626,6	534,3	823,46
5	Ливарна дільниця	120	7	250	4200	36	0,6	0,9	0,5	2310	1119	34	1,2	2691	1119	2914,6
6	Електроремонтний відділ	90	5	45	1467	10	0,3	0,65	1,2	440	514,7	65	1,2	534	514,7	741,64
7	Станція перекачування	10	10	80	1113	8	0,6	0,75	0,9	668	589,1	10	1,3	860,3	648	1077
8	Компресорна станція	15	5	80	607,2	16	0,8	0,85	0,6	455	282,2	15	1,1	510,3	282,2	583,13
	Всього	885	2	250	18418	125	0,5	0,83	0,7	9204	6117	148	1,1	9958	6117	11687

1.2 Розрахунок електричних освітлювальних навантажень

Проілюструємо процедуру обчислення необхідних параметрів, використовуючи дані дільниці механічної обробки.

$$P_{\text{вст}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 9563 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 162,57 \text{ кВт}$$

$$P_p = K_{\text{п}} \cdot K_1 \cdot P_{\text{вст}} = 0,95 \cdot 1,20 \cdot 162,57 = 185,33 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \text{tg } \varphi = 185,33 \cdot 0,484 = 89,70 \text{ квар}$$

Таблиця 1.2. Підсумки визначення потужності освітлювальних установок

№ з/п	Назва об'єкту	F, м²	p0, Вт/м ₂	Pвст, кВт	Kп	K1	cosφ	tgφ	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
1	Дільниця механічної обробки	9563	17	162,6	0,95	1,2	0,9	0,48	185,3	89,7	205,9
2	Відділення збірки	4782	16	76,51	0,95	1,2	0,9	0,48	87,22	42,2	96,9
3	Відділ термічної обробки	592	13	7,7	0,95	1,2	0,9	0,48	8,78	4,25	9,75
4	Ковально-пресовий підрозділ	4590	12	55,08	0,95	1,2	0,9	0,48	62,79	30,4	69,76
5	Ливарна дільниця	4208	17	71,54	0,95	1,2	0,9	0,48	81,56	39,5	90,62
6	Електроремонтний відділ	1302	18	23,44	0,95	1,2	0,9	0,48	26,72	12,9	29,69
7	Станція перекачування	1639	8	13,11	0,95	1,2	0,9	0,48	14,95	7,24	16,61
8	Компресорна станція	2514	7	17,6	0,95	1,2	0,9	0,48	20,06	9,71	22,29
9	Заводська територія	142959	0,1	14,3	1	1,1	0,5	1,73	16,02	27,8	32,04
	Всього			441,9					503,4	264	568,3

1.3 Розрахунок електричних навантажень напругою вище 1000 В

Результати розрахунку наведені в таблиці 1.3.

						Арк.
						12

Таблиця 1.3. Розрахунок силових навантажень вище 1 кВ

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, 2															
Дільниця механічної обробки															
силове:	150	5	100	2226,4	20	0,3	0,75	0,9	556,6	490,87	44,5	1,3	723,58	490,87	874,37
освітлювальне:				162,57					185,33	89,7					
Всього:				719,17					910,09	580,57			1079,51		
Відділення збірки															
силове:	250	2	50	3289	25	0,3	0,7	1	986,7	1006,64	132	1,14	1128,4	1006,64	1512,15
освітлювальне:				76,51					87,22	42,21					
Всього:				1063,2					1215,61	1048,85			1605,55		
Всього по ТП 1, 2:															
силове:	400	2	100	5515,4	50	0,3	0,72	1	1543,3	1497,51	109	1,17	1801,42	1497,51	2342,57
освітлювальне:				239,08					272,55	131,91					
БК 0,4 кВ				-1424					-1423,8						
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 1, 2:				1782,4					2073,97	205,54			2084,13		
Втрати в трансформаторах:									23,17	121,2					
Кількість трансформаторів: 3															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,7															
Всього на шинах 10 кВ ТП 1, 2:									2097,15	326,73			2122,45		
ТП 3, 4, 5															
Відділ термічної обробки															
силове:	150	10	250	4351,6	25	0,8	0,9	0,5	3263,7	1580,68	34,8	1,08	3509,19	1580,68	3848,77
освітлювальне:				7,7					8,78	4,25					
Всього:				3271,4					3517,98	1584,93			3858,52		
Всього по ТП 3, 4, 5:															
силове:	150	10	250	4351,6	25	0,8	0,9	0,5	3263,7	1580,68	34,8	1,08	3509,19	1580,68	3848,77
освітлювальне:				7,7					8,78	4,25					
БК 0,4 кВ				-1771					-1771						
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 3, 4, 5:				3271,4					3517,98	-186,07			3522,89		
Втрати в трансформаторах:									39,38	205,74					
Кількість трансформаторів: 5															

Продовження табл. 1.3

Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,71																
Всього на шинах 10 кВ ТП 3, 4, 5:									3557,35	19,67			3557,4			
ТП 6, 7, 8																
Ковально-пресовий підрозділ																
силове:	100	8	60	1163,8	7,5	0,5	0,7	1	523,71	534,3	38,8	1,2	626,6	534,3	823,46	
освітлювальне:				55,08					62,79	30,39						
Всього:				595,25					708,16	573,77			911,43			
Ливарна дільниця																
силове:	120	7	250	4199,8	35,7	0,6	0,9	0,5	2309,89	1118,73	33,6	1,17	2691,33	1118,73	2914,59	
освітлювальне:				71,54					81,56	39,48						
Всього:				2381,4					2772,89	1158,2			3005,05			
Всього по ТП 6, 7, 8:																
силове:	220	7	250	5363,6	35,7	0,5	0,86	0,6	2833,6	1653,02	42	1,15	3266,02	1653,02	3660,52	
освітлювальне:				143,08					163,11	78,96						
БК 0,4 кВ				-1179					-1179							
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 6, 7, 8:				2976,7					3429,13	553			3473,44			
Втрати в трансформаторах:									38,63	201,97						
Кількість трансформаторів: 5																
Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,7																
Всього на шинах 10 кВ ТП 6, 7, 8:									3467,76	754,97			3549			
ТП 9, 10																
Станція перекачування																
силове:	10	10	80	1113,2	8	0,6	0,75	0,9	667,92	589,05	10	1,29	860,3	647,96	1077,02	
освітлювальне:				13,11					14,95	7,24						
Всього:				681,04					875,25	655,2			1093,31			
Електроремонтний відділ																
силове:	90	4,5	45	1467,4	10	0,3	0,65	1,2	440,22	514,67	65,2	1,21	533,99	514,67	741,64	
освітлювальне:				23,44					26,72	12,93						
Всього:				463,67					560,72	527,61			769,92			
Компресорна станція																
силове:	15	5	80	607,2	16	0,8	0,85	0,6	455,4	282,23	15	1,12	510,29	282,23	583,13	
освітлювальне:				17,6					20,06	9,71						
Всього:				473					530,35	291,93			605,39			

Продовження табл. 1.3

Заводська територія															
освітлювальне:				14,3					16,02	27,75					
Всього:				14,3					16,02	27,75			32,04		
Всього по ТП 9, 10:															
силове:	115	4,5	80	3187,8	17,8	0,5	0,75	0,9	1563,54	1385,95	79	1,12	1748	1385,95	2230,77
освітлювальне:				68,46					77,75	57,62					
БК 0,4 кВ				-504					-504						
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 9, 10:				1632					1825,75	939,6			2053,34		
Втрати в трансформаторах:									22,71	118,88					
Кількість трансформаторів: 3															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,69$															
Всього на шинах 10 кВ ТП 9, 10:									1848,46	1058,48			2130,07		
Всього по об'єкту															
силове:	885	2	250	18418	125	0,5	0,99	0,1	9204,14	1239,33	148	1,08	9958,53	1239,33	10035,35
освітлювальне:				68,46					522,2	272,74					
Всього:				9662,5					10480,7	1512,07			10589,24		
Потужність КП 0,4 кВ:				-4878					-4878						
Втрати в трансформаторах:									123,89	647,79					
Всього по об'єкту:									10604,6	2159,86			10822,34		
Високовольтне навантаження															
СД 10 кВ	2	750	750	1500		0,7	0,9	0,5	1062,6	-514,64			1062,6	-514,64	1180,67
Всього високовольтного навантаження:									1062,6	-514,64			1180,67		
Всього по об'єкту 10 кВ:									11667,2	1645,22			11782,64		
КП 10 кВ:				0											
Всього 10 кВ з КП:									11667,2	1645,22			11782,64		
$\operatorname{tg}\varphi = 0,143$															

1.4 Графіки електричних навантажень

Отримані підсумки виконаних обчислень відображено за допомогою таблиць 1.4–1.5, а також проілюстровано відповідним графічним матеріалом на рисунках 1.1–1.5.

Таблиця 1.4. Початкова інформація для побудови кривих електроспоживання

№ з/п	Робочі дні, P (%)	Робочі дні, Q (%)	Вихідні дні, P (%)	Вихідні дні, Q (%)
1	43,5	40,5	36,4	58,7
2	43,5	40,5	36,4	58,7
3	43,5	40,5	36,4	58,7
4	43,5	40,5	36,4	58,7
5	48,6	43,5	36,4	58,7
6	48,6	43,5	36,4	58,7
7	78,9	63,8	36,4	58,7
8	89,1	73,9	36,4	58,7
9	99,2	100	25,3	48,6
10	99,2	100	25,3	48,6
11	89,1	73,9	25,3	48,6
12	78,9	63,8	25,3	48,6
13	89,1	73,9	25,3	48,6
14	89,1	73,9	25,3	48,6
15	100	78,9	25,3	48,6
16	100	78,9	25,3	48,6
17	89,1	73,9	25,3	48,6
18	78,9	63,8	36,4	58,7
19	58,7	48,6	36,4	58,7
20	58,7	48,6	36,4	58,7
21	48,6	43,5	36,4	58,7
22	48,6	43,5	36,4	58,7
23	48,6	43,5	36,4	58,7
24	43,5	40,5	36,4	58,7

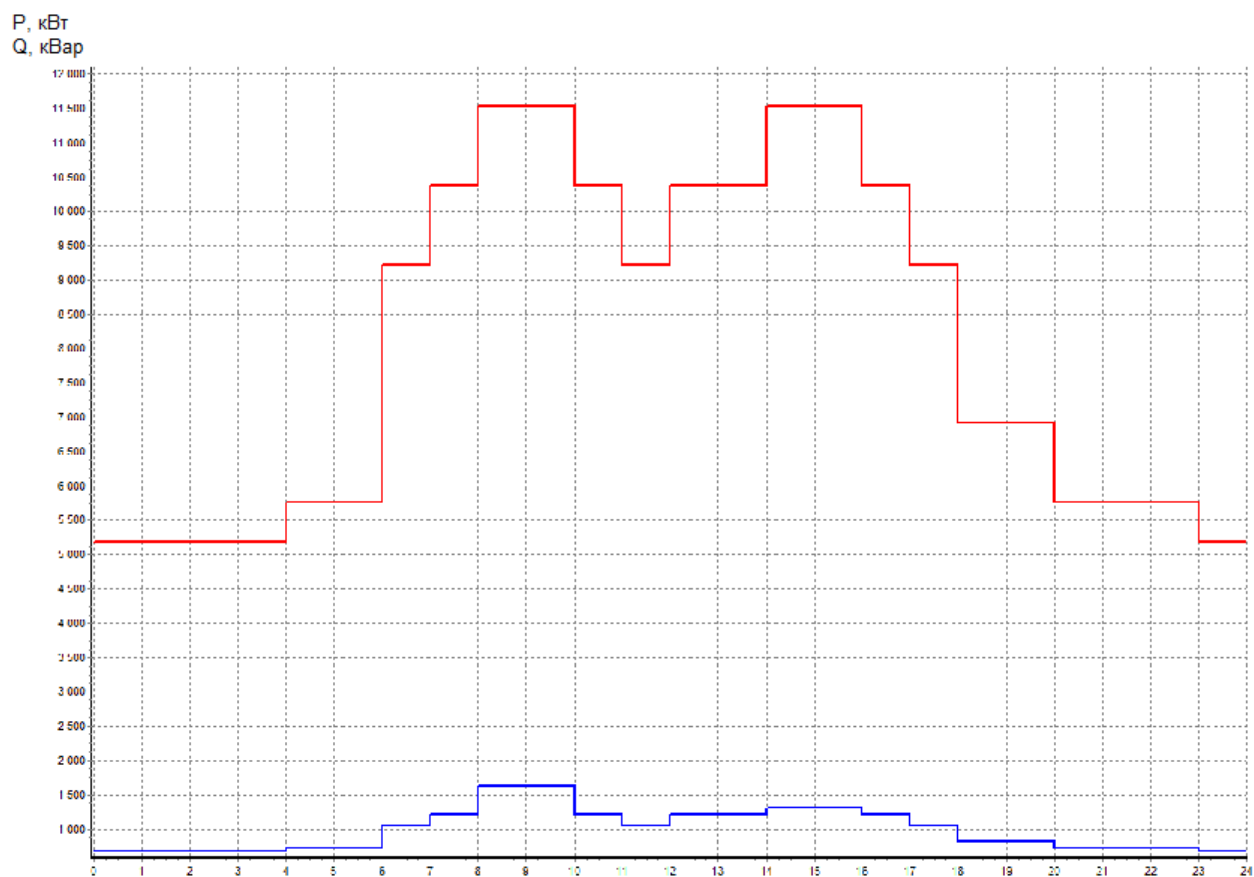


Рис. 1.1. Добові графіки Р, Q (з. р. дні)

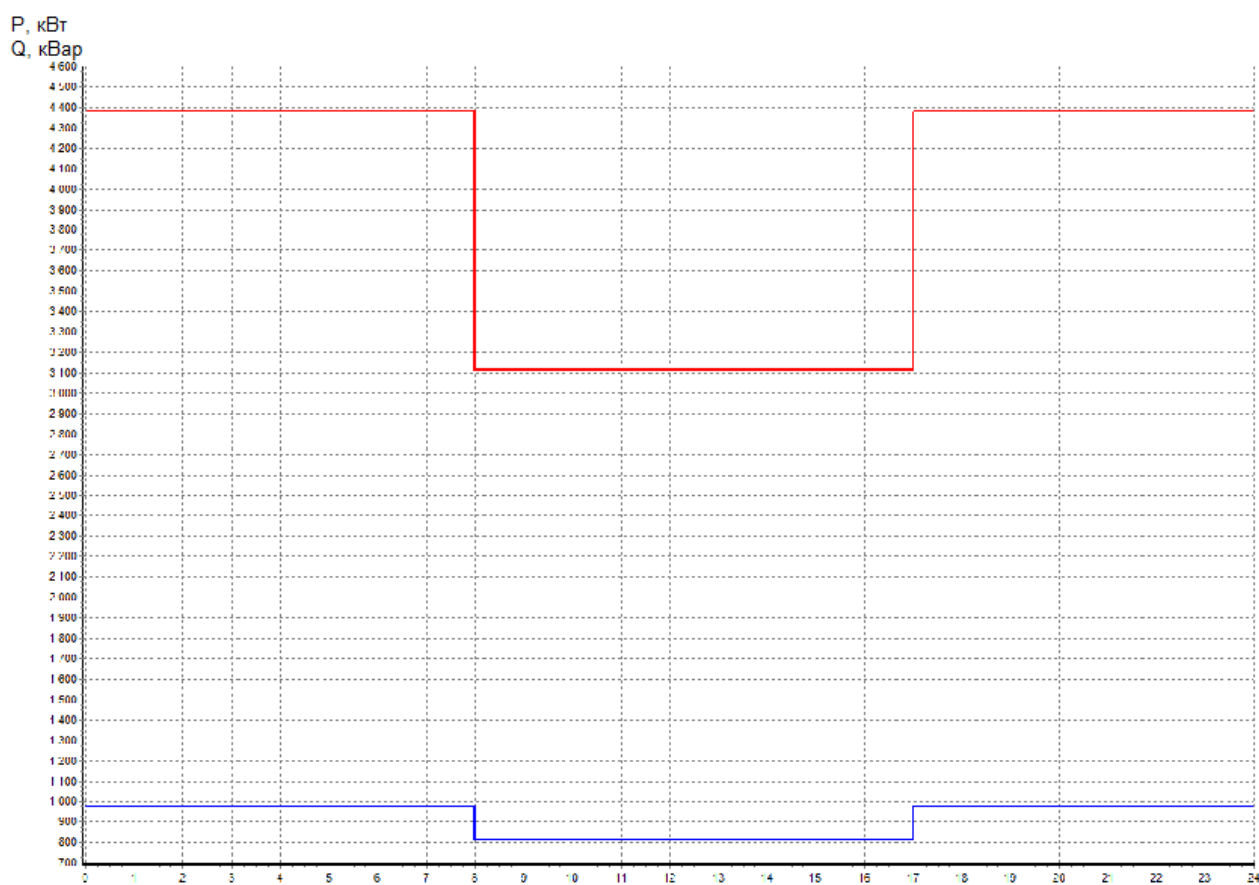


Рис. 1.2. Добові графіки Р, Q (з.в. дні)

P, кВт
Q, кВар

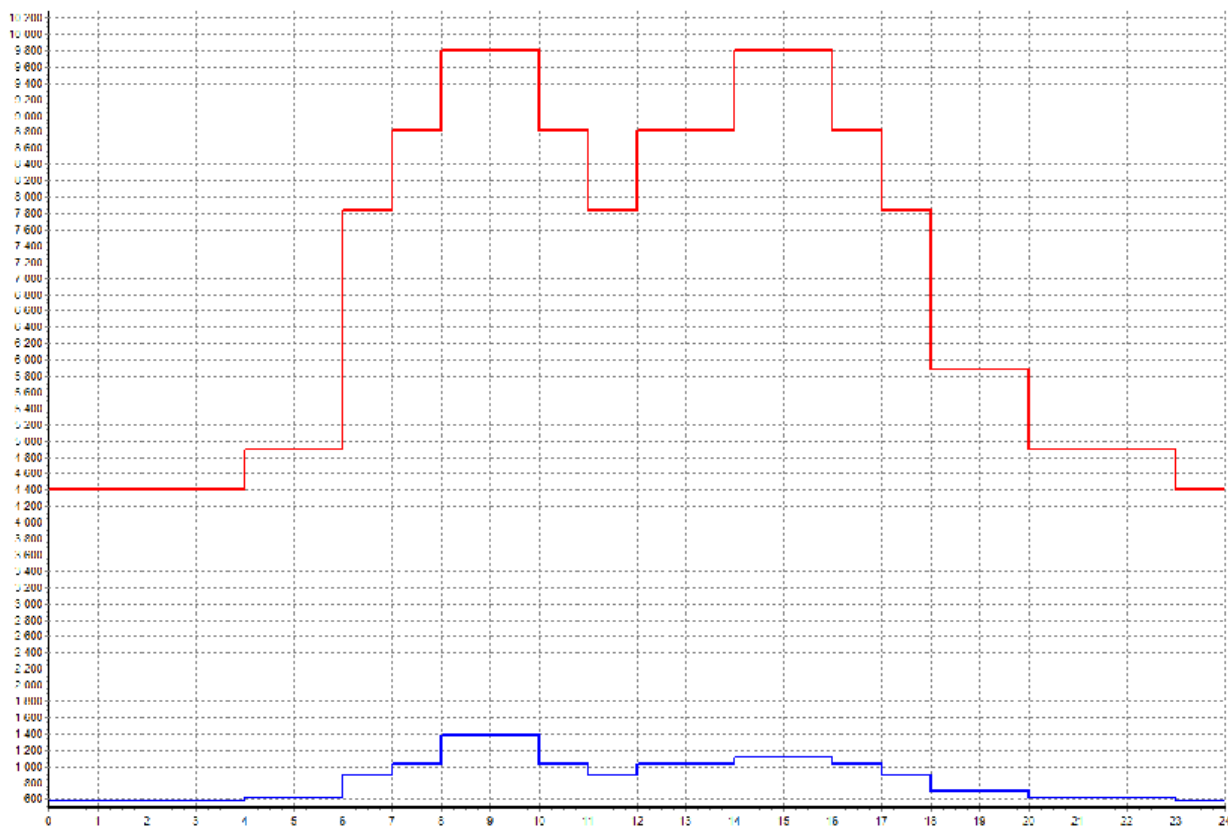


Рис. 1.3. Добові графіки P, Q (л. р. дні)

P, кВт
Q, кВар

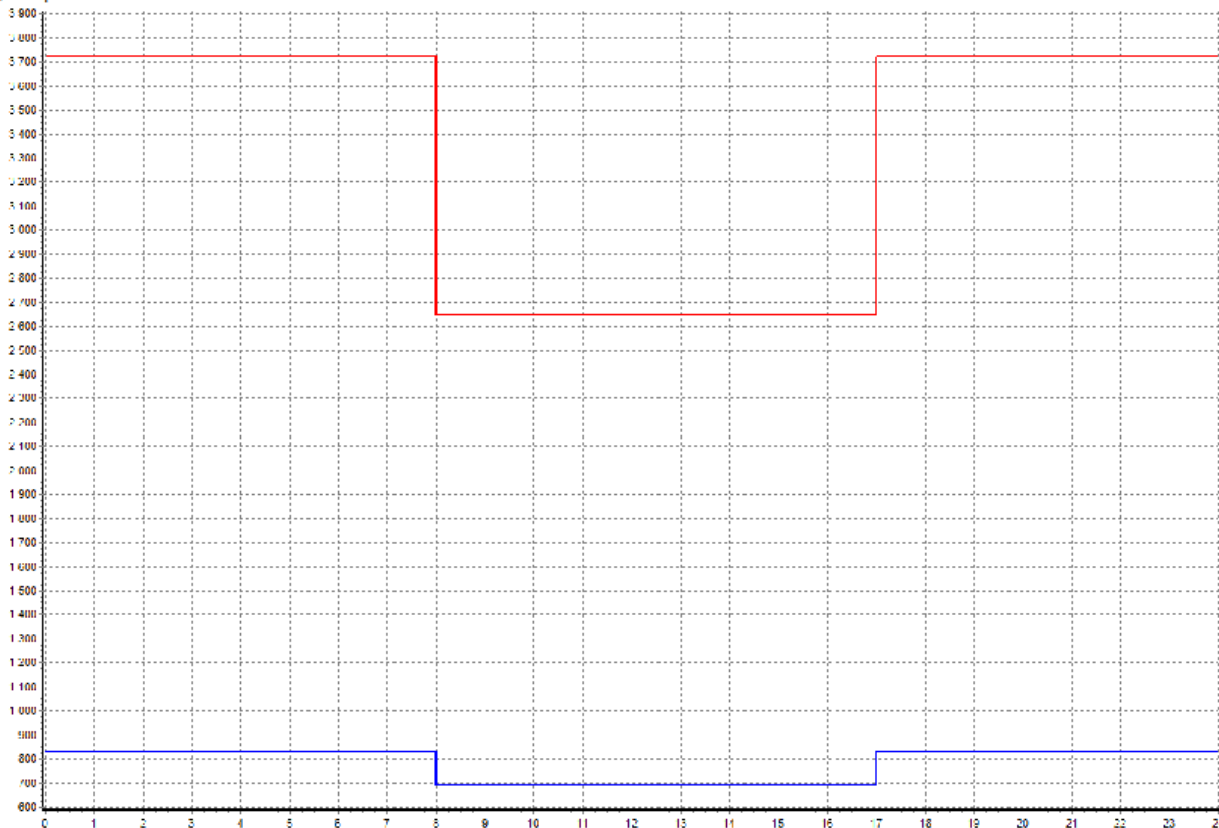


Рис. 1.4 Добові графіки P, Q (л. в. дні)

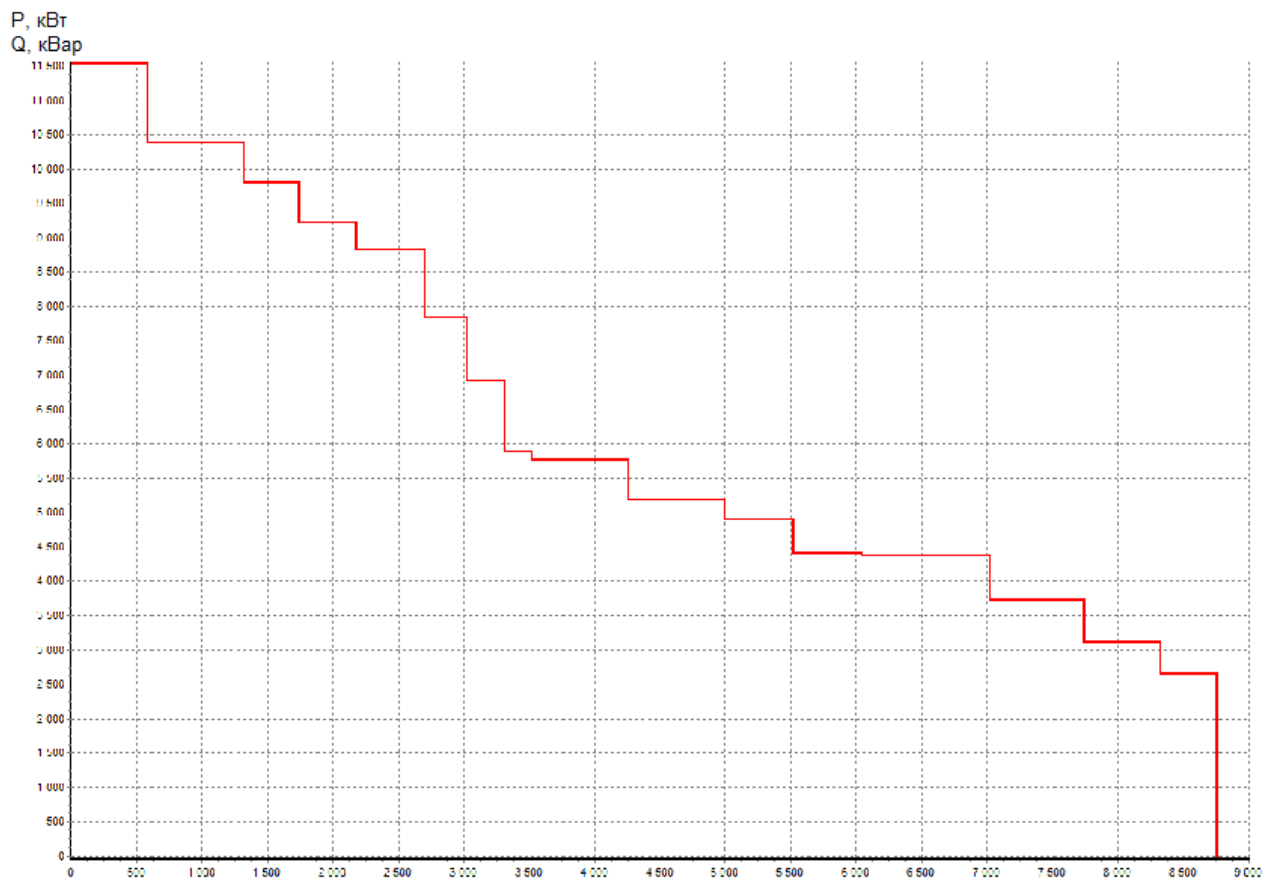


Рис. 1.5. Річний графік за тривалістю

Таблиця 1.5. Зведені техніко-економічні показники електроспоживання

№ з/п	Найменування розрахункового показника	Числовий вираз	Одиниця виміру
1	Повна потужність за розрахунком, S_p	11782,8	МВА
2	Річна витрата активної енергії (зимовий період, робочі дні), $W_{з.р.}$	28898746	кВт·год
3	Річна витрата реактивної енергії (зимовий період, робочі дні), $V_{з.р.}$	3544451	квар·год
4	Кількість спожитої активної електрики (зима, вихідні), $W_{з.в.}$	6165691	кВт·год
5	Кількість спожитої реактивної електрики (зима, вихідні), $V_{з.в.}$	1444331	квар·год
6	Обсяг використаної активної електроенергії (літній сезон, робочі дні), $W_{л.р.}$	17546714	кВт·год
7	Обсяг використаної реактивної електроенергії (літній сезон, робочі дні), $V_{л.р.}$	2151446	квар·год
8	Спожита за рік активна енергія (літо, вихідні дні), $W_{л.в.}$	3870244	кВт·год
9	Спожита за рік реактивна енергія (літо, вихідні дні), $V_{л.в.}$	906137	квар·год
10	Загальне споживання активної електричної потужності за рік, W_p	56481395	кВт·год
11	Підсумкове споживання реактивної електричної потужності протягом року, V_p	8046365	квар·год
12	Річний час використання найбільшого навантаження, T_m	4900	год
13	Еквівалентний годинний показник максимальних втрат, t_m	3279,2	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

З метою візуалізації значень освітлювальних та силових навантажень на генплані, проводиться розрахунок картограми електричних навантажень. Цей розрахунок здійснюється відповідно до методики, що описана в джерелі [1]. Центр електричних навантажень було визначено за результатами розрахунку картограми.

Для прикладу наведемо розрахунок картограми для механічного цеху:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_1}{\pi m}} = \sqrt{\frac{P_{\text{р.сил}} + P_{\text{р.осв}}}{\pi m}} = \sqrt{\frac{716,16 + 183,14}{3,14 \cdot 0,2}} = 37,83 \text{ мм},$$

$$\alpha_i = \frac{P_{\text{і.осв}} \cdot 360}{\pi R_i^2} = \frac{183,14 \cdot 360}{3,14 \cdot 37,83^2} = 73,31^\circ.$$

Розрахунок для інших цехів здійснюється аналогічно. Результати розрахунків приведені в табл. 2.1.

Координати центру електр. навантажень, м:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{2741489,76}{12006,82} = 228,33,$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{2086575,30}{12006,82} = 173,78.$$

Під час розрахунку координат центру ел. навантажень було встановлено, що він співпадає з одним із підрозділів підприємства. Оскільки таке розташування може призвести до зворотних перетоків активної електроенергії, центр живлення потрібно перенести в бік живлення. Нове місцезнаходження підстанції відображено на генплані.

Таблиця 2.1. Розрахункові дані для побудови картограми та визначення центру електричних навант.

№ 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.	Механічний цех	716,16	183,14	899,30	0,2	37,83	73,31	120,00	90,00	107916,00	80937,00
2.	Збиральний цех	1115,02	86,18	1201,20	0,2	43,72	25,83	216,00	90,00	259459,20	108108,00
3.	Термічний цех	3467,58	8,68	3476,26	0,2	74,38	0,90	81,00	276,00	281577,06	959447,76
4.	Ковальський цех	619,17	62,05	681,22	0,2	32,93	32,79	351,00	126,00	239108,22	85833,72
5.	Ливарний цех	2659,42	80,59	2740,01	0,2	66,04	10,59	357,00	54,00	978183,57	147960,54
6.	Ремонтний електроцех	527,66	26,41	554,07	0,2	29,70	17,16	213,00	276,00	118016,91	152923,32
7.	Насосна	850,1	14,77	864,87	0,2	37,10	6,15	270,00	240,00	233514,90	207568,80
8.	Компресорна										
	а) 0.4 кВ	504,24	19,82	524,06	0,2	28,88	13,62	330,00	216,00	172939,80	113196,96
	б) 10.5 кВ (АД)	1050	0	1050,00	0,2	40,88	0,00	330,00	216,00	346500,00	226800,00
9.	Територія заводу	0	15,83	15,83	0,2	5,02	360,00	270,00	240,00	4274,10	3799,20
	Всього по заводу	11509,35	497,47	12006,82						2741489,76	2086575,30

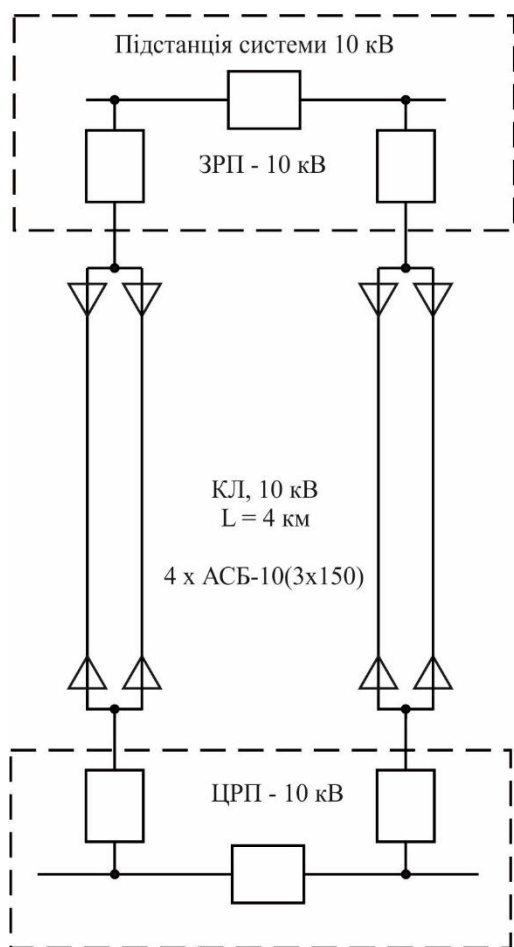
РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

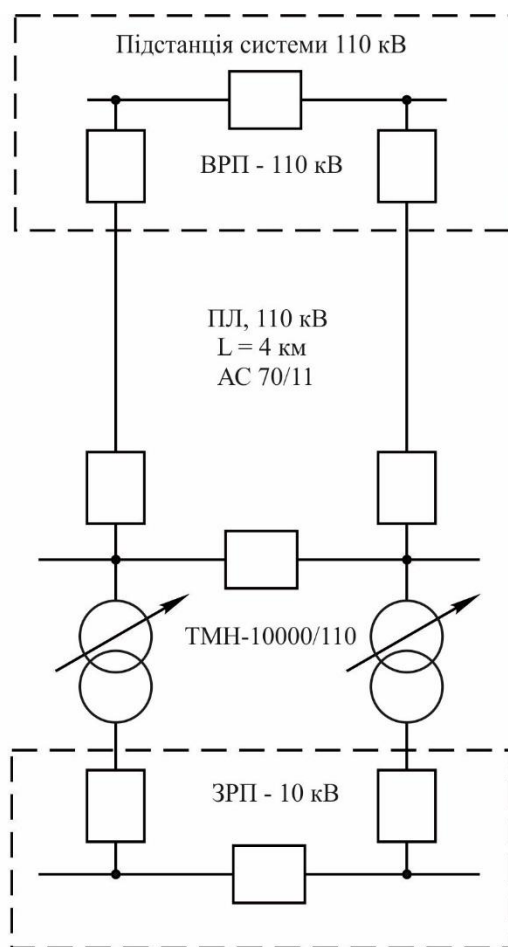
3.1 Вибір схеми зовнішнього електропостачання

В роботі розглядалось 2 варіанти схем зовн. електропостачання:

1. КЛ 10 кВ.
2. ПЛ 110 кВ



а)



б)

Рис. 3.1. Варіанти схем зовнішнього електропостачання

Варіант 1. КЛ 10 кВ (рис. 3.1 а).

$$I_{\max} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{11654}{\sqrt{3} \cdot 10} = 672,84$$

Обираємо 4 КЛ марки АСБ-10(3х150).

$$I_p = 168,21 \text{ А} \leq K_n I_{\text{дон}} = 0,84 \cdot 275 = 231 \text{ А}$$

$$I_{p.\text{ас}} = 2I_p = 2 \cdot 168,21 = 336,42 \text{ А} \leq K_{\text{ан}} K_n' I_{\text{дон}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 275 = 343,75 \text{ А}$$

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{\text{дон}}} = \frac{168,2}{275} = 0,61$$

$$\Delta P_{\text{кл}} = \Delta P_{\text{кл}} J_{\Sigma} K_3^2 = 20 \cdot 16 \cdot 0,3721 = 119,07 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma} \tau = 59,54 \cdot 3240,39 = 192932,82 \text{ кВт·год.}$$

$$C_{\text{стр}} = \Delta W_{\Sigma} C_0 = 192932,82 \cdot 5,09 \cdot 0,001 = 982,03 \text{ тис.грн}$$

Таблиця 3.1. Підсумки обчислення необхідних інвестицій щодо першого варіанту

Назва елемента схеми	Одиниця виміру	Кількість	Вартість од., тис.грн.	Всього, тис.грн.
КЛ 10 кВ	км	16	52,62	841,92
Траншея	км	4	14,47	57,88
Шафи КРП серії КУ-10	шт.	2	10,83	21,66
Всього				921,46

Таблиця 3.2. Визначення експлуатаційних грошових відрахувань згідно першої схеми

Назва елемента схеми	К _і , тис.грн.	Р _{аі} , %	С _{аі} , тис.грн.	Р _{эі} , %	С _{эі} , тис.грн.	С _і , тис.грн.
КЛ 10 кВ	841,92	5	42,1	5	42,1	84,2
Траншея	57,88	5	2,89	5	2,89	5,78
Шафи КРП серії КУ-10	21,66	15	3,25	5	1,08	4,33
Всього						94,31

Зведені витрати для першого варіанту, тис. грн./рік:

$$Z_i = E_n K_i + C_i + C_{\text{втр}i} + Y_i = 0.12 \cdot 910,6 + 93,2 + 982,03 + 6,88 = 1191,382$$

Таблиця 3.3. Результати техніко-економічного порівняння

Найменування показника	Варіант 1	Варіант 2
Капітальні вкладення, тис.грн.	921,46	993,81
Поточні витрати, тис.грн.	94,31	1205,68
Вартість втрат електроенергії, тис.грн.	2443,98	6,96
Збиток, тис.грн.	456,41	5,45
Зведені витрати, тис.грн.	2474,67	1719,53

Таким чином, обираємо 1-й варіант.

3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання

Організація розподілу електроенергії територією підприємства базується на використанні радіальної топології. Передача струму від головного розподільного пункту до споживачів здійснюється підземними кабельними трасами з робочою напругою 10 кіловольт. Відмова від детального техніко-економічного зіставлення альтернативних варіантів (магістрального чи комбінованого) продиктована специфікою об'єкта та наступними інженерними міркуваннями:

						Арк.
						24

Порівнюючи з магістральним принципом побудови, саме радіальна конфігурація гарантує найвищі показники безперебійності для споживачів першої та другої категорій. Кожна цехова підстанція має власну незалежну лінію живлення. Відповідно, у разі виникнення короткого замикання чи пробою ізоляції на одній з гілок, релейний захист відключає виключно пошкоджений сегмент. Решта виробничих ліній склозаводу продовжує працювати у штатному режимі, що унеможливорює масову зупинку технологічного процесу.

Просторове розміщення виробничих корпусів та локальних знижувальних трансформаторних підстанцій (класу 10/0,4 кВ) характеризується високою щільністю забудови. Завдяки коротким відстаням прокладання провідників, капітальні витрати на додатковий метраж кабелю для радіальної схеми не є критичними. Водночас падіння напруги та технологічні втрати активної енергії у таких лініях залишаються на мінімальному рівні, забезпечуючи високу якість електроенергії на клеммах приймачів.

Детальна візуалізація спроектованої схеми розподільних мереж підприємства, із зазначенням точок підключення та параметрів апаратів захисту, представлена у графічній частині роботи.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності

Розрахунок балансу РП наведено нижче:

$$Q_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{сд}} = 750 \cdot 0,484 = 363 \text{ квар}$$

$$P_{\text{сд}} = N_{\text{сд}} P_{\text{ном}} K_{\text{вик}} = 2 \cdot 750 \cdot 0,7 = 1050 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{сд}} = P_{\text{сд}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}} = 1050 \cdot 0,484 = 508,2 \text{ кВА}$$

$$Q_{\text{мах сд}} = \frac{\alpha_{\text{м}} P_{\text{сд}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}}{\eta} = \frac{1,21 \cdot 1050 \cdot 0,484}{0,9} = 683,25 \text{ квар}$$

$$P_p = P_{\text{н}} + \Delta P_m + P_{\varepsilon} + P_{\text{сд}} = 10718 + 118 + 0 + 1050 = 11886 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{\text{н}} + \Delta Q_m + Q_{\varepsilon} - Q_{\text{сд}} = 6314 + 620 + 0 - 508,2 = 6425,8 \text{ квар}$$

$$Q_{\varepsilon} = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\varepsilon} = 11886 \cdot 0,15 = 1782,9 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_{\varepsilon} = 6425,8 - 1782,9 = 4642,9 \text{ квар}$$

$$N_0 = \frac{P_n}{\beta \cdot S_{ном}} = \frac{10718}{0,7 \cdot 1000} = 15,31 \approx 16 \text{ шт.}$$

Варіант 1. $N = 16$ шт.

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{ном})^2 - P_n^2} = \sqrt{(16 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 10718^2} = 3250,3 \text{ квар}$$

$$Q_{KH} = Q_n - Q_1 = 6314 - 3250,3 = 3063,7 \text{ квар}$$

$$Q_{KB} = Q_p - Q_{KH} - Q_e = 6250,75 - 3063,7 - 1782,9 = 1404,15 \text{ квар}$$

Таблиця 4.1. Результати розрахунку потужності КП

Номер варіанту	К-сть трансформаторів	Q1, кВАр	QKH, кВАр	QKB, кВАр
1	16	3289,30	3100,46	1421,00
2	17	5232,59	1157,18	3364,28
3	18	6704,03	0	4521,46

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв

Результати розрахунку приведені в табл. 4.2 – 4.4.

Таблиця 4.2. Підбір компенсуючих пристроїв за умови наявності 16 тр-рів

Число тр-рів	Рр, кВт	Qр, кВАр	Qпр, кВАр	Qкп, кВАр	К-сть і номінал КУ, шт. · кВАр	Загальне QКУ, кВАр	Різниця Qкп-Qку, кВАр	Кз	Sp, кВА
3	2097	1749,85	345,08	1404,77	3·67; 3·402;	1407	-19,12	0,71	2122,18
5	3557,28	1790,3	0	1790,3	5·50; 5·300;	1750	19,3	0,71	3557,33
5	3467,09	1930,63	724,59	1206,04	5·67; 5·166;	1165	27,06	0,71	3547,63
3	1845,26	1546,47	1054,27	492,19	3·166;	498	-11,78	0,71	2119,38

Таблиця 4.3. Підбір компенсуючих пристроїв за умови наявності 17 тр-рів

Число тр-рів	Pp, кВт	Qp, кВАр	Qпр, кВАр	Qкп, кВАр	К-сть і номінал КУ, шт. · кВАр	Загальне QКУ, кВАр	Різниця Qкп-Qку, кВАр	Кз	Sp, кВА
3	2097	1749,85	345,08	1404,77	3·67; 3·402;	1407	-19,12	0,71	2122,18
6	3557,28	1790,3	2326,29	0		0	0	0,67	3982,39
5	3467,09	1930,63	724,59	1206,04	5·67; 5·166;	1165	27,06	0,71	3547,63
3	1845,26	1546,47	1054,27	492,19	3·166;	498	-11,78	0,71	2119,38

Таблиця 4.4. Підбір компенсуючих пристроїв за умови наявності 18 тр-рів

Число тр-рів	Pp, кВт	Qp, кВАр	Qпр, кВАр	Qкп, кВАр	К-сть і номінал КУ, шт. · кВАр	Загальне QКУ, кВАр	Різниця Qкп-Qку, кВАр	Кз	Sp, кВА
3	2097	1749,85	345,08	1404,77	3·67; 3·402;	1407	-19,12	0,71	2122,18
6	3557,28	1790,3	2326,29	0		0	0	0,67	3982,39
6	3467,09	1930,63	2458,69	0		0	0	0,66	3968,38
3	1845,26	1546,47	1054,27	492,19	3·166;	498	-11,78	0,71	2119,38

$$\Delta P_{KH} = P_{ПИТ}^{KH} \cdot Q_{KH} = 0,0045 \cdot 4820 = 21,69 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{KB} = P_{ПИТ}^{KB} \cdot Q_{KB} = 0,003 \cdot 0 = 0 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{ПТ} = \frac{P_{HH}^2 + Q_1^2}{U_H^2} R_T \cdot 10^{-3} = \frac{10718^2 + 3250,3^2}{10^2} \cdot 0,05 \cdot 0,001 = 62,72 \text{ кВт}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{сд} &= Q_{\max сд} \left(\frac{D_1}{Q_{\text{ном сд}}} + \frac{2D_2 Q_{\max сд}}{Q_{\text{ном сд}}^2 N_{сд}} \right) + Q_{\max сд}^2 \frac{D_2}{Q_{\text{ном сд}}^2 N_{сд}} = \\ &= 683,25 \cdot \left(\frac{0,9}{363} + \frac{2 \cdot 0,75 \cdot 683,25}{363^2 \cdot 2} \right) + 683,25^2 \cdot \frac{0,75}{363^2 \cdot 2} = 5,59 \text{ кВт} \end{aligned}$$

РОЗДІЛ 5

ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Приклад вибору підстанції ТП-1:

$$K_3 = \frac{S_p}{n_T \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{1414,79}{2 \cdot 1000} = 0,71$$

$$S_{\text{НОМ} \cdot \text{Т1}} = 2 \cdot 1000 = 2000 \geq \frac{S_p}{K_1} = \frac{1414,79}{1,08} = 1310$$

$$S_{\text{НОМ} \cdot \text{Т2}} = 1000 \geq \frac{S_p}{K_2} = \frac{1414,79}{1,4} = 1011$$

Підсумкові показники решти обчислень згруповано всередині наступної таблиці.

Таблиця 5.1. Підсумки підбору цехових трансформаторних пунктів

№ ТП	К-сть	Spоз, кВА	Kз	SНОМ > Sp/K1	SНОМ > Sp/K2	Марка
ТП-1	2	1414,79	0,71	1310	1011	ТМ-1000
ТП-2	1	707,39	0,71	655	505	ТМ-1000
ТП-3	2	1422,93	0,71	1318	1016	ТМ-1000
ТП-4	2	1422,93	0,71	1318	1016	ТМ-1000
ТП-5	1	711,47	0,71	659	508	ТМ-1000
ТП-6	2	1419,06	0,71	1314	1014	ТМ-1000
ТП-7	2	1419,06	0,71	1314	1014	ТМ-1000
ТП-8	1	709,52	0,71	657	507	ТМ-1000
ТП-9	2	1412,92	0,71	1308	1009	ТМ-1000
ТП-10	1	706,46	0,71	654	505	ТМ-1000

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Розрахунок струмів к.з. наведено нижче.

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з.}} = \frac{10,5^2}{112} = 0,984 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{0,984}{25} = 0,039 \text{ Ом}$$

$$R_{кл} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,206 \cdot 4}{2} = 0,412 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,079 \cdot 4}{2} = 0,16 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X_c + X_{кл} = 0,984 + 0,16 = 1,144 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{кл} = 0,039 + 0,412 = 0,451 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,451^2 + 1,144^2} = 1,23 \text{ Ом}$$

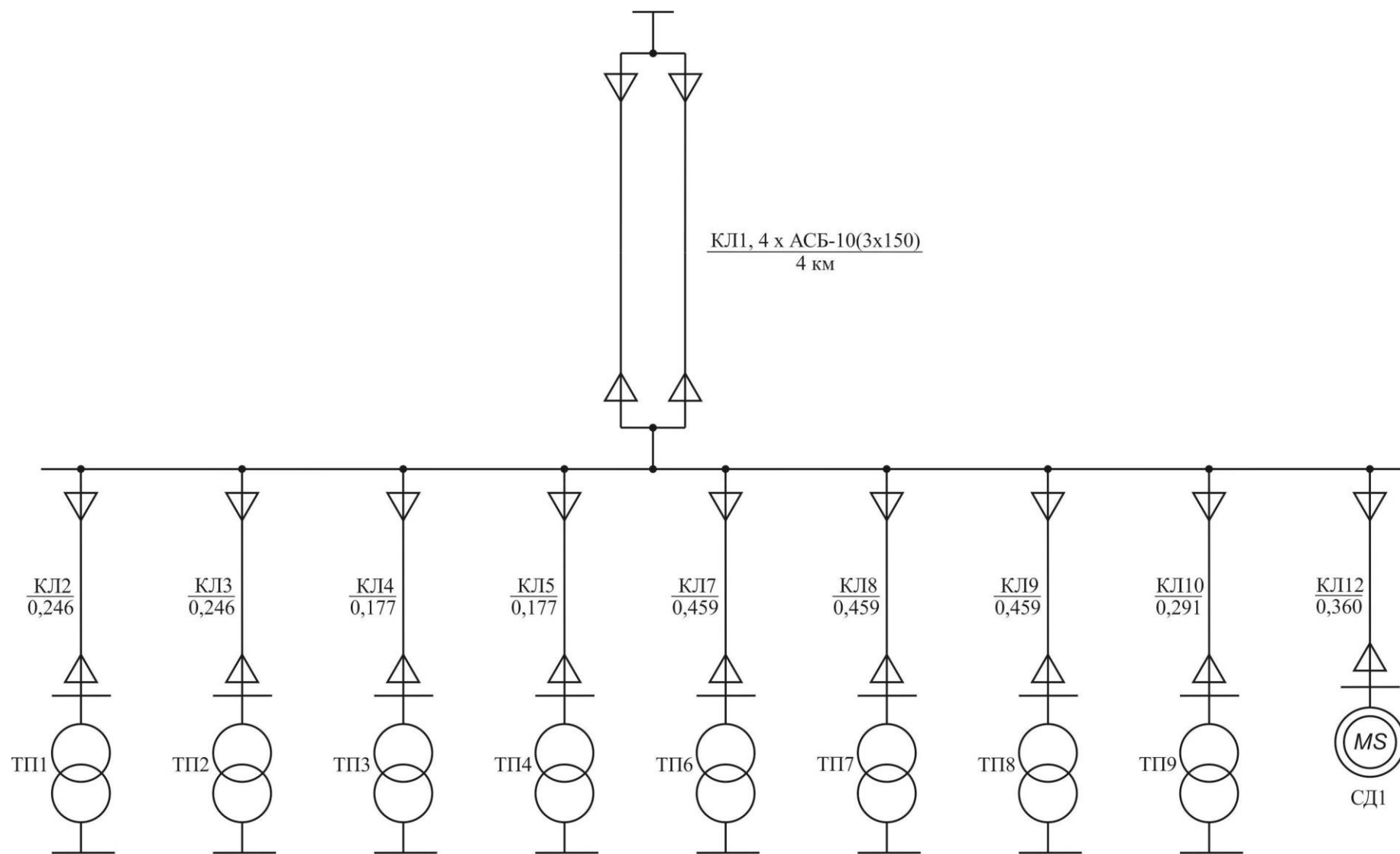


Рис. 6.1. Розрахункова схема СЕП

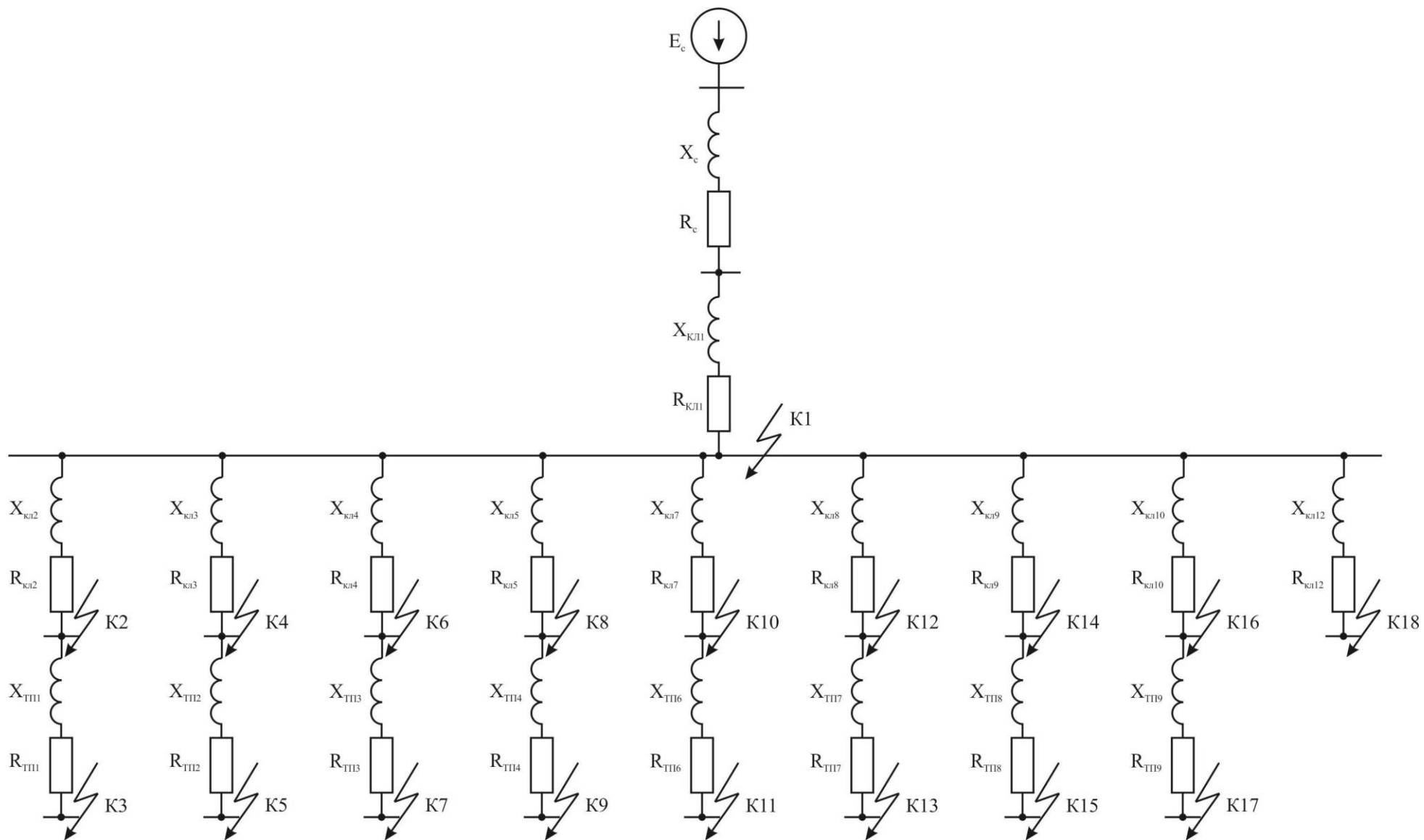


Рис. 6.2. Схема заміщення СЗП

$$I_{K1(c)}'' = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,23} = 4,93 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{1,144}{314 \cdot 0,451} = 0,0081 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0081}} = 1,291$$

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2}k_{y\partial}I_{K1(c)}'' = \sqrt{2} \cdot 1,291 \cdot 4,93 = 9 \text{ кА}$$

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos\varphi_{ном} \cdot \eta} = \frac{0,75}{0,9 \cdot 0,96} = 0,87 \text{ МВА}$$

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{0,87}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,048 \text{ кА}$$

$$I_{K1(CД)}'' = n_{CД} \frac{E_*}{x_d} I_{ном} = 2 \cdot \frac{1,1}{0,2} \cdot 0,048 = 0,528 \text{ кА}$$

$$T_{aCД} = \frac{X_{CД}}{\omega R_{CД}} = \frac{15}{314} = 0,0478 \text{ с}$$

$$k_{y\partial(CД)} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a(CД)}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0478}} = 1,811$$

$$i_{y\partial 1(CD)} = \sqrt{2} k_{y\partial(CD)} I''_{K1(CD)} = \sqrt{2} \cdot 1,811 \cdot 0,528 = 1,35 \text{ кА}$$

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(CD)} = 4,93 + 0,528 = 5,46 \text{ кА}$$

$$i_{y\partial 1} = i_{y\partial 1(c)} + i_{y\partial 1(CD)} = 9 + 1,35 = 10,35 \text{ кА}$$

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{1398}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 38,44 \text{ А}$$

$$B_k = I''^2_{K1}(t_{p.з.min} + T_a) = 5,46^2(1,365 + 0,0081) = 40,93 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{40,93 \cdot 10^3} = 68,06 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель ААШВ-10(3 х 70):

$$R_{к\tau} = r_0 \cdot l_{к\tau} = 0,443 \cdot 0,246 = 0,109 \text{ Ом}$$

$$X_{к\tau} = x_0 \cdot l_{к\tau} = 0,086 \cdot 0,246 = 0,021 \text{ Ом}$$

Таблица 6.1. Параметры КЛ 10 кВ

№ КЛ	l, км	r ₀ , Ом/км	x ₀ , Ом/км	R, Ом	X, Ом
1	4,048	0,208	0,08	0,417	0,16
2	0,249	0,448	0,087	0,11	0,021
3	0,249	0,448	0,087	0,11	0,021
4	0,179	0,448	0,087	0,079	0,015
5, 6	0,179	0,448	0,087	0,079	0,015
7	0,465	0,448	0,087	0,205	0,039
8	0,465	0,448	0,087	0,205	0,039
9	0,465	0,448	0,087	0,205	0,039
10, 11	0,294	0,448	0,087	0,131	0,025
12	0,364	0,448	0,087	0,161	0,031

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кт} = 1,144 + 0,021 = 1,165 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кт} = 0,451 + 0,109 = 0,56 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,56^2 + 1,165^2} = 1,293 \text{ Ом}$$

$$I_{K2}'' = \frac{U_{ср.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,293} = 4,69 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{1,165}{314 \cdot 0,56} = 0,0066 \text{ с}$$

$$k_{y\phi 2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0066}} = 1,22$$

$$i_{y\partial 2} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K2}'' = \sqrt{2} \cdot 1,22 \cdot 4,69 = 8,09 \text{ кА}$$

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{mp}) \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}} \right)^2 = (1,165 + 6,064) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0105 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{mp}) \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}} \right)^2 = (0,56 + 0,948) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0022 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0022^2 + 0,0105^2} = 0,0107 \text{ Ом}$$

$$I_{K3}'' = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0107} = 21,58 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0105}{314 \cdot 0,0022} = 0,0152 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0152}} = 1,518$$

$$i_{y\partial 3} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,518 \cdot 21,58 = 46,33 \text{ кА}$$

Таблиця 6.2. Результати розрахунку струмів к. з.

№	R, Ом	X, Ом	I _{к"} , кА	T _а , с	к _{уд}	i _{уд} , кА
1	0,4564	1,1577	5,5300	0,0082	1,3060	10,4700
2	0,5667	1,1790	4,7500	0,0067	1,2350	8,1900
3	0,0022	0,0106	21,8400	0,0154	1,5360	46,8900
4	0,5667	1,1790	4,7500	0,0067	1,2350	8,1900
5	0,0022	0,0106	21,8400	0,0154	1,5360	46,8900
6	0,5353	1,1729	4,8200	0,0071	1,2550	8,4500
7	0,0021	0,0106	21,8400	0,0161	1,5510	47,3500
8	0,5353	1,1729	4,8200	0,0071	1,2550	8,4500
9	0,0021	0,0106	21,8400	0,0161	1,5510	47,3500
10	0,6618	1,1972	4,5300	0,0059	1,1920	7,5500
11	0,0023	0,0106	21,8400	0,0147	1,5200	46,3900
12	0,6618	1,1972	4,5300	0,0059	1,1920	7,5500
13	0,0023	0,0106	21,8400	0,0147	1,5200	46,3900
14	0,6618	1,1972	4,5300	0,0059	1,1920	7,5500
15	0,0023	0,0106	21,8400	0,0147	1,5200	46,3900
16	0,5870	1,1830	4,7100	0,0065	1,2250	8,0600
17	0,0022	0,0106	21,8400	0,0154	1,5360	46,8900
18	0,6173	1,1891	4,6300	0,0062	1,2080	7,8200

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Результати розрахунку наведені нижче

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{1398}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 38,44 \text{ А}$$

Обираємо кабель ААШВ-10(3х70)

$$I_p = 38,44 \text{ A} \leq K_n \cdot I_{don} = 0,9 \cdot 165 = 148,5 \text{ A}$$

$$I_{ae} = 76,88 \text{ A} \leq K_{an} \cdot K_n' \cdot I_{don} = 1,35 \cdot 1 \cdot 165 = 222,75 \text{ A}$$

$$B_\kappa = I_{K1}^2 (t_{p.з. \min} + T_a) = 5,46^2 (1,365 + 0,0081) = 68,06 \text{ кА}^2 \text{с}$$

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_\kappa} = \frac{1}{94} \sqrt{40,93} \cdot 10^3 = 68,06 \text{ мм}^2$$

Таблиця .6.3. Результати вибору КЛ 10 кВ

№ лінії	К-сть, шт	Sp, кВА	Ip, А	Iавар, А	Фекв, мм ²	Вк, кА ² с	Фмін, мм ²	Тип та переріз кабелю	Ідоп, А	Кп	Ідоп·Кп, А	Кав	К'п	Ідоп·Кав·К'п, А
1	4	11782,6	161,97	323,94	115,69	41,42	68,88	4 х АСБ-10(3 х 150)	275	0,8	220	1,35	0,9	334,13
2	2	1414,79	38,9	77,8	27,79	41,42	68,88	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
3	1	707,39	38,9	-	27,79	41,42	68,88	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	165	-	-	-
4	2	1422,93	39,11	78,23	27,94	41,42	68,88	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
5, 6	2	1422,93	39,11	78,23	27,94	41,42	68,88	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
7	2	1419,06	39,01	78,03	27,87	41,42	68,88	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
8	2	1419,06	39,01	78,03	27,87	41,42	68,88	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
9	1	709,52	39,01	-	27,87	41,42	68,88	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	165	-	-	-
10, 11	2	1412,92	38,84	77,68	27,74	41,42	68,88	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
12	1	1021,11	56,15	-	40,11	41,42	68,88	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	165	-	-	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Результати розрахунків наведені нижче.

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача 10 кВ

Критерії валідації обладнання	Зіставлення розрахункових та паспортних величин
За класом напруги: $U_{уст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 10$
За максимальним робочим навантаженням: $I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$680,27 \leq 1000$
За номінальним струмом вимикання: $I'' \leq I_{відкл.ном}$	$5,53 \leq 20$
Перевірка електродинамічної стійкості: $i_y \leq i_{дин.ст}$	$10,47 \leq 132,37$
За періодичною складовою струму КЗ: $I_{пт} \leq I_{відкл.ном}$	$5,53 \leq 20$
За аперіодичною складовою струму КЗ: $i_{ат} \leq 2 \cdot \beta \tau \cdot I_{відкл.ном}$	$7,81 \leq 39,6$
Повна відключаюча здатність апарата: $2 \cdot I_{пт} + i_{ат} \leq 2 \cdot I_{відкл.ном} \cdot (1 + \beta_n)$	$1,41 \cdot 5,53 + 0 \leq 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4) \Rightarrow 7,80 \leq 39,48$
Перевірка на термічну стійкість: $B_k \leq I_{т.ст}^2 \cdot t_{т.ст}$	$37,72 \leq 1200$

$$\tau = t_{пз. \min} + t_{с.с} = 0,5 + 0,042 = 0,542 \text{ с}$$

$$i_{ат} = \sqrt{2} I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 5,46 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0081}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_k = I''^2 (t_{с.с.} + t_{пз. \max} + T_a) = 5,46^2 (0,042 + 1,2 + 0,0081) = 37,2 \text{ кА}^2 \text{с}$$

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема підключення трансформаторів власних потреб приведена на рис. 6.3.

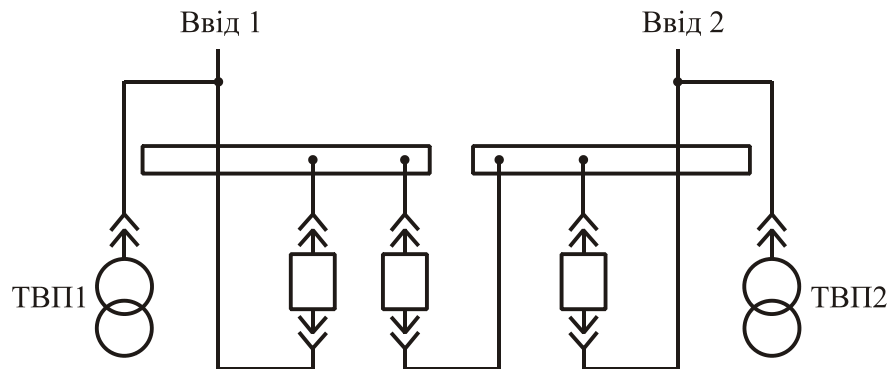


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{69,6^2 + 19^2} = 72,15 \text{ кВА}$$

$$S_p = K_c S_{уст} = 0,8 \cdot 72,15 = 57,72 \text{ кВА}$$

Обираємо ТМ-40/10.

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{57,72}{2 \cdot 40} = 0,72$$

протиаварійної автоматики. Крім того, під час проектування обов'язково враховується необхідність дублювання основних функцій на випадок раптової відмови апаратних або ж програмних компонентів мікропроцесорного обчислювального блоку.

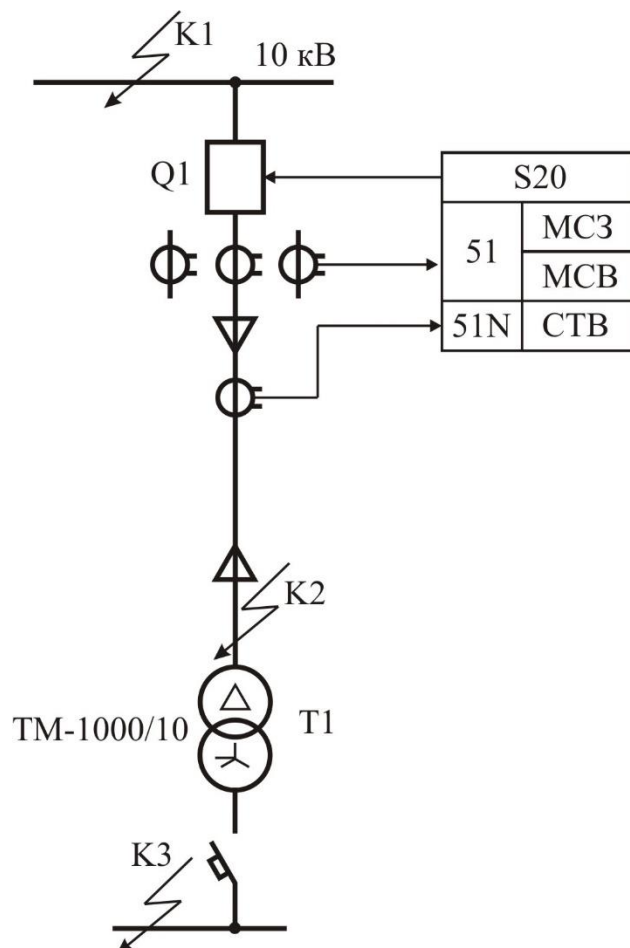


Рис. 7.1. Принципова конфігурація захисної автоматики ТМ-1000

Головний енергетичний перетворювач Т комутується з місцевою розподільчою системою за допомогою високовольного комутатора Q1, після якого безпосередньо прокладено магістраль КЛ. З метою гарантування безпечної та безперебійної роботи трансформаторного вузла, на боці вищої напруги змонтовано комутаційний пристрій автоматичного зведення QF1. Даний силовий вимикач оснащено інноваційними вакуумними або елегазовими дугогасними камерами, що дає змогу практично миттєво розривати замкнене коло при виникненні аварійних перетікань, які перевищують встановлені норми.

Застосування сучасних мікропроцесорних реле, які фізично підключені до управління QF1, дозволяє ефективно реалізувати миттєву струмову відсічку, впровадити максимальний струмовий захист із залежною витримкою часу, а також налагодити строгий газовий і тепловий контроль, утворюючи таким чином міцний багатоступеневий бар'єр проти будь-яких ненормальних режимів.

З метою практичного впровадження високонадійного комплексу протиаварійної автоматики, призначеного для забезпечення функціонування силового трансформатора ТМ-1000 та відповідної живильної кабельної магістралі, у якості головного обчислювального модуля було прийнято рішення застосувати інтелектуальний термінал Sepam 20. Даний мікропроцесорний пристрій розроблено та серійно випускається провідним електротехнічним концерном Schneider Electric. Вибір саме цього апаратного забезпечення обґрунтовується його доведеною експлуатаційною стійкістю, розширеними можливостями інтеграції до сучасних систем диспетчерського управління, а також наявністю повного спектра необхідних алгоритмів реагування на ненормальні режими роботи електромережі 10 кВ. Конструктивне виконання та загальна візуальна конфігурація лицьової панелі зазначеного електронного апарата наочно продемонстровані нижче на графічному зображенні 7.2.



Рис. 7.2. Візуальне представлення фронтальної панелі терміналу
Sepam 20

Проектування алгоритму максимального струмового захисту для трансформаторного агрегату Т1 вимагає глибокого аналізу питань селективності. Дана захисна функція покликана своєчасно ліквідувати наслідки неприпустимих теплових перевантажень, а також генерувати керівні сигнали на гарантоване відключення (шляхом дії струмової відсічки без додаткової затримки часу) та вибіркове усунення пошкоджень (через відсічку з наперед заданою витримкою). Критично важливою умовою коректної роботи всього протиаварійного комплексу є абсолютно точне узгодження часострумових характеристик (ЧСХ) обраного релейного терміналу з параметрами спрацювання мікропроцесорного розціплювача типу Micrologic 5.0. Останній конструктивно інтегрований у низьковольтний автоматичний вимикач маркування QF1, що розташований на стороні 0,4 кВ. Необхідна координація захисних апаратів досягається шляхом ретельного математичного моделювання аварійних режимів та побудови відповідних карт селективності, що унеможливорює хибні відключення неушкоджених ділянок.

З метою забезпечення безперебійного функціонування електротехнічного комплексу, критично важливо здійснити глибокий аналіз та точне налаштування параметрів спрацювання мікропроцесорних терміналів. Захист від неприпустимих теплових перевантажень відіграє фундаментальну роль у подовженні життєвого циклу ізоляційних матеріалів силового обладнання. Тривале протікання надструмів неминуче призводить до прискореного старіння діелектриків, що, у свою чергу, суттєво підвищує ймовірність виникнення міжвиткових замикань або пробоїв на корпус. Саме тому алгоритми релейної автоматики повинні чітко диференціювати короточасні експлуатаційні піки навантаження (наприклад, під час запуску потужних електродвигунів) від реальних аварійних режимів, які потребують негайного втручання.

У процесі математичного моделювання робочих процесів було визначено оптимальні уставки для різних рівнів напруги. Для досягнення максимальної точності розрахунків, усі часострумові показники узгоджувалися з технічними характеристиками комутаційних апаратів та термічною стійкістю кабельних

магістралей. Зведені результати аналітичного визначення координат для побудови характеристик реагування на перевантаження, з урахуванням необхідних поправочних коефіцієнтів, систематизовано у табличному вигляді нижче.

Таблиця 7.1. Модифіковані результати обчислення часострумівих характеристик (блок захисту від перевантажень)

Місце встановлення захисної апаратури	Базові струмові уставки, А/А	Розрахункові показники часу, с	Часові затримки спрацювання при різних кратностях струму I_r
Вимикач напругою 10 кВ	– 95,5 128,5 –	5,55 1280 10,2	– 2,4 258,0 (6450)
Ввідний вимикач 0,4 кВ	102,5 (2575) 95,3 (2360) 97,5 (2430) 10300 117,0 (2920)	1,25 4,1 с 585 (14,6) 6,1 10200 102,5 (2555)	1,08 72,0–103,0 146,0 3,65 $1,53 \cdot I_r$ 3,3–4,1 585,0 (14,6) $6,1 \cdot I_r$ 2,22–2,78 702,0 (17,6) $7,40 \cdot I_r$

Наступним важливим етапом проектування є організація другого ступеня протиаварійної автоматики – селективної струмової відсічки. Головна мета цього функціонального блоку полягає у вибіркового відключенні виключно тих сегментів електричної мережі, де безпосередньо сталося коротке замикання, зберігаючи при цьому живлення непошкоджених ділянок. Завдяки штучно введеній витримці часу, вищестоящі термінали очікують на ймовірне спрацювання нижчестоящих автоматів. Лише у випадку відмови останніх (або неспрацювання їхніх дугогасних камер) резервна автоматика генерує керівний імпульс на розрив кола.

Коректна координація уставок між трансформаторними вводами та відхідними лініями вимагає скрупульозного підходу до вибору інтервалів селективності. Недотримання цих інтервалів може призвести до каскадних відключень цілих розподільчих пристроїв підприємства, що є абсолютно

неприпустимим з точки зору надійності електропостачання споживачів першої та другої категорій.

Таблиця 7.2. Зведені дані розрахункових характеристик (блок селективної струмової відсічки)

Точка монтажу релейного пристрою	Струм спрацювання, А/кА	Струм надійної роботи, А/кА	Струм повернення, А/кА	Витримка часу, с	Додатковий час, с	Граничні значення, А/кА
Вимикач напругою 10 кВ	315,0 3,38	555,0 —	—	0,62	0,52	258,0 (6450)
Ввідний вимикач 0,4 кВ	315,0 (7,820) 3,38	390,0 (9,75) 350,0–428,0	0,238 (0,330)	0,31	—	— 8,780–10,720

Останнім і найбільш радикальним рубежем захисту силового обладнання є миттєва струмова відсічка. Вона розрахована на локалізацію надзвичайно потужних багатозафазних коротких замикань, які виникають безпосередньо поблизу джерела живлення або на виводах трансформатора. Такі аварійні процеси супроводжуються виділенням колосальної кількості теплової та електродинамічної енергії, здатної за лічені мілісекунди зруйнувати шинні мости, розплавити контактні з'єднання або навіть викликати пожежу чи вибух маслонаповнених апаратів.

Оскільки миттєва відсічка функціонує без жодної штучної затримки (час реагування визначається виключно власною швидкодією мікропроцесора та механікою приводу силового вимикача), її зона дії зазвичай не охоплює всю довжину лінії, що захищається. Вона налаштовується таким чином, щоб надійно ігнорувати замикання за спиною суміжних захисних пристроїв, діючи суто у своїй гарантованій зоні. Фінальні параметри налаштування цього критично важливого алгоритму для досліджуваної ділянки наведено в завершальній частині розрахунків.

Таблиця 7.3. Систематизовані результати визначення координат ЧСХ (блок миттєвої відсічки)

Місце розташування комутаційного апарата	Струмові межі 1, А/кА	Струмові межі 2, А/кА	Розрахунковий коефіцієнт	Уставка 1, А/кА	Уставка 2, кА	Уставка 3, А/кА
Вимикач 10 кВ	–	880,0	8,60	7,420	–	395,0
Ввідний вимикач 0,4 кВ	555,0–678,0 (13,85–16,95)	615,0 (15,4)	–	–	66,8	9,85

Проведення точного інженерного аналізу вимагає детального обчислення струмових навантажень. Визначення номінального струму для енергетичного перетворювача з повною потужністю 1000 кВА виконується з метою подальшого вибору адекватних параметрів спрацювання реле. Обчислення цього базового робочого показника базується на класичному співвідношенні переданої повної потужності до лінійної напруги мережі. Зауважимо, що правильне знаходження даної величини є абсолютно критичним етапом для уникнення хибних відключень терміналів під час нормальних експлуатаційних режимів роботи підстанції. Математично це виражається наступним чином:

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 59,5 \text{ А}$$

Наступним логічним кроком проектування виступає знаходження максимально допустимого робочого навантаження. Цей розрахунковий параметр враховує фізичну здатність силового трансформаторного обладнання витримувати певні регламентовані перевантаження протягом заданого проміжку часу без незворотної шкоди для ізоляційних матеріалів обмоток. Для врахування цього явища вводиться спеціальний коефіцієнт допустимого перевантаження. Відповідно, величина максимального струму для відповідного комутаційного апарата набуває такого вигляду:

$$I_{\text{роб.макс.Q2}} = K_{\text{пер}} \cdot I_{\text{ном}} = 1,63 \cdot 59,5 = 97,0 \text{ А}$$

Окремої і дуже прискіпливої уваги вимагає дослідження режиму масового самозапуску електродвигунів. Після короткочасного зникнення напруги живлення та її подальшого успішного відновлення (наприклад, внаслідок дії автоматичного включення резерву), паралельно підключені електричні машини починають одночасний розгін роторів. Це фізичне явище генерує надзвичайно великі пускові надструми в мережі, які, однак, не повинні викликати спрацювання алгоритмів відсічки. Аналітичне визначення сумарного коефіцієнта самозапуску для групи двигунів здійснюється за допомогою такої формули:

$$K_{\text{сзп}} = \frac{I'_{\text{роб.макс}} + I_{\text{пуск}}}{I_{\text{роб.макс}}} = \frac{51,5 + 285,5}{102,0} = 3,31$$

Спираючись на знайдене значення кратності перехідних пускових процесів, з'являється можливість точно оцінити абсолютну величину пікового струмового сплеску, що короткочасно протікатиме через головні контакти ввідного автоматичного вимикача Q2. Цей екстремальний електродинамічний показник слугує фундаментальним критерієм для остаточного налаштування селективної струмової відсічки. Завдяки йому гарантується блокування хибних команд на відключення під час процесів відновлення нормального електропостачання споживачів. Підсумкове значення амплітуди пікового струму розраховується так:

$$I_{\text{пik.Q2}} = K_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{роб.макс.Q2}} = 3,31 \cdot 97,0 = 321,1 \text{ А}$$

7.2 Організація релейного захисту силового трансформатора

Функціонування потужного трансформаторного агрегату маркування ТМ-1000/10 вимагає обов'язкового впровадження багатоступеневої системи запобігання аварійним ситуаціям. Згідно з вимогами до надійності електропостачання, на високовольтній стороні передбачається інтеграція наступного спектра протиаварійних алгоритмів:

						Арк.
						50

- функція блокування неприпустимих теплових перевантажень;
- струмова відсічка без штучної затримки спрацювання (миттєвої дії);
- резервна струмова відсічка із наперед заданим інтервалом селективності;
- технологічний газовий контроль внутрішнього стану маслonaповненого бака.

Варто наголосити, що кожна із перелічених вище апаратних функцій характеризується унікальними принципами реагування та індивідуальними алгоритмами налаштування. Їхня спільна скоординована взаємодія створює суцільний ешелонований бар'єр, який гарантує тривалу, безперебійну та максимально безпечну експлуатацію дороговартісного електричного обладнання в умовах мінливих графіків навантаження промислової мережі.

7.2.1. Алгоритм захисту силового трансформатора від струмів перевантаження. З метою реалізації максимально ефективного запобігання термічному пошкодженню та передчасному старінню ізоляції обмоток, проектом обґрунтовано застосування типових інверсних часострумових характеристик (ЧСХ), де швидкість реагування знаходиться в оберненій залежності від величини виміряного струму. Застосування саме такого математичного закону надає можливість ідеально узгодити криві спрацювання мікропроцесорного високовольтного термінала з відповідними параметрами розціплювача низьковольтного комутаційного апарата QF1. Фізичний процес поступового нагрівання струмопровідних частин вимагає адаптивного підходу: чим значніше поточне перевищення номіналу, тим оперативніше реле зобов'язане згенерувати імпульс на розрив головних контактів.

Аналітичне визначення оптимального порогу спрацювання для блоку контролю перевантажень на вводах високої напруги базується на паралельному розрахунку трьох критичних умов, з яких для фінального програмування термінала завжди обирається найбільший показник. Першочерговим і фундаментальним критерієм є надійна відстройка пускового органу від амплітудних значень максимального робочого струму підстанції під час тривалих експлуатаційних максимумів.

Беручи до уваги той беззаперечний електротехнічний факт, що зведена величина навантаження на стороні вищої напруги $I_{\text{роб.макс}}^{\text{ВН}}$ та приведена через коефіцієнт трансформації величина струму низької напруги $\frac{I_{\text{роб.макс}}^{\text{НН}}}{K_U}$ є абсолютно тотожними з позиції балансу переданої потужності, базова уставка струму I_S^D (відповідного релейного вимірювального органу) обов'язково повинна бути селективно відстроєна від порогів спрацювання модуля захисту від перевантажень ввідного автомата QF1. Реалізація подібного ієрархічного підходу стовідсотково виключає ризик неселективного знеструмлення всього трансформаторного вузла у разі виникнення локальних експлуатаційних перевантажень виключно на відхідних фідерних лініях нижчого класу напруги.

Розрахункова величина струму реагування для мікропроцесорного термінала повинна відповідати низці строгих математичних критеріїв. Першою фундаментальною умовою є надійна відстройка від максимального експлуатаційного навантаження підстанції. При цьому обов'язково враховуються коефіцієнт надійності та струм повернення вимірювального органу:

$$I_{r.Q2} \geq \frac{K_B}{K_{HO}} \cdot I_{\text{роб.макс}} = \frac{1,04}{0,940} \cdot 95,0 = 105,5 \text{ A}$$

Другою обов'язковою вимогою є абсолютне узгодження з параметрами комутаційних апаратів низької напруги. У цьому випадку розрахунок ведеться з урахуванням коефіцієнта трансформації силового агрегату:

$$I_{r.Q2} \geq \frac{1,32 \cdot 2410,0}{25} = 127,0 \text{ A}$$

Наступним етапом аналізу виступає виконання додаткового верифікаційного розрахунку. Ця процедура гарантує, що амплітуда струму ініціалізації високовольтного захисного алгоритму коректно скоординована з установками низьковольтних розчіплювачів. Вкрай важливо брати до уваги технологічний

розкид фабричних параметрів спрацювання обладнання QF1 (так звану зону невпевненої роботи). Гранична величина струмового навантаження, з поправкою на ці інструментальні відхилення та похибки вимірювальних трансформаторів, обчислюється таким чином:

$$I_d = 1,21 \cdot \frac{I_{r.QF1}}{K_U} = 1,21 \cdot \frac{2410,0}{25} = 116,6 \text{ A}$$

Струмовий поріг реагування релейного модуля зобов'язаний бути суворо більшим за розраховану величину I_d . До цього результату обов'язково додається певний експлуатаційний запас, що нівелює внутрішні апаратні похибки термінала на стороні ВН. Заводська технічна специфікація мікропроцесорної платформи Seram регламентує власну похибку цифрових вимірювань у діапазоні 1–3 %. З метою забезпечення абсолютної надійності селективного функціонування комплексу, ми приймаємо розширений коефіцієнт безпеки на рівні 11 %. За таких вихідних даних, мінімально допустима уставка дорівнюватиме:

$$I_{r.Q2} \geq 1,11 \cdot 116,6 = 129,5 \text{ A}$$

Підсумовуючи результати трьох вищезазначених аналітичних перевірок, для остаточного програмування цифрового пристрою завжди обирається найбільший із знайдених показників. Такий підхід унеможливорює несанкціоновані спрацювання автоматики під час штатних коливань потужності. Отже, фінальна уставка для блоку контролю перевантажень становить:

$$I_S = 129,5 \text{ A}$$

Крім основної функції, алгоритм максимального струмового захисту зобов'язаний виконувати роль повноцінного резервування на випадок відмови апаратури нижчих рівнів. Це зумовлює гостру необхідність виконання

						Арк.
						53

перевірочного розрахунку на чутливість до несиметричних коротких замикань на низьковольтній стороні агрегату Т1. Згідно з класичною теорією перехідних процесів, у промислових мережах із глухозаземленою нейтраллю величина струму при двофазному металевому замиканні є суттєво нижчою за показники трифазного пошкодження в мінімальних режимах роботи енергосистеми. Саме тому двофазне КЗ береться за розрахунковий базис.

Враховуючи специфіку з'єднання обмоток головного перетворювача Т1 за схемою «трикутник-зірка з виведеною нейтраллю», а також комутацію високовольтних вимірювальних трансформаторів струму в конфігурацію повної зірки, розподіл струмів набуває специфічного характеру. Відповідний коефіцієнт чутливості (де ліквідовано математичну неточність попередніх обчислень) визначається за спеціалізованим виразом:

$$K_{ч.зп} = \frac{2 \cdot I_{2(ж)}^{(2)к.мін}}{3 \cdot K_U \cdot I_{сп}} = \frac{2 \cdot 6450,0}{3 \cdot 25 \cdot 129,5} = 1,33 < 3,0$$

Спираючись на одержаний аналітичний результат, формується однозначний технічний висновок. Запроектований ступінь захисту від теплових перевантажень характеризується недостатньою чутливістю до віддалених двофазних коротких замикань на системі збірних шин 0,4 кВ. Цей факт категорично вимагає подальшого застосування спеціалізованих ступенів струмової відсічки, або ж впровадження оптоволоконного дугового захисту в комірках нижчої напруги для ефективної компенсації виявленого недоліку.

Всі подальші систематизовані результати визначення координат для побудови часострумової кривої даного релейного модуля, який фізично інстальований на високовольтному вимикачі Q2, детально зведено до інтегрованої форми.

Для забезпечення максимально адекватної реакції мікропроцесорного термінала на різні за ступенем тяжкості та тривалістю аварійні режими, необхідно здійснити обґрунтований вибір оптимального типу кривої. Відповідно до

міжнародних стандартів, залежність часу спрацювання реле від кратності протікаючого струму описується спеціальними математичними функціями. У нашому дослідженні для побудови карти селективності детально розглядаються два класичні сімейства характеристик: нормально інверсна (SIT – Standard Inverse Time) та сильно інверсна (VIT – Very Inverse Time).

Ступінь крутизни кожної з наведених кривих жорстко регламентується базовим показником ступеня α та відповідним постійним множником K . Застосування сильно інверсної залежності VIT дозволяє отримати значно більше прискорення відключення при високих кратностях короткого замикання, що є вкрай корисним для захисту термічно чутливого обладнання. Натомість стандартна функція SIT демонструє більш пологі траєкторію, забезпечуючи кращі умови для узгодження з нижчестоящими апаратами в зонах помірних перевантажень.

У процесі аналітичного моделювання всі координатні точки були перераховані з урахуванням уточненої базової уставки I_S , яка тепер становить 129,5 А. Для наочності та зручності подальшого програмування логічного контролера, розрахункові значення систематизовано у вигляді двох взаємопов'язаних табличних масивів. У першому згруповано фундаментальні константи рівнянь, а в другому – безпосередні часові затримки для широкого спектра струмів (від незначних 10-відсоткових відхилень до десятикратних аварійних сплесків).

Таблиця 7.4. Базові математичні константи та параметри узгодження інверсних залежностей

Тип застосованої ЧСХ	Показник кривизни α	Масштабний коефіцієнт K	Базовий струм уставки, А	Додаткова витримка t , с	Струм точки узгодження, А	Час точки узгодження, с
VIT (сильно інверсна)	1,00	13,77	129,5	10,5	1,78	3,40
SIT (нормально інверсна)	0,02	0,144	129,5	10,5	1,82	3,40

Динаміка зменшення часу очікування терміналу при зростанні аварійного струму наочно демонструє принципову різницю між обраними математичними моделями. Збільшення амплітуди надструму призводить до асимптотичного

наближення швидкодії до її механічної межі. Усі розраховані часові інтервали для обох кривих наведено нижче.

Таблиця 7.5. Динаміка зміни розрахункового часу реагування залежно від кратності струмового навантаження

Тип ЧСХ	Час (с) при 1,10 в.о. (142,5 А)	Час (с) при 1,20 в.о. (155,4 А)	Час (с) при 1,50 в.о. (194,3 А)	Час (с) при 2,50 в.о. (323,8 А)	Час (с) при 5,00 в.о. (647,5 А)	Час (с) при 5,30 в.о. (686,4 А)	Час (с) при 10,0 в.о. (1295,0 А)
VIT	285,50	142,30	57,10	19,00	7,20	6,70	3,20
SIT	134,20	70,10	31,50	13,90	7,80	7,60	5,50

Аналізуючи зведені координати, можна дійти об'єктивного висновку, що в зоні малих відхилень (до 1,50 відносних одиниць) характеристика VIT формує значно довші затримки (аж до 285,50 секунд), дозволяючи силовому трансформатору безпечно долати пускові режими. Однак, при виникненні серйозних пошкоджень з кратністю 10,0 в.о., саме ця функція гарантує більш стрімке відключення (за 3,20 секунди проти 5,50 секунд у SIT-кривої). Отже, для досліджуваного об'єкта найбільш раціональним є використання саме сильно інверсного алгоритму.

Фінальним і найбільш наочним етапом перевірки правильності обраних уставок є їхнє графічне зведення на єдину координатну площину з логарифмічним масштабом осей. Отримана в результаті комп'ютерного моделювання просторова візуалізація узгодження кривих реагування для всіх задіяних комутаційних апаратів продемонстрована на графіку нижче.

Детальний інженерний аналіз наведеного візуального матеріалу (рис. 7.3) дозволяє ідентифікувати критичну проблему у разі використання стандартної нормально інверсної кривої.

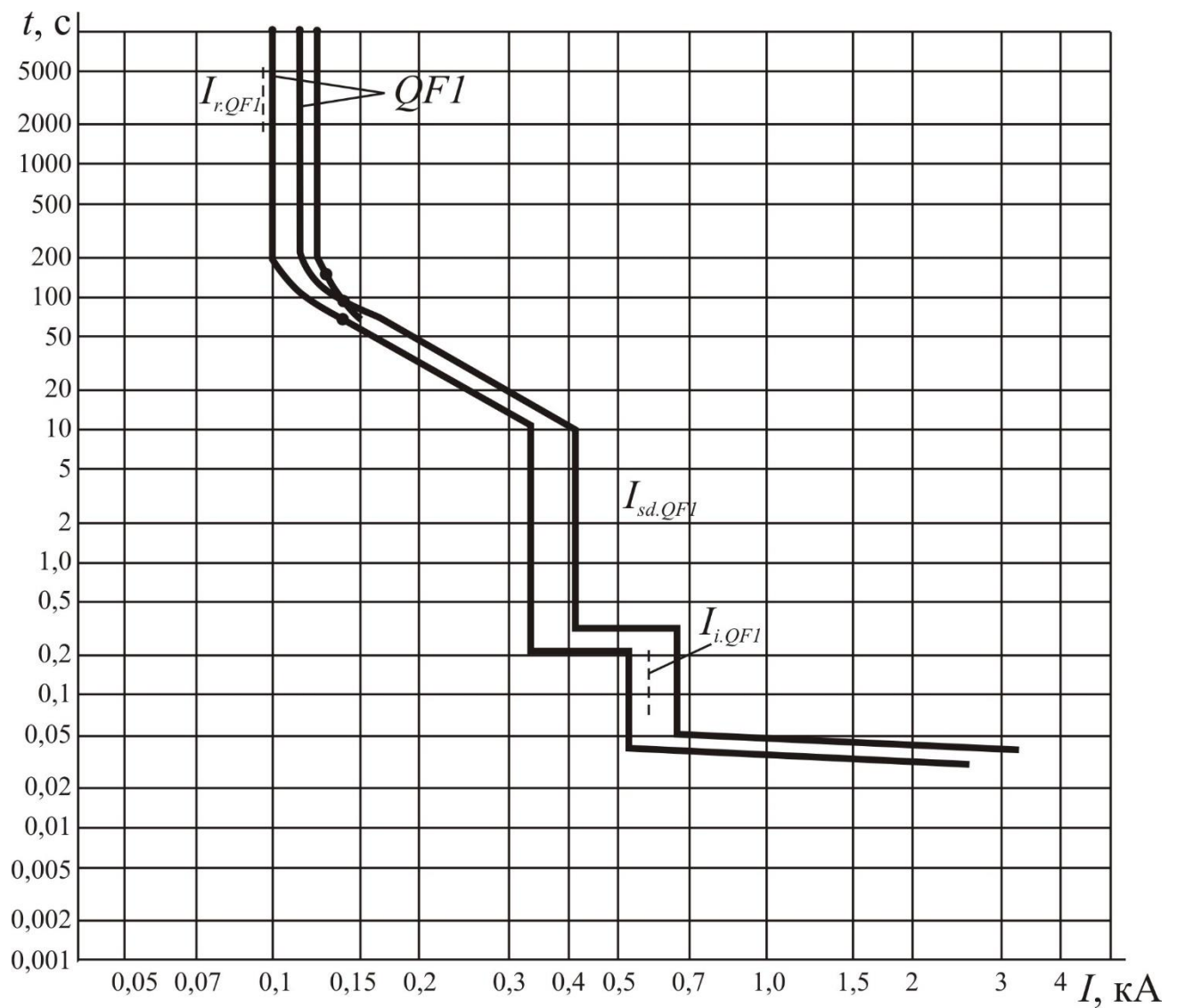


Рис. 7.3. Узагальнена карта селективного узгодження часострумових параметрів релейної апаратури

Геометрична траєкторія графіка захисту від теплових перевантажень типу SIT, що гіпотетично запрограмований у мікропроцесорному обчислювальному модулі високовольтного вимикача Q2, фізично накладається та перетинає криву реагування розчіплювача низьковольтного автомата QF1.

З точки зору надійності функціонування системи електропостачання, такий перетин є категорично неприпустимим. Даний факт є прямим математичним свідченням того, що фундаментальний принцип каскадної (ієрархічної) селективності між ступенями протиаварійної автоматики на сторонах вищої та нижчої напруги силового перетворювального агрегату грубо порушується. У реальних експлуатаційних умовах підприємства це неминуче призвело б до

небезпечної ситуації: навіть незначне перевантаження на одній з відхідних ліній 0,4 кВ могло б викликати хибне і передчасне відключення головного живильного трансформатора, миттєво знеструмивши абсолютно всіх підключених споживачів.

Беручи до уваги виявлену графічну невідповідність, єдиним технічно обґрунтованим рішенням є повна відмова від SIT-функції на користь застосування залежної характеристики типу VIT. Ця сильно інверсна математична модель вирізняється значно більшою крутизною нахилу свого графіка. Завдяки яскраво вираженій нелінійній оберненій залежності затримки часу від амплітуди протікаючого надструму, VIT-крива гарантовано проходить вище зони спрацювання апарата QF1, забезпечуючи необхідний безпечний інтервал (так звану «сходінку селективності») для правильної почергової роботи автоматики. Функціонування цього алгоритму базується на уточнених апроксимуючих константах: показник кривизни $\alpha = 1,02$, а інтегральний масштабуючий множник приймається на рівні $K = 13,85$.

Всі зведені підсумки обчислення необхідних числових координат для безпомилкового налаштування саме цієї оптимальної сильно інверсної кривої у пам'яті термінала були завчасно систематизовані та детально викладені у зведеній таблиці 7.4 попереднього підрозділу.

7.2.2. Розрахунок селективної струмової відсічки. Наступним критично важливим кроком побудови безвідмовної системи протиаварійної автоматики є детальний розрахунок параметрів спрацювання резервної відсічки із заданою часовою затримкою. Цей захисний функціонал призначений для оперативного виявлення та ізоляції пошкоджених ділянок, гарантуючи при цьому необхідний рівень вибіркової дії апаратури. У процесі аналітичного визначення оптимальної струмової уставки для даного блоку, інженери-проектувальники жорстко керуються двома фундаментальними математичними критеріями. З метою унеможливлення несанкціонованих відключень, для остаточного програмування мікропроцесорного термінала завжди обирається найбільше з розрахованих значень.

Перша базова умова полягає у необхідності стовідсоткового відлаштування вимірювального органу від максимальних пікових надструмів, які виникають на високовольтних вводах перетворювача під час експлуатаційних перехідних процесів (наприклад, при масовому самозапуску підключених електричних машин). Для забезпечення стабільної роботи застосовується спеціальний коефіцієнт запасу, а також враховується похибка повернення реле:

$$I_{C.CB} = I_{sd.Q2} \geq \frac{K_{H.O}}{K_B} \cdot I_{пик}^{BH} = \frac{1,12}{0,945} \cdot 315,0 = 373,3 \text{ A}$$

У наведеній вище формулі параметр $I_{пик}^{BH} = 315,0 \text{ A}$ репрезентує уточнену амплітуду пікового викиду силового трансформатора Т1 з боку живлення 10 кВ; тоді як $K_{H.O} = 1,12$ виступає стандартизованим коефіцієнтом експлуатаційної надійності відлаштування.

Другою, не менш критичною вимогою, є абсолютна координація чутливості високовольтного пристрою з аналогічним ступенем контролю, що конструктивно інтегрований у низьковольтний автоматичний вимикач маркування QF1. Саме ця просторова узгодженість формує правильну ієрархічну послідовність спрацювання всього комплексу. Відповідне аналітичне співвідношення, що враховує коефіцієнт надійності узгодження $K_{H.yзг}$, набуває такого вигляду:

$$I_{C.CB} = I_{sd.Q2} \geq K_{H.yзг} \cdot \frac{I_{sd.QF1}}{K_U} = 1,32 \cdot \frac{10700,0}{25} = 565,0 \text{ A}$$

Здійснивши порівняльний аналіз двох обчислених величин (373,3 А та 565,0 А), для практичної реалізації та внесення у незалежну пам'ять релейного модуля Q2 ми остаточно приймаємо максимальний показник. Отже, фінальний розрахунковий струм ініціалізації резервного селективного ступеня становить: $I_{sd.Q2} = 565,0 \text{ A}$.

Окремим обов'язковим етапом інженерного проектування є верифікація обраної уставки на предмет наявності достатньої чутливості. Дана процедура

						Арк.
						59

передбачає оцінку здатності реле гарантовано розпізнавати аварійний режим під час виникнення металевого двофазного замикання безпосередньо на виводах 0,4 кВ в умовах найменшої генерації струму системою. Відповідний коефіцієнт чутливості обчислюється за класичним електротехнічним виразом:

$$K_{ч.СО} = \frac{2 \cdot I^{(2)к.мін}}{3 \cdot K_U \cdot I_{с.св}} = \frac{2 \cdot 6450,0}{3 \cdot 25 \cdot 565,0} = 0,30 < K_{ч.св.доп} = 1,50$$

У цьому рівнянні K_U означає номінальний коефіцієнт трансформації досліджуваного енергетичного агрегату; параметр $I^{(2)к.мін}$ відображає мінімально можливе значення амплітуди двофазного КЗ на системі нижчої напруги; а $I_{с.св}$ є прийнятою до використання уставкою реагування.

Зважаючи на той факт, що отриманий аналітичний результат (0,30) є критично меншим за нормативне регламентоване значення (1,50), формулюється однозначний технічний висновок. Запроектований рівень селективної відсічки абсолютно не реагує на мінімальні струми віддалених двофазних коротких замикань на збірних шинах 0,4 кВ трансформаторної підстанції. Це доводить її виключно локальне призначення.

Для бездоганного забезпечення часової вибіркової, швидкості ліквідації пошкодження даним алгоритмом повинна бути штучно сповільнена. Витримка часу високовольтного термінала обов'язково формується на один стандартний ступінь (Δt) вищою, порівняно з ініціалізацією попереднього апарата QF1. Кінцеве значення затримки розраховується так:

$$t_{sd.Q2} = t_{sd.QF1} + \Delta t = 0,31 + 0,31 = 0,62 \text{ с}$$

7.2.3. Алгоритм миттєвої струмової відсічки. Останнім і найпотужнішим рубежем оборони енергетичного обладнання є захист від надструмів без штучної затримки в часі. Головне завдання цього функціонального блоку полягає в ультрашвидкій локалізації катастрофічних пошкоджень, здатних за лічені

						Арк.
						60

мілісекунди зруйнувати силовий перетворювач через колосальні електродинамічні зусилля та критичний перегрів обмоток. Визначення остаточної величини реагування для мікропроцесорного термінала ($I_{C.MB}$) здійснюється шляхом паралельного обчислення трьох базових інженерних умов. Для забезпечення безперебійності електропостачання та уникнення хибних дій автоматики, фінальною уставкою завжди призначається найбільший із знайдених результатів.

Першим фундаментальним критерієм виступає гарантоване нереагування високовольтного реле на струми наскрізних трифазних коротких замикань, які виникають безпосередньо на збірних шинах 0,4 кВ трансформатора Т1. Такий підхід виключає неселективну роботу при пошкодженнях поза зоною відповідальності даного апарата. Математично ця умова описується так:

$$I_{C.MB} = I_{i.Q2} \geq \frac{K_{H.B} \cdot I_{K.Макс}^{(3)}}{K_U} = \frac{1,18 \cdot 9850,0}{25} = 465,0 \text{ А}$$

У наведеному рівнянні параметр $K_{H.B} = 1,18$ являє собою стандартизований коефіцієнт експлуатаційної надійності для відсічок; а $I_{K.Макс}^{(3)} = 9850,0 \text{ А}$ – це уточнена розрахункова амплітуда найтяжчого трифазного замикання.

Другою, надзвичайно важливою вимогою є абсолютна стійкість захисту до перехідних процесів у магнітопроводі. Під час подачі напруги на ненавантажений трансформатор (його ввімкнення під робочу напругу) виникають так звані кидки струму намагнічування. Ці пускові надструми містять значну аперіодичну складову і можуть у кілька разів перевищувати номінал, що часто стає причиною помилкових відключень. Відповідна уставка, що блокує реакцію на цей фізичний феномен, визначається за формулою:

$$I_{C.MB} = I_{i.Q2} \geq I_{нам} = K_{відл} \cdot I_{ТН}^{ВН} = 3,1 \cdot 59,5 = 184,5 \text{ А}$$

Тут коефіцієнт $K_{\text{вдл}} = 3,1$ враховує специфіку амплітуди кидка намагнічування для магнітопроводів, виготовлених із сучасної холоднокатаної сталі.

Третій розрахунковий крок передбачає жорстку просторову координацію алгоритму з параметрами миттєвого спрацювання низьковольтного автоматичного вимикача QF1. Дана ієрархічна узгодженість є ключем до правильного каскадного відключення аварійних ділянок:

$$I_{\text{С.МВ}} = I_{i.Q2} \geq \frac{K_{\text{н.узг}} \cdot I_{i.QF1}}{K_U} = \frac{1,33 \cdot 16800,0}{25} = 894,0 \text{ А}$$

У цьому виразі для забезпечення вибіркової дії прийнято коефіцієнт надійності узгодження $K_{\text{н.узг}} = 1,33$.

Проаналізувавши всі три отримані показники, інженери-проектувальники обирають найвище значення. Таким чином, остаточний струм спрацювання безвитримкової фази дорівнюватиме: $I_{\text{С.МВ}} = 894,0 \text{ А}$.

Обов'язковим завершальним етапом аналізу є перевірка обраного параметра на достатність чутливості. Головна мета – переконатися, що реле гарантовано відчує металеве пошкодження в межах своєї зони (на вводах 10 кВ агрегату Т1). Для цього використовується найменш сприятливий сценарій – двофазне коротке замикання у період мінімальної генерації потужності живильною енергосистемою:

$$K_{\text{ч.МВ}} = \frac{I_{\text{к.мін}}^{(2)}}{I_{\text{С.МВ}}} = \frac{7450,0}{894,0} = 8,33 > K_{\text{ч.МВ,доп}} = 2,0$$

Оскільки обчислений показник (8,33) багаторазово перевершує нормативно допустимий рубіж згідно з ПУЕ (2,0), ми формулюємо безапеляційний висновок. Запрограмована миттєва відсічка володіє ідеальною чутливістю і стовідсотково зафіксує будь-яке міжфазне пошкодження на високовольтних клеммах енергетичного агрегату.

За своєю природою миттєва відсічка є повністю незалежною функцією. Вона не має прив'язки до логарифмічних часових кривих, а її головна місія – блискавична ліквідація руйнівних пробойів ізоляції. Водночас технічно "нульової" витримки не існує: загальний час реагування обмежується виключно швидкодією центрального процесора реле та механічною інерцією приводу силового комутатора. На практиці ця мінімальна апаратна затримка становить приблизно 55 мс.

Всі підсумкові координати та параметри інтеграції цього захисного ступеня для агрегату Т1 були використані для побудови повної карти селективності, що наочно продемонстровано раніше на графіку (рис. 7.3).

7.2.4. Газовий захист силового трансформатора. Відповідно до чинних нормативних регламентів Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), впровадження системи газового контролю є категорично обов'язковим для певних категорій енергетичних установок. Зокрема, такі комплекси неодмінно монтуються на знижувальних підстанціях внутрішньоцехового базування, якщо їхня номінальна розрахункова потужність сягає або перевищує 630 кВА. Для агрегатів зовнішнього розміщення та іншого технологічного призначення цей обов'язковий поріг встановлено на рівні 1000 кВА та вище. Суворість цих вимог продиктована надзвичайно високою пожежною небезпекою великих об'ємів ізоляційної рідини.

Фундаментальне призначення даного апаратного комплексу полягає у надійному убезпеченні силового перетворювача від різноманітних прихованих внутрішніх дефектів. Такі пошкодження зазвичай супроводжуються інтенсивною генерацією газових сумішей внаслідок термічної деградації вуглеводневого трансформаторного масла. Крім того, релейна апаратура здійснює безперервний моніторинг наявності охолоджувача, миттєво фіксуючи будь-які несанкціоновані спади його рівня в герметичному резервуарі.

У процесі виникнення та розвитку внутрішніх аварійних режимів, що характеризуються наявністю високоенергетичного дугового розряду (наприклад, при міжвиткових коротких замиканнях, пробоях високовольної ізоляції на заземлений металевий корпус бака, або ж внаслідок локального перегріву шихтованого магнітопровода), відбувається інтенсивний хімічний розклад рідкого

діелектрика. Цей деструктивний фізико-хімічний процес вивільняє колосальні обсяги теплової енергії та провокує бурхливе утворення вибухонебезпечних газів, таких як водень та метан.

В енергетичних установках маркування ТМ інтенсивне газоутворення створює надлишковий тиск, який витісняє охолоджуючу рідину разом із газовими бульбашками у спеціальну компенсаційну ємність – розширювач. Проте, за умови порушення цілісності конструкції (пробиття стінок основного бака, розрив зварних швів на радіаторах охолодження, втрата герметичності запірної арматури), виникає неконтрольований витік масла назовні. Як наслідок, гідростатичний рівень діелектрика стрімко падає, і розширювач повністю спорожнюється.

Головним вимірювальним сенсором цієї протиаварійної системи виступає спеціалізоване газове реле (на принципових схемах позначається індексом KSG). Конструктивно воно завжди монтується у похилому з'єднувальному трубопроводі, який слугує магістраллю між основним об'ємом трансформаторного бака та його верхнім розширювачем. Візуальне оформлення та просторова конфігурація цього пристрою наведені нижче.

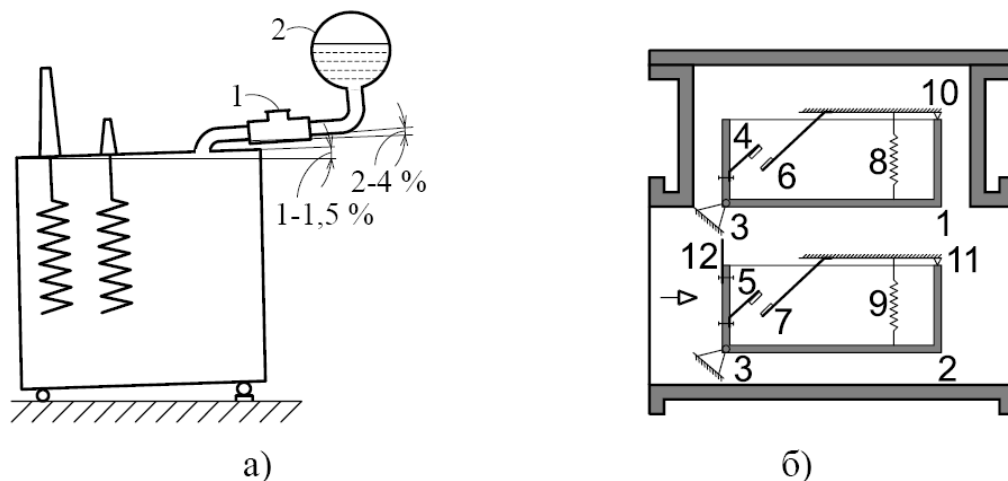


Рис. 7.4. Конструктивна схема та принцип дії класичного газового реле

Кінематика функціонування пристрою базується на законі Архімеда. У випадку розгерметизації та витікання діелектрика, порожнина релейного апарата також спорожнюється. Це провокує гравітаційне опускання двох рухомих поплавцевих (чашоподібних) вузлів, які на графічному розрізі позначені позиціями

1 та 2 (дивіться ілюстрацію 7.4. б). Алгоритм спрацювання є строго послідовним. На першому етапі опускається верхній попереджувальний вузол 1, що призводить до механічного замикання контактної групи 4 та 6, формуючи відповідний тривожний сигнал на пульт диспетчера про початок позаштатної ситуації. Якщо ж деструктивний процес поглиблюється і витік охолоджувача продовжується, гранично низький рівень змушує опуститися нижній відключаючий елемент 2. Це ініціює контактне з'єднання клем 5 і 7, які безпосередньо інтегровані в оперативні кола живлення автоматики, спричиняючи миттєве знеструмлення всього агрегату з усіх боків.

Для безпосередньої інженерної реалізації описаного вище комплексу захисту силового трансформатора від внутрішніх пошкоджень, специфікацією проєкту передбачено використання сучасного струменевого реле маркування РСТ25 (яке ефективно реагує на різкі поштовхи потоку масла) у тандемі з надійним газовим блоком об'ємного типу РГТ-80.

7.3. Розрахунок релейного захисту кабельної лінії 10 кВ

Підземні системи передачі електроенергії є критично важливою артерією будь-якої промислової розподільчої мережі. Враховуючи специфіку їхнього прокладання та жорсткі умови експлуатації, ймовірність виникнення механічних пошкоджень ізоляції, пробіїв через природне старіння діелектрика або агресивний вплив ґрунтових вод залишається стабільно високою. Саме тому проєктування надійного та чутливого мікропроцесорного захисту вимагає особливої уваги до аналітичних обчислень.

7.3.1. Алгоритму селективного струмового захисту кабельної лінії із залежною витримкою часу. Використання релейних характеристик, де час очікування знаходиться в обернено пропорційній залежності від величини аварійного струму, дозволяє максимально раціонально використати термічну стійкість струмопровідних жил. Під час визначення базової уставки реагування для даного логічного апарата, інженери жорстко керуються принципом вибору

максимального значення з двох фундаментальних розрахункових умов. Це стовідсотково гарантує відсутність хибних дій комутаційного обладнання в нормальних та післяаварійних експлуатаційних режимах.

Перша аналітична умова вимагає беззаперечного відлаштування вимірювального комплексу магістралі від екстремальних пікових навантажень. Амплітуда максимального струмового сплеску на високовольтній стороні ($I_{\text{пik}}^{\text{BH}}$), яка неодмінно виникає в процесі масового паралельного самозапуску асинхронних електродвигунів з номіналом 380 В після короткочасної перерви електропостачання, обчислюється як прямий добуток коефіцієнта самозапуску на величину максимального робочого струму.

Запрограмована уставка пускового органу, з обов'язковою поправкою на коефіцієнт надійності повернення реле у вихідний стан (K_B), приймає наступний математичний вигляд:

$$I_{sd.Q1} = \frac{K_{н.о.}}{K_B} \cdot I_{\text{пik}}^{\text{BH}} = \frac{1,12}{0,945} \cdot 315,0 = 373,3 \text{ A}$$

Другим критичним критерієм проектування виступає ієрархічне узгодження параметрів. Струм ініціалізації аналізованого високовольтного кабельного захисту ($I_{\text{с.сз}}$) обов'язково повинен координуватися з показниками суміжного обладнання нижчого рівня. Зокрема, йдеться про уставки термінала ($I_{sd.Q2}$), який фізично змонтований безпосередньо на високовольтних вводах силового трансформаторного агрегату Т1. Застосування нормативного коефіцієнта запасу узгодження дозволяє сформулювати таку розрахункову нерівність:

$$I_{sd.Q1} \geq K_{н.узг} \cdot I_{sd.Q2} = 1,34 \cdot 565,0 = 757,1 \text{ A}$$

Здійснивши детальне порівняння двох знайдених величин (373,3 А та 757,1 А), для безпосереднього внесення в незалежну пам'ять головного мікропроцесорного модуля магістралі КЛ ми остаточно обираємо більший

показник. Таким чином, розрахункова робоча уставка фіксується на рівні: $I_{sd.Q1} = 757,1 \text{ А}$.

Для забезпечення правильної технологічної послідовності локалізації пошкоджень (дотримання принципу каскадної селективності), швидкість відключення головного вимикача лінії має бути штучно сповільнена. Фінальна часова затримка розраховується шляхом додавання стандартної сходинок селективності (Δt) до часу очікування апаратури суміжного трансформаторного вузла:

$$t_{sd.Q1} = t_{sd.Q2} + \Delta t = 0,62 + 0,31 = 0,93 \text{ с}$$

Наступним етапом є обов'язкова верифікація запроєктованого алгоритму на предмет достатньої чутливості у зоні своєї безпосередньої відповідальності. Перевірка виконується для найгіршого ймовірного сценарію – металевого двофазного короткого замикання в самому кінці підземної лінії (перед високовольтними клемми агрегату Т1) у період мінімального генерування потужності живильною енергосистемою. Відповідний розрахунковий коефіцієнт становить:

$$K_{ч.СЗ} = \frac{I_{к.мін}^{(2)}}{I_{sd.Q1}} = \frac{7450,0}{757,1} = 9,84 \geq K_{ч.доп} = 1,50$$

Крім свого основного призначення, аналізована релейна система зобов'язана виконувати вкрай важливу функцію далекого резервування. Це означає здатність виявляти та ліквідовувати аварії навіть за спиною суміжних нижчестоящих пристроїв – наприклад, на збірних шинах 0,4 кВ. Визначення відповідного резервного показника спирається на мінімальну величину струму пошкодження за трансформатором ($I_{к.мін}^{(2)} = 6450,0 \text{ А}$):

$$K_{ч.СЗ} = \frac{2 \cdot I_{к.мін}^{(2)}}{3 \cdot I_{sd.Q1} \cdot K_U} = \frac{2 \cdot 6450,0}{3 \cdot 757,1 \cdot 25} = 0,23 \leq K_{ч.доп} = 1,20$$

Глибокий інженерний аналіз отриманих математичних результатів дозволяє сформулювати однозначні висновки щодо ефективності системи. Основний селективний захист живильної кабельної лінії характеризується чудовим показником чутливості (9,84) у межах своєї прямої ділянки, що гарантує безвідмовне та швидке виявлення будь-яких міжфазних дефектів ізоляції. Проте, його здатність діяти як повноцінний дальній резерв виявилася вкрай низькою (показник 0,23 є критично меншим за жорстко регламентовану норму 1,20). Такий стан речей категорично вимагає проєктування автономних дугових захистів, або ж впровадження додаткових струмових ступенів безпосередньо на шинах нижчої напруги для компенсації цієї виявленої "сліпої зони".

Усі отримані числові координати для подальшого точного програмування кривої реагування мікропроцесорного термінала систематизовано та викладено у формі зведеної таблиці 7.1.

7.3.2. Миттєва струмова відсічка КЛ. Головним завданням цього швидкісного алгоритму є негайне припинення електропостачання у випадку виникнення надкритичних перевантажень, що продукуються ближніми короткими замиканнями. Аналітичне визначення базового параметра ініціалізації (величини струму спрацювання) для даного релейного модуля вимагає паралельного розв'язання трьох незалежних інженерних умов. З метою запобігання хибним діям автоматики під час штатної експлуатації, для остаточного налаштування термінала завжди приймається найвище з одержаних розрахункових значень.

Перша фундаментальна вимога полягає у необхідності надійного відлаштування пускового органу від наскрізних пошкоджень. Йдеться про струми, що генеруються під час трифазних металевих замикань безпосередньо на низьковольтних збірних шинах 0,4 кВ підключеного силового перетворювача. Це гарантує, що лінію не буде відключено, якщо аварія сталася за межами її зони відповідальності. Математичний вираз, який описує цю умову, обов'язково включає модифікований нормативний коефіцієнт надійності:

$$I_{с.мв. Q1} \geq \frac{K_{н.о} \cdot I_{к.макс}^{(3)}}{K_U} = \frac{1,18 \cdot 9850,0}{25,0} = 465,0 \text{ А}$$

Другим важливим експлуатаційним критерієм виступає ігнорування так званих пускових перехідних процесів. Коли трансформаторний агрегат вмикається під напругу (навіть без навантаження споживачами), у його сталевому магнітопроводі виникає потужний аперіодичний кидок струму намагнічування. Щоб запобігти помилковому знеструмленню магістралі в цей перехідний момент, уставка термінала повинна перевищувати амплітуду такого сплеску. Розрахунок виконується з використанням відповідного коефіцієнта:

$$I_{i.Q1} \geq I_{нам} = K_{відл} \cdot I_{т.ном} = 3,05 \cdot 58,5 = 178,4 \text{ А}$$

Третій, і часто визначальний, крок проєктування полягає у забезпеченні суворої просторової селективності. Параметри спрацювання кабельного мікропроцесорного пристрою зобов'язані бути ієрархічно скоординованими з аналогічними миттєвими алгоритмами, що функціонують на суміжних ділянках нижчого рівня (зокрема, на високовольтних вводах самого трансформатора). Застосування спеціального запасу узгодження формує таку нерівність:

$$I_{i.Q1} \geq K_{н.узг} \cdot I_{i.Q2} = 1,30 \cdot 894,0 = 1162,0 \text{ А}$$

Здійснивши глибокий порівняльний аналіз трьох знайдених аналітичних показників (465,0 А; 178,4 А та 1162,0 А), інженерна логіка диктує вибір максимального з них. Відповідно, фінальна регламентована уставка реагування для даного швидкісного ступеня фіксується на такому рівні:

$$I_{i.Q1} = 1162,0 \text{ А}$$

За своєю електротехнічною природою, цей алгоритм не має прив'язки до жодних часострумів кривих. Це означає, що його робота є абсолютно незалежною від поточного значення аварійного надструму, а відключення силового комутатора ініціюється практично миттєво (без будь-якої штучно введеної часової затримки).

Завершальною і обов'язковою процедурою є перевірка запроектованого вузла на предмет надійної реєстрації аварійних подій. Для цього обчислюється коефіцієнт чутливості при найбільш несприятливому сценарії – двофазному короткому замиканні на початку захищеної зони в умовах найменшої генеруючої здатності живильної енергосистеми. Визначимо це відношення:

$$K_{\text{ч.МВ}} = \frac{I_{\text{к.мін}}^{(2)}}{I_{\text{і.}Q1}} = \frac{10550,0}{1162,0} = 9,08 \geq K_{\text{ч.доп}} = 2,0$$

Оскільки розрахований індикатор (9,08) багаторазово перевершує мінімально допустимий рубіж, регламентований чинними нормами (2,0), формулюється однозначно позитивний висновок. Впроваджена відсічка миттєвої дії відзначається чудовою чутливістю та гарантовано ліквідує будь-які міжфазні пошкодження в межах підземної лінії 10 кВ.

Підсумкові координати всіх описаних вище ступенів протиаварійної автоматики були інтегровані в єдину комп'ютерну модель. Результат графічної координації їхньої взаємодії наочно продемонстровано на відповідному кресленні нижче.

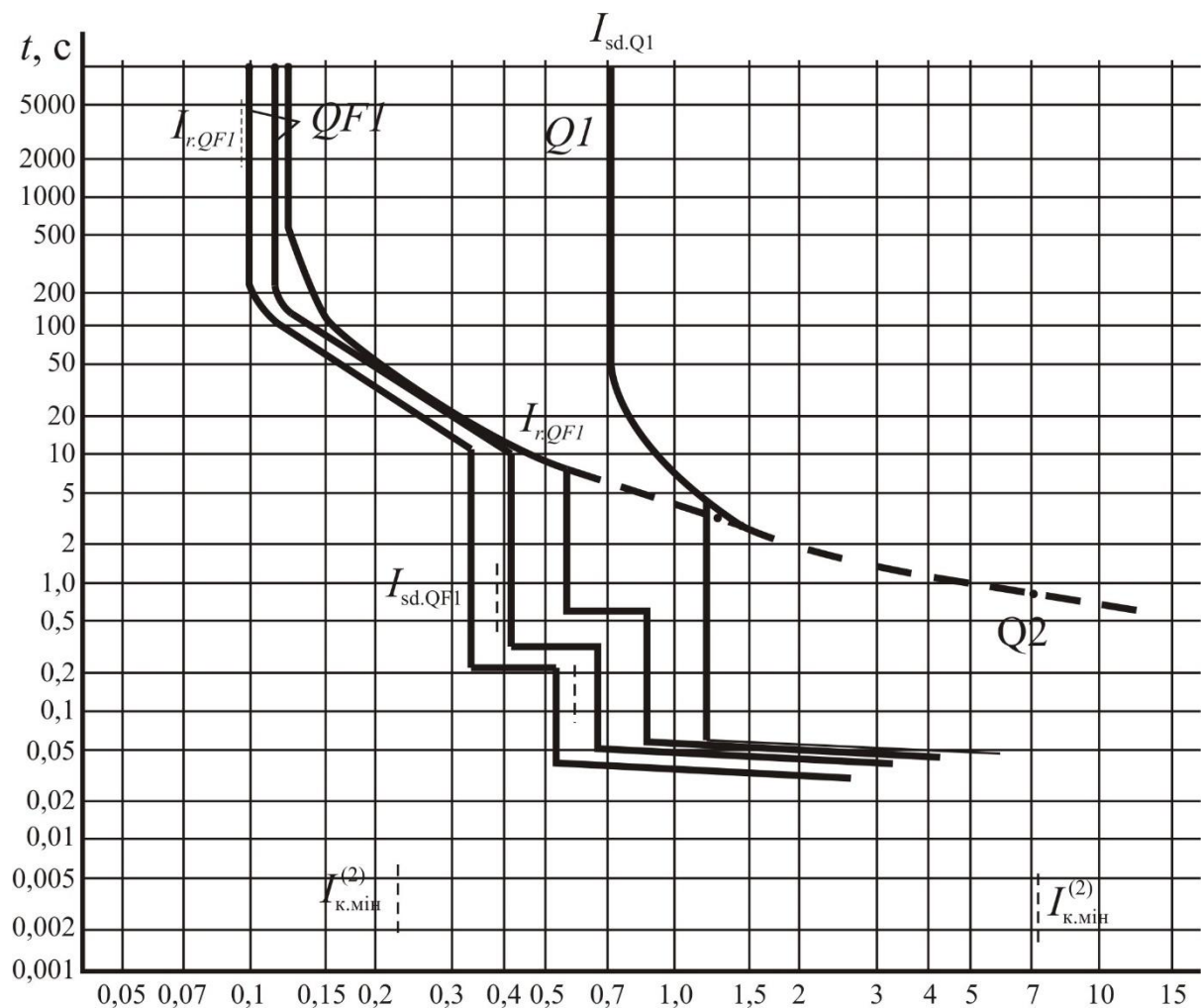


Рис. 7.5. Зведена візуальна карта узгодження параметрів релейної апаратури ТМ-1000 та живильної магістралі 10 кВ

7.3.3. Захист КЛ від однофазних замикань на землю. В електричних розподільчих мережах напругою 10 кВ, які традиційно функціонують із повністю ізольованою або ж компенсованою нейтраллю, однофазні замикання на землю (ОЗЗ) є найбільш розповсюдженим видом аварійних ситуацій. Специфіка такого пошкодження полягає в тому, що воно не призводить до виникнення класичного короткого замикання великої потужності, оскільки коло замикається виключно через розподілені ємності фаз відносно землі. Незважаючи на порівняно малі величини струмів, цей режим є вкрай небезпечним. Він провокує підвищення напруги на неушкоджених фазах до лінійних значень, а також супроводжується переривчастим горінням електричної дуги. Це викликає небезпечні високочастотні

перенапруги, здатні швидко зруйнувати ізоляцію іншого обладнання та перевести проблему у двофазне коротке замикання.

З метою надійного убезпечення підземної лінії від описаних деструктивних явищ, проектом передбачено застосування спеціалізованого струмового органу нульової послідовності. Даний алгоритм мікропроцесорного термінала функціонує із фіксованою (абсолютно незалежною від величини струму) часовою затримкою. Базовим вимірювальним елементом тут виступає трансформатор струму нульової послідовності (типу ТСНП), крізь вікно якого пропускаються всі три жили кабелю.

Для правильного налаштування автоматики першочергово необхідно розрахувати параметри мережі. Базова величина власного ємнісного навантаження конкретної ділянки обчислюється згідно з наступним математичним виразом:

$$I_{Ci} = I_{yDi} \cdot L_{KLi}$$

де L_{KLi} – геометрична довжина відповідної кабельної магістралі, виражена у кілометрах;

I_{yDi} – паспортний питомий струм ємнісного витoku обраної марки кабелю, розмірність якого становить А/км.

Загальний сумарний показник аварійного струмового перетікання для всієї електричної системи, що об'єднує певну кількість гальванічно зв'язаних відхідних ліній (позначимо їх загальну кількість індексом n), знаходиться шляхом алгебраїчного додавання:

$$I_{033} = \sum_{i=1}^n I_{Ci}$$

Критично важливою умовою налаштування є коректне відлаштування уставки реагування термінала від природного фонового ємнісного перетікання. Останнє постійно циркулює крізь вимірювальний трансформатор під час безперебійного функціонування об'єкта. Крім того, обов'язково враховується

специфіка дугових процесів, що генерують потужні короткочасні сплески амплітуди. Мінімальний допустимий поріг ініціалізації пристрою ($I_{C.3.КЛ}$) визначається так:

$$I_{C.3.КЛ} \geq K_{H.C.} \cdot K_{БР} \cdot I_{C.3П.I} = 1,22 \cdot 1,21 \cdot 0,332 = 0,490 \text{ А}$$

де $K_{БР} = 1,21$ – стандартизований поправочний множник, який нівелює вплив перехідних кидків струму під час виникнення нестабільного переривчастого дугового пробою;

$K_{H.C.} = 1,22$ – експлуатаційний коефіцієнт надійності спрацювання апаратури.

Завершальним кроком інженерного проєктування виступає верифікація обраної уставки на здатність гарантовано ідентифікувати аварію. Показник чутливості є відношенням реального струму підживлення пошкодження (сумарний показник мережі мінус власний витік пошкодженої ділянки) до встановленого порогу реагування реле. Виконаємо відповідну перевірку за оновленими уточненими даними:

$$K_{ч.КЛ} = \frac{I_{O33} - I_{C.3П.КЛ}}{I_{C.3.КЛ}} = \frac{43,50 - 0,332}{0,490} = 88,10 \geq K_{ч.доп} = 1,25$$

Глибокий аналіз одержаного математичного результату (88,10) яскраво демонструє, що він у десятки разів перевищує мінімальну регламентовану норму ПУЕ (1,25). З огляду на це, можна сформулювати однозначно позитивний висновок: спроектований алгоритм убезпечення магістралі КЛ від однофазних замикань на землю ОЗЗ характеризується винятково високим та абсолютно достатнім рівнем чутливості, гарантуючи безвідмовну локалізацію подібних інцидентів на найраніших стадіях їхнього розвитку.

ВИСНОВКИ

Підсумовуючи результати виконаного кваліфікаційного дослідження, можна стверджувати, що поставлену мету щодо проектування надійної інфраструктури живлення підприємства скляної промисловості успішно досягнуто. У процесі роботи було вирішено комплекс інженерних завдань:

Базуючись на вимогах чинних нормативних документів, обчислення очікуваної потреби силових струмоприймачів виконувалось із застосуванням загальноприйнятого методу коефіцієнта розрахункової потужності. Водночас, для формування коректної картини роботи мереж штучного освітлення застосовано метод питомої щільності навантаження на одиницю площі, що гарантує високу точність вихідних даних.

Детальний техніко-економічний аналіз довів доцільність прокладання підземних кабельних магістралей (клас 10 кіловольт) від джерела, розташованого за чотири кілометри від об'єкта. Цей підхід виявився значно рентабельнішим за спорудження повітряних ЛЕП 110 кВ, оскільки дозволяє уникнути будівництва дороговартісної головної знижувальної підстанції (ГЗП) та забезпечує вищий рівень захисту від атмосферних впливів.

Проведений аудит балансу реактивної енергії дав змогу точно підібрати параметри конденсаторних установок. Розміщення компенсуючого обладнання передбачено як на стороні низької (0,4 кВ), так і високої (10 кВ) напруги. Таке рішення максимально розвантажує цехові трансформатори та живильні лінії від реактивних перетікань.

Спираючись на результати математичного моделювання аварійних режимів, здійснено перевірку та остаточний підбір комутаційних апаратів внутрішнього контуру. Завдяки розрахунку струмів коротких замикань вибрано відповідні високовольтні вимикачі, перерізи кабелів 10 кВ, а також прецизійні вимірювальні трансформатори струму і напруги, які гарантують стійкість до термічних та динамічних перевантажень.

						Арк.
						74

Запропонована комплексна схема енергозабезпечення повністю задовольняє жорсткі критерії безперебійності, безпеки експлуатації та капітальної рентабельності, які висуваються до сучасних промислових об'єктів.

						Арк.
						75

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.