

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 з виробництва електротермічного устаткування»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–22,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

Євгеній ШПАРТОВ

« » 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

Василь ЗІНЗУРА

« » 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

Шпартова Євгенія Олексійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва електротермічного устаткування

Design of a power supply system for an enterprise producing electrothermal equipment

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 з виробництва електротермічного устаткування. 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 _____

Євгеній ШПАРТОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 80 с.; 33 рис.; 24 табл.; 5 джерел

Шпартов Є. О. Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва електротермічного устаткування. – Рукопис.

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

Дана робота присвячена проектуванню комплексної мережі живлення для підприємства, що виготовляє електротермічну апаратуру. Під час виконання роботи було здійснено обчислення споживаної енергії, проаналізовано режими генерації реактивної складової та знайдено значення струмів при коротких замиканнях. Крім того, автор обґрунтував конфігурацію внутрішніх і зовнішніх ліній забезпечення струмом, а також ретельно підібрав відповідне високовольтне устаткування.

Окрема глава проекту описує комп'ютерну симуляцію, яка відтворює функціонування енергомережі за умов несинусоїдальних коливань із застосуванням фільтрувальних пристроїв активного типу. Отримані аналітичні дані повністю підтверджують високу результативність таких приладів для ефективного зменшення амплітуди вищих гармонійних складових напруги та струму всередині електричної мережі.

Ключові слова: енергетичне споживання, підстанція трансформаторного типу, реактивна енергія, струми КЗ, пристрої активної фільтрації.

ABSTRACT

Qualification work: 80 p.; 33 Fig.; 24 tables; 5 sources

Shpartov Y. O. Design of a power supply system for an enterprise producing electrothermal equipment. – 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 is devoted to the design of a complex power supply network for an enterprise that manufactures electrothermal equipment. During the work, the energy consumption was calculated, the reactive component generation modes were analyzed, and the values of currents during short circuits were found. In addition, the author justified the configuration of internal and external power supply lines, and also carefully selected the appropriate high-voltage equipment.

A separate chapter of the project describes a computer simulation that reproduces the functioning of the power grid under conditions of non-sinusoidal oscillations with the use of active-type filtering devices. The obtained analytical data fully confirm the high efficiency of such devices for effectively reducing the amplitude of higher harmonic components of voltage and current within the electrical network.

Keywords: energy consumption, transformer-type substation, reactive energy, short-circuit currents, active filtering devices.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	8
1.1 Розрахунок силових навантажень в мережі до 1 кВ	8
1.2 Розрахунок електричних освітлювальних навантажень	9
1.3 Розрахунок електричних навантажень напругою вище 1000 В	10
1.4 Графіки електричних навантажень	14
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	19
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	21
3.1 Вибір схеми зовнішнього електропостачання	21
3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання	25
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	28
4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності	28
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв	29
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	32
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	33
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	33
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ	39
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги	42
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	43
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦІЇ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ СПОТВОРЕНЬ НАПРУГИ	45
7.1 Базові концепції та типологізація гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв.....	45
7.2 Математичне моделювання та алгоритми керування компенсаторами.....	53
7.3 Комп'ютерне імітаційне моделювання режимів електропостачання	64
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Шпартов Є.О.				Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва електротермічного устаткування Design of a power supply system for an enterprise producing electrothermal equipment	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.	Зінзура В.В.						6	80
						ЦНТУ зр. ЕЕ-22		
Н. контр.								
Затвер.	Плешков П.Г.							

ВСТУП

Даний проект зосереджений на розробці енергетичної мережі для підприємства, що спеціалізується на випуску електротермічної апаратури.

Проблема забезпечення промислових об'єктів струмом сьогодні є вкрай важливою, оскільки електрична енергія виступає рушійною силою більшості виробничих операцій. Саме тому гарантування безперебійної та стабільної подачі напруги відіграє вирішальну роль у підтримці високої результативності компанії.

Ключовою вимогою до енергетичної інфраструктури вважається повна відсутність пауз у живленні. Будь-які аварійні знеструмлення здатні спровокувати простій технологічних ліній, вихід апаратури з ладу та загальне падіння ефективності. Як наслідок, промисловий об'єкт може зазнати суттєвих фінансових збитків.

Головна ціль цього дослідження полягає у створенні комплексної та надійної схеми живлення для заводу з виробництва електротермічних пристроїв.

Щоб реалізувати поставлену мету, потрібно виконати наступні кроки:

1. Обчислення обсягів споживання електроенергії об'єктом.
2. Побудова та детальний аналіз картограми енергетичних навантажень.
3. Аргументований підбір найефективнішої конфігурації як зовнішніх, так і внутрішніх ліній передачі струму.
4. Аналіз та визначення параметрів компенсації реактивної складової.
5. Розрахунок оптимальної кількості трансформаторних установок та їхньої номінальної потужності.
6. Знаходження величин струмів при коротких замиканнях із подальшим вибором відповідного високовольтного обладнання.
7. Вирішення додаткових вузькопрофільних завдань, передбачених спеціальною частиною роботи.

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Розрахунок силових навантажень в мережі до 1 кВ

Для обчислення параметрів електроспоживання низьковольтного обладнання (до 1 кВ) застосовано підхід на основі коефіцієнта розрахункової потужності, який детально розглянуто у джерелі [1].

Як зразок, нижче продемонстровано послідовність знаходження необхідних величин для цеху механічної обробки деталей першого корпусу.

Значення показника m :

$$m = \frac{P_{H.max}}{P_{H.min}} = \frac{75.9}{50.6} = 1.5$$

Усереднені показники активного і реактивного навантаження:

$$P_{cm} = \Sigma P_H \cdot K_H = 2424 \cdot 0.25 = 606 \text{ кВт}$$

$$Q_{cm} = P_{cm} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 606 \cdot 0.88 = 533.28 \text{ кВар}$$

Ефективна кількість електроприймачів:

$$n_e = \frac{2 \cdot \Sigma P_H}{P_{H.max}} = \frac{2 \cdot 2424}{75.9} = 63.87$$

Відповідно до довідника [1], приймаємо $K_p = 1.245$.

Розрахункові величини активної (P_p) та реактивної (Q_p) потужностей для підрозділу механічної обробки (корпус № 1):

$$P_p = P_{cm} \cdot K_p = 606 \cdot 1.245 = 754.47 \text{ кВт}$$

						Арк.
						8

$$P_p = K_n \cdot K_1 \cdot P_y = 0,95 \cdot 1,20 \cdot 39,66 = 45,21 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 45,21 \cdot 0,48 = 21,70 \text{ квар}$$

У таблиці 1.2 представлено результати розрахунків освітлювальних навантажень для решти підрозділів підприємства.

Таблиця 1.2. Результати обчислення параметрів освітлювального навантаження підприємства

№ з/п	Назва об'єкту	$F, \text{ м}^2$	$P_0, \text{ Вт/м}$	$P_{\text{вст}}, \text{ кВт}$	K_n	K_1	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$P_p, \text{ кВт}$	$Q_p, \text{ квар}$	$S_p, \text{ кВА}$
1	Дільниця механічної обробки корпусу № 1	2333	17	39,66	0,95	1,2	0,9	0,48	45,21	21,7	50,15
2	Складальний цех корпусу № 1	2333	16	37,33	0,95	1,2	0,9	0,48	42,56	20,4	47,21
3	Допоміжний виробничий підрозділ	2732	14	38,25	0,95	1,2	0,9	0,48	43,61	20,9	48,37
4	Дільниця нестандартного устаткування	2915	16	46,64	0,95	1,2	0,9	0,48	53,17	25,5	59
5	Заготівельно-ливарне виробництво	2186	13	28,42	0,95	1,2	0,9	0,48	32,4	15,6	35,94
6	Гальванічна дільниця	1093	14	15,30	0,95	1,2	0,9	0,48	17,44	8,37	19,34
7	Компресорна станція	656	8	5,25	0,95	1,2	0,9	0,48	5,99	2,88	6,65
8	Інженерно-технічний комплекс	1530	16	24,48	0,95	1,2	0,9	0,48	27,91	13,4	30,96
9	Експериментальний відділ	765	12	9,18	0,95	1,2	0,9	0,48	10,46	5,02	11,6
10	Випробувальний центр міцності	1275	16	20,4	0,95	1,2	0,9	0,48	23,26	11,2	25,8
11	Енергомашинне відділення	1021	15	15,32	0,95	1,2	0,9	0,48	17,46	8,38	19,37
12	Термічний лабораторний сектор	1021	18	18,38	0,95	1,2	0,9	0,48	20,95	10,1	23,24
13	Зовнішня територія промайданчика	92900	0,1	9,29	1	1,1	0,5	1,73	10,22	17,7	20,42
	Всього			307,9					318,2	326	455,4

1.3 Розрахунок електричних навантажень напругою вище 1000 В

Для розрахунку ел. нав. напругою вище 1 кВ використовується метод коефіцієнта розрахункової потужності [1]. В табл. 1.3 показані розрахунки ел. нав. вище 1 кВ.

						Арк.
						10

Таблиця 1.3. Розрахунок силових ел. нав. вище 1000 В

Назва групи споживачів	К-сть ЕС	Р одн., кВт		Р сум.	m	K _в	cosφ	tgφ	Середньозміне навантаження		n _{эф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		min	max						Р _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			Р _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
ТП 1, 2, 3															
Допоміжний виробничий підрозділ															
силове:	55	5,06	40,5	688,2	8	0,3	0,7	1,02	206,46	210,59	34	1,3	268,4	210,59	341,15
освітлювальне:				38,25									43,61	20,93	
Всього:				244,7					210,62				312,81	231,73	389,29
Дільниця нестандартного устаткування															
силове:	15	1,01	20,3	151,8	20	0,35	0,7	1,02	53,13	54,19	15	1,43	75,98	54,19	93,32
освітлювальне:				46,64									53,17	25,52	
Всього:				99,76					54,2				129,04	79,93	151,79
Заготівельно-ливарне виробництво															
силове:	120	5,06	50,6	4857,6	10	0,7	0,8	0,75	3400,32	2550,24	120	1,05	3570,34	2550,24	4387,64
освітлювальне:				28,42									32,4	15,55	
Всього:				3428,74					2550,24				3598,19	2565,92	4419,37
Гальванічна дільниця															
силове:	18	6,07	55,7	242,9	9,2	0,25	0,8	0,75	60,73	45,55	9	1,76	106,88	50,09	118,02
освітлювальне:				15,3									17,44	8,37	
Всього:				76,02					45,54				124,43	58,53	137,51
Зовнішня територія проммайданчика															
освітлювальне:				9,29									10,4	18,01	
Всього:				9,29					0				10,4	18,01	20,81
Всього по ТП 1, 2, 3:															
силове:	208	1,01	55,66	5940,44	55	0,63	0,79	0,77	3720,62	2860,6	208	1	3720,62	2860,6	4693,19
освітлювальне:				137,9									157,01	88,96	
БК 0,4 кВ				-1518									-1518		
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 1, 2, 3:									3858,51	1342,6			3877,63	1431,57	4133,44
Втрати в трансформаторах:													45,82	239,76	
Кількість трансформаторів: 6															
Номінальна потужність, кВА: 1000															

Продовження табл. 1.3

Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,68$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 1, 2, 3:														3923,45	1671,33	4264,61
ТП 4, 5																
Дільниця механічної обробки корпусу № 1																
силове:	90	1,52	75,9	2424	50	0,25	0,75	0,88	606	533,28	64	1,245	754,47	533,28	923,94	
освітлювальне:				39,66									45,21	21,7		
Всього:				646,84					535,5				801,07	557,37	975,89	
Складальний цех корпусу № 1																
силове:	140	0,81	50,6	3572,4	62,5	0,25	0,8	0,75	893,1	669,83	140	1,16	1036	669,83	1233,51	
освітлювальне:				37,33									42,56	20,43		
Всього:				930,39					669,81				1077,13	690,4	1279,4	
Компресорна станція																
силове:	7	50,6	202,4	556,6	4	0,65	0,8	0,75	361,79	271,34	6	1,34	484,8	298,47	569,32	
освітлювальне:				5,25									5,99	2,88		
Всього:				367,03					271,34				490,31	301,36	575,52	
Інженерно-технічний комплекс																
силове:	20	2,02	45,5	384,6	22,5	0,75	0,9	0,48	288,45	138,46	17	1,11	320,18	138,46	348,83	
освітлювальне:				24,48									27,91	13,4		
Всього:				312,9					139,69				348,63	153,2	380,81	
Всього по ТП 4, 5:																
силове:	257	0,81	202,4	6942,32	250	0,31	0,8	0,75	2150,5	1616,34	69	1,2	2578,53	1616,34	3043,25	
освітлювальне:				106,66									121,6	58,86		
БК 0,4 кВ				-1084,9									-1084,86			
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 4, 5:									2257,16	531,47			2700,13	590,33	2763,9	
Втрати в трансформаторах:													30,67	160,46		
Кількість трансформаторів: 4																
Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,68$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 4, 5:													2730,8	750,79	2832,13	
ТП 6																
Експериментальний відділ																
силове:	40	3,54	45,5	506	12,9	0,5	0,6	1,33	253	336,49	22	1,24	313,72	336,49	460,05	
освітлювальне:				9,18									10,46	5,02		

Продовження табл. 1.3

Всього:				262,18					337,33				323,44	342,39	471,01
Випробувальний центр міцності															
силове:	20	10,1	40,5	809,6	4	0,4	0,8	0,75	323,84	242,88	20	1,32	427,47	242,88	491,46
освітлювальне:				20,4									23,26	11,16	
Всього:				344,24					242,88				450,75	254,13	517,46
Енергомашинне відділення															
силове:	14	10,1	40,5	566,7	4	0,25	0,65	1,17	141,68	165,77	14	1,58	223,85	165,77	278,55
освітлювальне:				15,32									17,46	8,38	
Всього:				156,98					165,64				241,77	174,08	297,92
Термічний лабораторний сектор															
силове:	20	30,4	70,8	769,1	2,3	0,45	0,9	0,48	346,1	166,13	20	1,28	443,01	166,13	473,13
освітлювальне:				18,38									20,95	10,06	
Всього:				364,46					167,63				465,14	177,76	497,94
Всього по ТП 6:															
силове:	94	3,54	70,84	2651,44	20	0,4	0,76	0,86	1064,62	913,48	75	1,15	1225,36	913,48	1528,38
освітлювальне:				63,24									72,09	34,88	
БК 0,4 кВ				-506									-506		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 6:									1127,86	407,48			1297,45	442,37	1370,79
Втрати в трансформаторах:													15,17	79,4	
Кількість трансформаторів: 2															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,68															
Всього на шинах 10 кВ ТП 6:													1312,62	521,77	1412,52
Всього по об'єкту															
силове:	559	0,81	202,4	15529,5	250	0,45	0,95	0,33	6935,74	2281,55	154	1,09	7565,28	2281,55	7901,83
освітлювальне:				63,24									350,71	182,71	
Всього:				7243,54					2281,55				7915,99	2464,26	8290,68
Потужність КП 0,4 кВ:				-3108,9									-3108,86		
Втрати в трансформаторах:													91,68	479,63	
Всього по об'єкту:													8007,66	2943,89	8531,66
Високовольтне навантаження															
ДСП-3	2	2250	2250	4500		0,75	0,9	0,48	3415,5	1654,21			3415,5	1654,21	3795
ТПЧ-800	2	800	800	1600		0,75	0,8	0,75	1214,4	910,8			1214,4	910,8	1518
Всього високовольтного навантаження:									4629,9	2565,01			4629,9	2565,01	5292,94
Всього по об'єкту 10 кВ:									12637,56	5508,9			12637,56	5508,9	13786,07
КП 10 кВ:				-3643,2									-3643,2		
Всього 10 кВ з КП:									12637,56	1865,69			12637,56	1865,69	12774,54

1.4 Графіки електричних навантажень

У даному підрозділі виконано обчислення показників зміни споживаної потужності в часі, спираючись на базовий алгоритм із літературного джерела [1]. Отримані підсумкові цифри систематизовано та зведено у поданих нижче таблицях.

Таблиця 1.4. Початкові відомості для побудови добових кривих навантаження

№ з/п	Робочі дні		Вихідні дні	
	$P, \%$	$Q, \%$	$P, \%$	$Q, \%$
1	100	100	50	70,2
2	91	95,6	50,1	70,9
3	98,8	98,5	50,7	70,5
4	75,9	86,7	50,5	70,1
5	48,5	68,5	50,4	70,7
6	48,2	68,7	50,4	70,6
7	68,9	82,5	50,2	70,9
8	72,4	85,9	40,1	70,4
9	75,6	87,5	40,5	63,4
10	70,6	83,5	41	63,4
11	72,4	84,3	41	63,6
12	66	80	40,8	63,7
13	58,8	76,2	40,4	63,1
14	55,4	75,8	40,5	63,6
15	69	82,2	40,4	63,9
16	75,1	88	40,8	63,4
17	78,5	89,1	40,7	63,7
18	73,2	87,2	40,8	63,8
19	72,6	86,6	50,2	70,3
20	68,6	85,9	50,8	70,7
21	60,5	78,7	50	70,7
22	35,3	79,8	50,1	70,1
23	63,1	81	50,6	70
24	100	100	50	70

Таблиця 1.5. Результати розрахунку графіків ел. нав.

№ з/п	Зимові дні						Літні дні					
	Робочі дні			Вихідні дні			Робочі дні			Вихідні дні		
	P , кВт	Q , квар	S , кВА	P , кВт	Q , квар	S , кВА	P , кВт	Q , квар	S , кВА	P , кВт	Q , квар	S , кВА
1	12638	1866	12775	6319	1306	6453	10742	1586	10859	5371	1110	5484
2	11374	1773	11512	6319	1306	6453	9668	1507	9784	5371	1110	5484
3	12385	1829	12519	6319	1306	6453	10528	1554	10642	5371	1110	5484
4	9478	1605	9613	6319	1306	6453	8057	1364	8171	5371	1110	5484
5	6066	1269	6197	6319	1306	6453	5156	1079	5267	5371	1110	5484
6	6066	1269	6197	6319	1306	6453	5156	1079	5267	5371	1110	5484
7	8594	1530	8729	6319	1306	6453	7305	1300	7419	5371	1110	5484
8	9099	1586	9237	5055	1306	5221	7735	1348	7851	4297	1110	4438
9	9478	1623	9616	5055	1176	5189	8057	1380	8174	4297	999	4411
10	8847	1549	8981	5055	1176	5189	7519	1317	7634	4297	999	4411
11	9099	1568	9232	5055	1176	5189	7735	1333	7849	4297	999	4411
12	8214	1493	8349	5055	1176	5189	6983	1269	7097	4297	999	4411
13	7330	1418	7466	5055	1176	5189	6231	1205	6346	4297	999	4411
14	6950	1400	7090	5055	1176	5189	5908	1190	6026	4297	999	4411
15	8594	1530	8729	5055	1176	5189	7305	1300	7419	4297	999	4411
16	9478	1642	9620	5055	1176	5189	8057	1396	8177	4297	999	4411
17	9858	1661	9997	5055	1176	5189	8379	1412	8498	4297	999	4411
18	9225	1623	9367	5055	1176	5189	7842	1380	7962	4297	999	4411
19	9099	1605	9240	6319	1306	6453	7735	1364	7854	5371	1110	5484
20	8594	1586	8739	6319	1306	6453	7305	1348	7428	5371	1110	5484
21	7583	1455	7722	6319	1306	6453	6445	1238	6563	5371	1110	5484
22	4423	1474	4662	6319	1306	6453	3760	1253	3963	5371	1110	5484
23	7961	1493	8100	6319	1306	6453	6767	1269	6886	5371	1110	5484
24	12638	1866	12775	6319	1306	6453	10742	1586	10859	5371	1110	5484

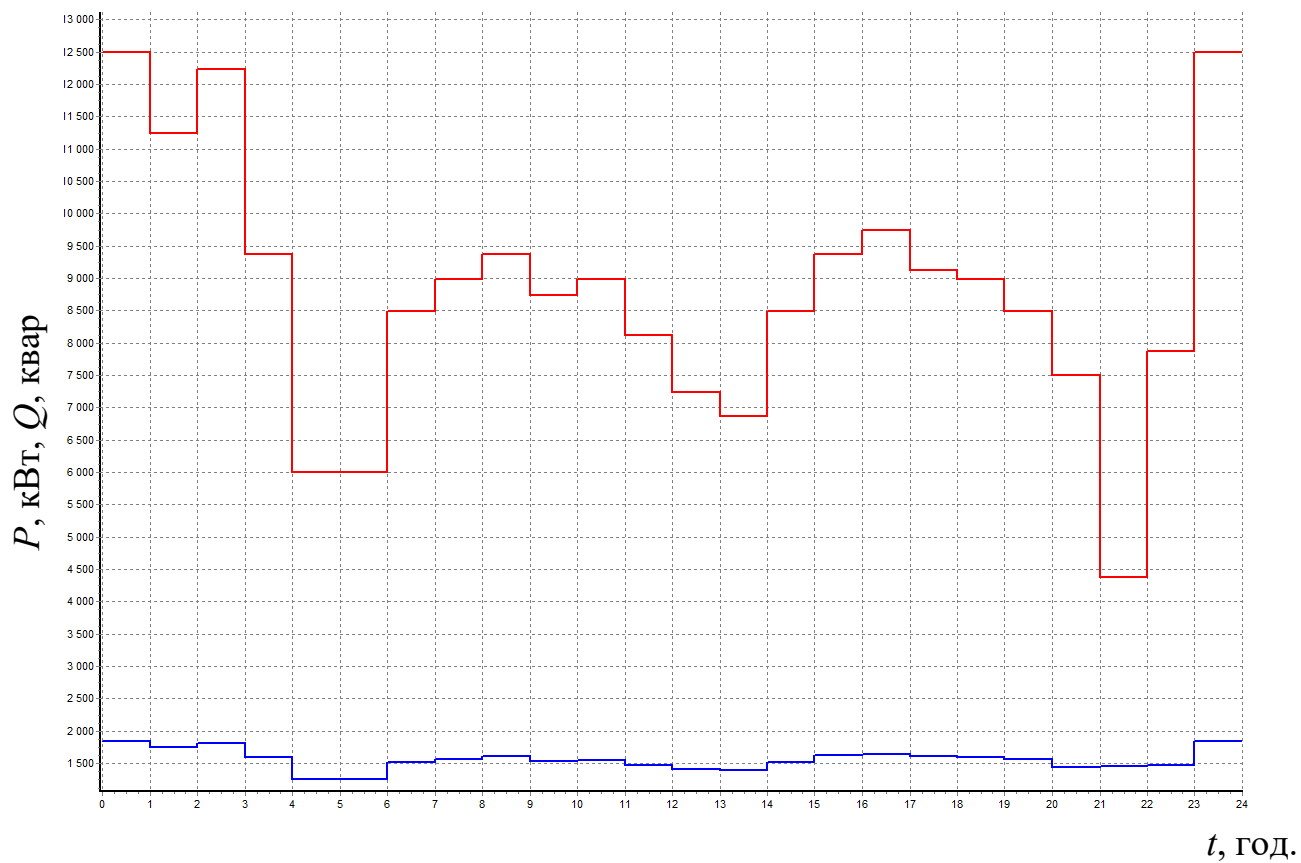


Рис. 1.1. Добові графіки P, Q (зимова роб. доба)

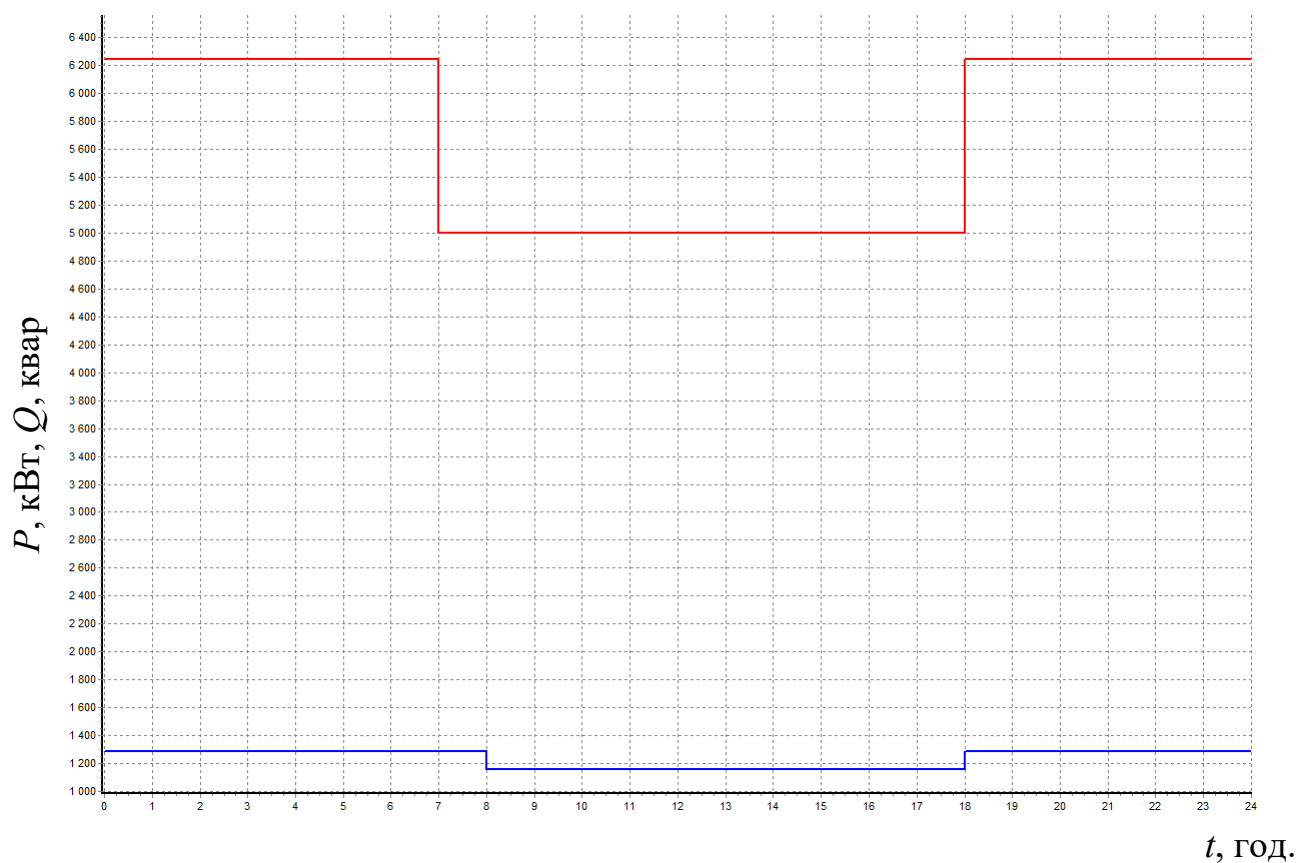


Рис. 1.2. Добові графіки P, Q (зимова вих. доба)

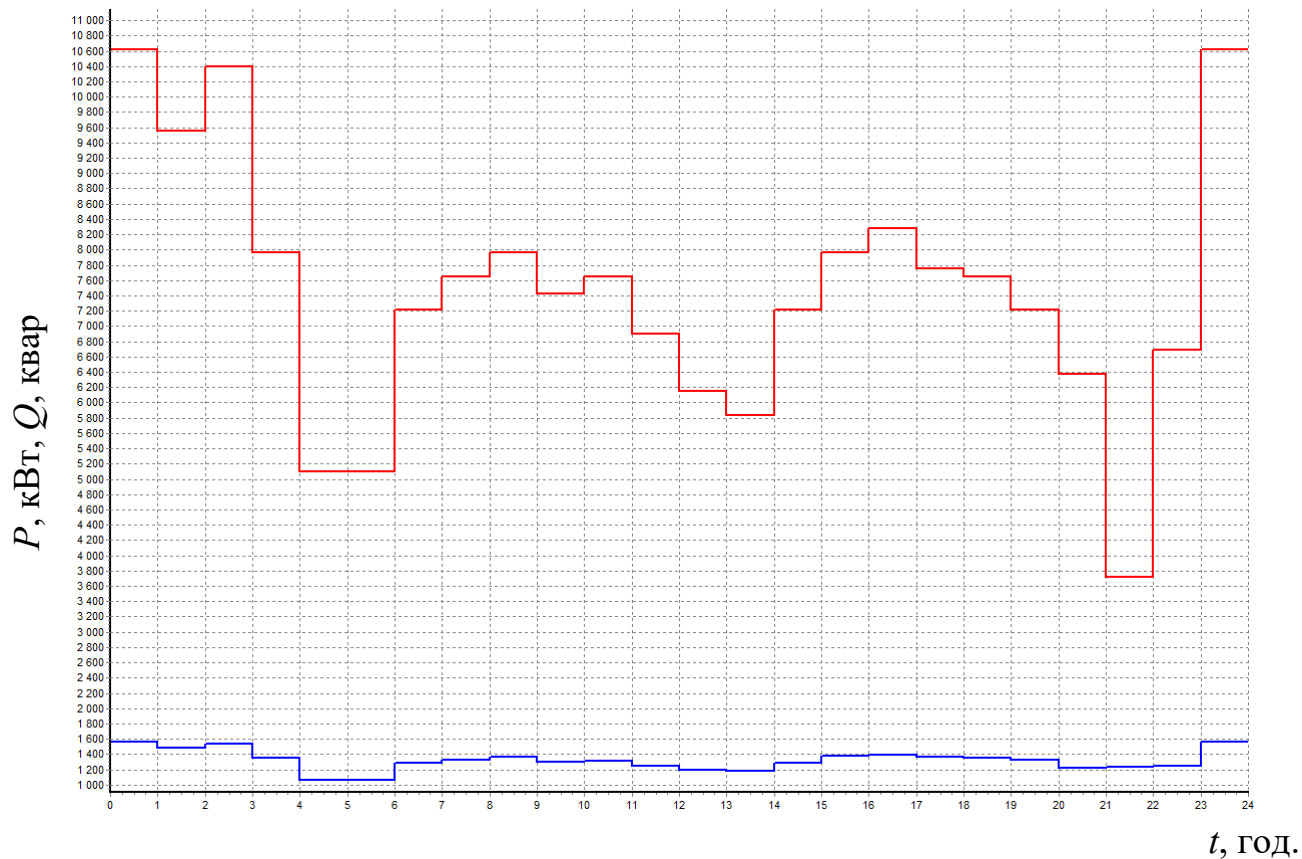


Рис. 1.3. Добові графіки P, Q (літня роб. доба)

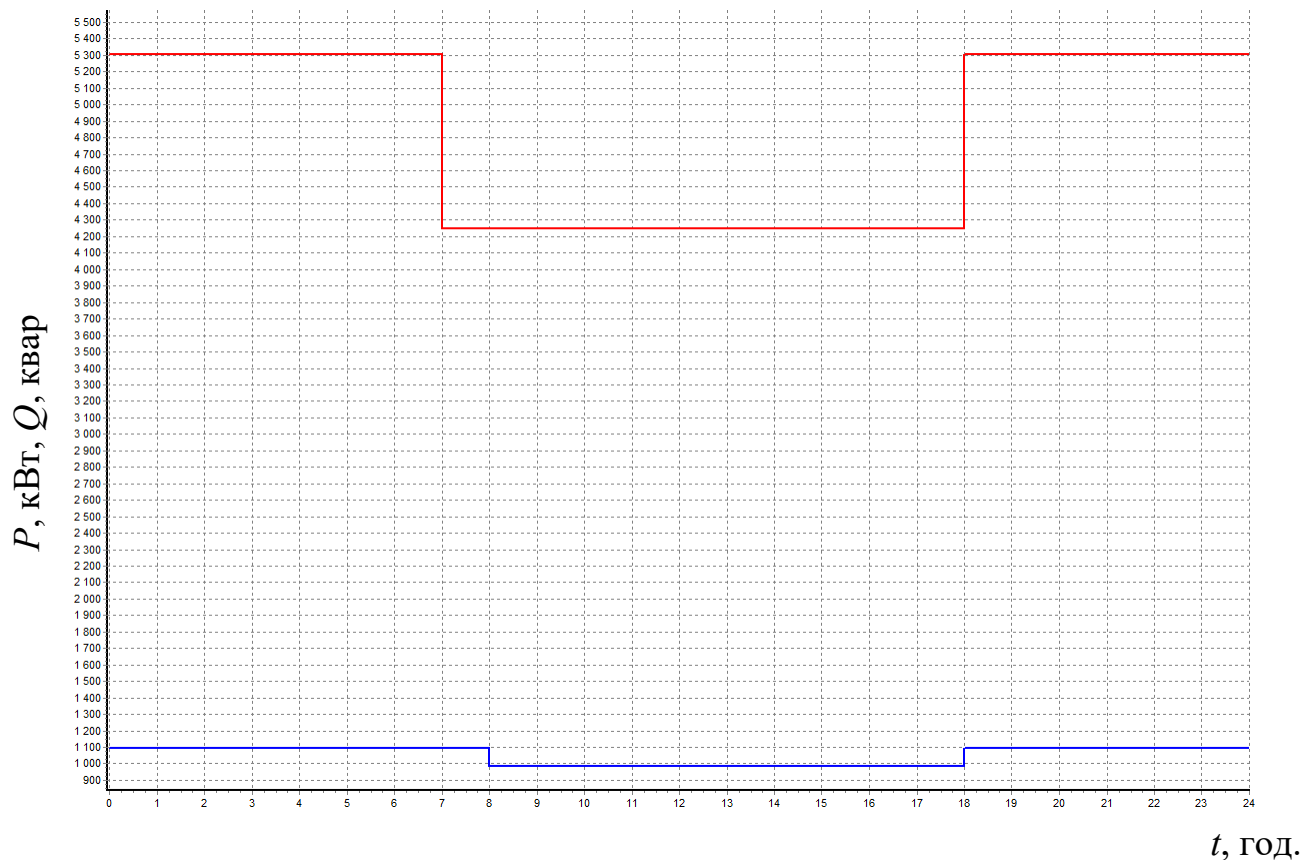


Рис. 1.4 Добові графіки P, Q (літня вих. доба)

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розрахунок картограми ел. нав. Здійснюється згідно методики [1].

Обчислення параметрів для побудови картограми електричних навантажень виконується на основі рекомендацій джерела [1].

Як зразок, нижче наведено послідовність знаходження відповідних величин щодо ділянки механічної обробки (перший корпус):

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_1}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{P_{p.осв} + P_{p.сил}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{45,21 + 754,47}{3,14 \cdot 0,2}} = 35,68 \text{ мм}$$

$$\alpha_1 = \frac{P_{1.осв} \cdot 360^\circ}{P_1} = \frac{45,21 \cdot 360^\circ}{799,68} = 20,35^\circ$$

Знаходження шуканих характеристик решти виробничих підрозділів підприємства виконується за аналогічним алгоритмом (результати подано у табл. 2.1).

Знаходження просторових координат умовного центру електричних навантажень:

$$X = \frac{\sum X_i P_i}{\sum P_i} = \frac{1423897}{13024} = 109,3 \text{ м.}$$

$$Y = \frac{\sum Y_i P_i}{\sum P_i} = \frac{1732299}{13024} = 133,0 \text{ м.}$$

Таблиця 2.1. Картограма ел. нав.

№ п/п	Найменування	$P_{\text{р.сил}}$, кВт	$P_{\text{р.осв}}$, кВт	$P_{\text{р}}$, кВт	m	R , мм	α	x , м	y , м	$P \cdot x$, кВт · м	$P \cdot y$, кВт · м
1	Дільниця механічної обробки корпусу № 1	754,47	45,21	799,68	0,2	35,68	20,35	135	90	107956,8	71971,2
2	Складальний цех корпусу № 1	1036	42,56	1078,56	0,2	41,44	14,21	135	66	145605,6	71184,96
3	Допоміжний виробничий підрозділ	268,4	43,61	312,01	0,2	22,29	50,32	222	141	69266,22	43993,41
4	Дільниця нестандартного устаткування	75,98	53,17	129,15	0,2	14,34	148,21	135	168	17435,25	21697,2
5	Заготівельно-ливарне виробництво										
	а) 0.4 кВ	3570,34	32,4	3602,74	0,2	75,74	3,24	111	141	399904,14	507986,34
	б) 10.5 кВ (ДСП-3)	3415,5	0	3415,5	0,2	73,74	0	111	141	379120,5	481585,5
6	Гальванічна дільниця	106,88	17,44	124,32	0,2	14,07	50,5	42	171	5221,44	21258,72
7	Компресорна станція	484,8	5,99	490,79	0,2	27,95	4,39	42	111	20613,18	54477,69
8	Інженерно-технічний комплекс										
	а) 0.4 кВ	320,18	27,91	348,09	0,2	23,54	28,87	42	45	14619,78	15664,05
	б) 10.5 кВ (ТПЧ-800)	1214,4	0	1214,4	0,2	43,97	0	42	45	50989,8	54648
9	Експериментальний відділ	313,72	10,46	324,18	0,2	22,72	11,62	105	273	34038,9	88501,14
10	Випробувальний центр міцності	427,47	23,26	450,73	0,2	26,79	18,58	105	249	47326,65	112231,77
11	Енергомашинне відділення	223,85	17,46	241,31	0,2	19,6	26,05	180	270	43435,8	65153,7
12	Термічний лабораторний сектор	443,01	20,95	463,96	0,2	27,18	16,26	180	249	83512,8	115526,04
13	Зовнішня територія проммайданчика	0	10,4	10,4	0,2	4,07	360	111	141	1154,4	1466,4
	Всього по підприємству	12655	350,82	13005,82						1420201,3	1727346,1

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Вибір схеми зовнішнього електропостачання

Процедура визначення раціональної конфігурації системи зовнішнього підключення реалізується на базі підходів із посібника [1].

Виходячи з вихідних умов, промисловий комплекс електротермічного устаткування має можливість отримувати енергію від понижувальної трансформаторної підстанції 35/10 кВ, віддаленої на відстань п'яти кілометрів. Враховуючи цей географічний фактор, доцільно виконати техніко-економічний аналіз наступних двох альтернатив побудови мережі зовнішнього енергозабезпечення:

1. Структура із застосуванням підземних кабельних магістралей номінальною напругою 10 кВ.
2. Конфігурація на основі повітряних ЛЕП 35 кВ, що передбачає монтаж трансформаторних агрегатів на головній підстанції (ГЗП) 35/10 кВ безпосередньо на території заводу.

Графічне відображення згаданих вище концепцій ліній передач представлено на рисунку 3.1.

Перша альтернатива (рис. 3.1, а).

Величина розрахункового струмового навантаження для кабельної лінії (в Амперах):

$$I_{max} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{12775}{\sqrt{3} \cdot 10} = 737,56 \text{ А}$$

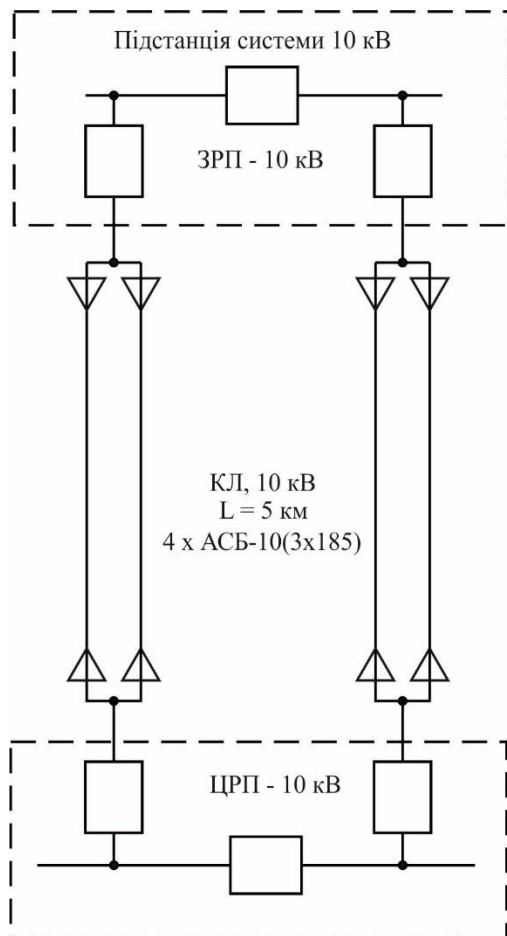
Приймаємо рішення про прокладання чотирьох паралельних кабелів типу АСБ-10(3х185), які характеризуються такими паспортними даними: $I_{\text{доп}} = 310 \text{ А}$, $\Delta P_{1\text{км}} = 22 \text{ кВт/км}$, питома вартість монтажу $K_{\text{кл}} = 54 \text{ тис. грн/км}$.

Перевірка провідників на нагрівання за нормальних умов експлуатації:

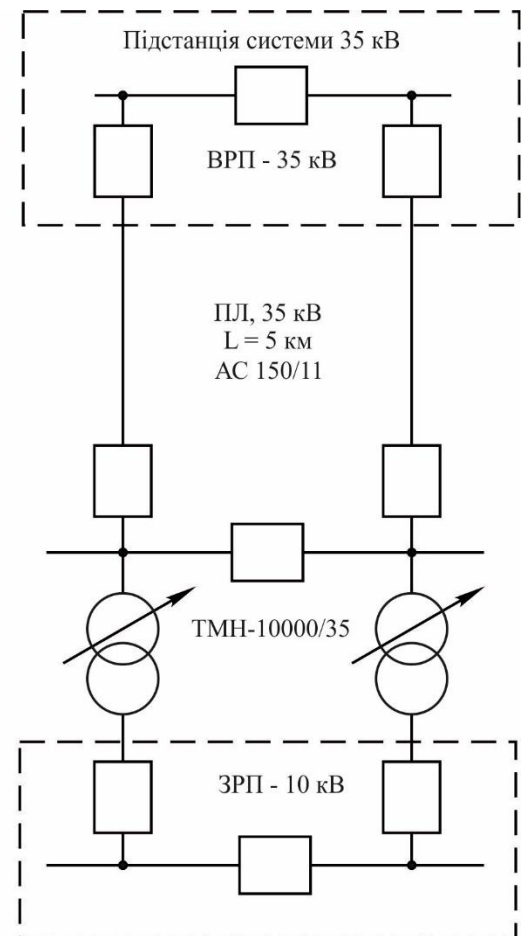
$$I_p = 184,39 \text{ А} \leq K_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}} = 0,84 \cdot 310 = 260,4 \text{ А}$$

Контроль температурного режиму за виникнення післяаварійної ситуації:

$$I_{\text{р.ав}} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 184,39 = 368,78 \text{ А} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 310 = 387,5 \text{ А}$$



а)



б)

Рис. 3.1. Варіанти виконання мереж зовнішнього електропостачання об'єкта

Запропоновані до встановлення кабельні лінії повністю відповідають усім критеріям технічної перевірки.

Показник завантаженості струмопроводів під час штатної роботи підприємства:

						Арк.
						22

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{184,39}{310} = 0,595$$

Сумарне падіння активної потужності всередині кабельних трас:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{1\text{км}} \cdot l \cdot K_3^2 = 22 \cdot 20 \cdot 0,354 = 155,76 \text{ кВт}$$

Обсяг недоотриманої енергії на подолання опору провідників за рік (з урахуванням навантаження на робочі лінії):

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P \cdot \tau = 77,88 \cdot 3641 = 283561,08 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Економічна оцінка вартості втраченої електроенергії в мережі:

$$C_{\text{втр}} = \Delta W_{\text{л}} \cdot C_0 \cdot 0,001 = 283561,08 \cdot 5,15 \cdot 0,001 = 1460,34 \text{ тис. грн}$$

У таблиці 3.1 показано обсяги початкових інвестицій для першої концепції. Далі, у таблиці 3.2, систематизовано щорічні експлуатаційні відрахування за цим же варіантом.

Таблиця 3.1. Калькуляція капіталовкладень згідно з першим проектним рішенням

№	Назва елементу схеми	Од. вим.	К- сть	Вартість одиниці, тис. грн	Всього, тис. грн
1	КЛ 10 кВ	км	20	54,65	1093,00
2	Траншея	км	5	14,47	72,35
3	Шафи КРП серії КУ-10	шт	1	21,66	21,66
	Всього				1187,01

В табл. 3.2 приведений розрахунок поточ. витрат I-го вар.

Таблиця 3.2. Оцінка річних експлуатаційних витрат (перший варіант)

№	Назва елементу схеми	Кап. витрати К _ж , тис. грн	Р _{а_ж} , %	С _{а_ж} , тис. грн	Р _{е_ж} , %	С _{е_ж} , тис. грн	Всього С _ж , тис. грн
1	КЛ 10 кВ	1093,00	5	54,65	5	54,65	109,30
2	Траншея	72,35	5	3,62	5	3,62	7,24
3	Шафи КРП серії КУ-10	21,66	15	3,25	5	1,08	4,33
	Всього						120,87

Інтенсивність виникнення відмов для першої гілки живлення:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,004 + 0,809 = 0,813 \text{ 1/рік}$$

Усереднена тривалість усунення несправностей на першому напрямку мережі:

$$T_B = \frac{\sum \lambda_i T_{Bi}}{\lambda} = \frac{(0,004 \cdot 0,00045 + 0,809 \cdot 0,0007)}{0,813} = 0,0007 \text{ рік}$$

Показник передбачуваних планових зупинок для досліджуваної лінії:

$$K_{\Pi} = 1,2 \cdot K_{\Pi.max} = 1,2 \cdot 0,00202 = 0,00242$$

Коефіцієнт імовірної аварійної перерви в роботі першого ланцюга:

$$K_a = \lambda \cdot T_B = 0,813 \cdot 0,0007 = 0,0005691$$

Значення $K_{ап}$ за умови відмови одного та профілактики іншого приєднання:

$$K_{ап} = 0,5 \cdot \lambda \cdot K_{\Pi}^2 = 0,5 \cdot 0,813 \cdot 0,000005856 = 0,0000023806$$

Параметр раптового відключення відразу обох ліній електропередач:

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2 \cdot K_{ап} = 0,00000032387 + 2 \cdot 0,0000023806 = 0,0000050851$$

Сумарна тривалість одночасної відсутності напруги на обох вводах (у годинах):

$$T_a^{(2)} = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,0000050851 \cdot 8760 = 0,04455 \text{ год}$$

Очікувані економічні втрати через раптове припинення постачання енергії (тис. грн на рік):

$$Y_0 = Y_{\text{пит}} \cdot P_{\text{ср}} \cdot T_a^{(2)} = 35 \cdot 7,46 \cdot 0,04455 = 11,63 \text{ тис. грн}$$

Річна сума зведених фінансових витрат щодо першого проектного рішення (тис. грн):

$$\begin{aligned} Z_I &= E_H \cdot K_I + C_I + C_{\text{втр.І}} + Y_{0.I} = 0,12 \cdot 1187,01 + 120,87 + 1460,34 + 11,63 \\ &= 1735,28 \text{ тис. грн} \end{aligned}$$

Визначення аналогічних критеріїв щодо другої конфігурації енергозабезпечення виконується за тотожним алгоритмом (підсумки зведено у табл. 3.3).

З табл. 3.3 видно І варіант схеми є значно вигіднішим, ніж II.

3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання

Завод електротермічного обладнання характеризується наявністю специфічних споживачів електроенергії. Електротермічні установки зазвичай є потужними приймачами, які висувають жорсткі вимоги до якості електроенергії та безперебійності живлення. Раптові перерви в електропостачанні таких споживачів можуть призвести до порушення складних технологічних процесів, псування дороговартісної сировини, пошкодження самого обладнання та значних економічних збитків. Враховуючи ці фактори, до проектованої схеми висуваються підвищені вимоги щодо надійності та резервування.

На основі аналізу генплану підприємства, розташування цехових трансформаторних підстанцій (ТП) та категорійності електроприймачів, для внутрішнього електропостачання заводу (напругою 10 кВ) було вирішено використати радіальну схему.

Цей вибір ґрунтується на наступних техніко-економічних та експлуатаційних перевагах:

- Максимальний рівень надійності електропостачання. При радіальній схемі живлення кожної цехової ТП або окремого потужного високовольтного споживача здійснюється по самостійній (індивідуальній) лінії від головної знижувальної підстанції (ГПП) або розподільного пункту (РП). Це означає, що у випадку виникнення короткого замикання або іншої аварійної ситуації на одній з ліній, релейний захист вимикає лише пошкоджену ділянку. Всі інші споживачі підприємства продовжують працювати в нормальному режимі. Для приймачів першої та другої категорій надійності передбачається двопротенева (дволанцюгова) радіальна схема, де вихід з ладу одного кабелю автоматично або вручну компенсується включенням резервного (через систему АВР).

- Економічна доцільність при коротких трасах. Історично головним недоліком радіальних схем вважалася підвищена витрата кабельної продукції порівняно з магістральними схемами. Проте, зважаючи на компактне компонування генерального плану заводу електротермічного обладнання, довжини кабельних ліній (КЛ) 10 кВ від джерела живлення до цехових підстанцій є порівняно невеликими. Завдяки цьому капітальні витрати на прокладання кабелів не є критично високими.

- Мінімізація втрат активної потужності. Оскільки довжини КЛ 10 кВ є незначними, активний опір ліній також залишається на низькому рівні. Розрахунки показують, що різниця між втратами активної потужності та електроенергії для обраної радіальної схеми та альтернативних варіантів (наприклад, магістральної або змішаної схеми) буде знаходитися в межах похибки розрахунків і є технічно та економічно незначною.

- Простота та ефективність релейного захисту і автоматики. Радіальна схема дозволяє застосувати максимально прості, дешеві і водночас надійні та селективні схеми релейного захисту. Кожна відхідна лінія захищається індивідуально, що суттєво спрощує налаштування уставок струмових захистів і гарантує миттєве відключення лише аварійного сегмента мережі.

						Арк.
						26

- Зручність диспетчеризації, експлуатації та комерційного обліку. Наявність окремих ліній для кожної ТП дозволяє легко організувати технічний та комерційний облік електроенергії безпосередньо на відхідних комірках РП або ГПП. Диспетчерському персоналу значно простіше локалізувати місця пошкоджень, проводити планово-попереджувальні ремонти (ППР) на окремих фідерах та здійснювати оперативні перемикання без необхідності знеструмлення суміжних цехів.

Розглядаючи як альтернативу магістральну схему, слід зазначити, що вона не задовольняє вимоги даного виробництва повною мірою. При пошкодженні магістралі живлення втрачають одразу кілька підключених до неї цехових підстанцій, що є неприпустимим для безперервних процесів термічної обробки. Крім того, магістральні схеми ускладнюють пошук місця аварії та вимагають встановлення дорожчих апаратів захисту і секціонування.

Підсумовуючи вищенаведене, застосування радіальної схеми розподілу електроенергії напругою 10 кВ для заводу електротермічного обладнання є найбільш технічно обґрунтованим та економічно доцільним рішенням, яке гарантує необхідну надійність, гнучкість та безпеку експлуатації системи.

Розроблена принципова однолінійна схема внутрішнього електропостачання підприємства із зазначенням усіх комутаційних апаратів, перерізів кабельних ліній та потужностей трансформаторів детально наведена в графічній частині проекту.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Головне завдання четвертого розділу зводиться до знаходження характеристик перетікання реактивної складової для мережі живлення підприємства з виробництва електротермічного устаткування.

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності

Сумарне використання активної енергії системою живлення:

$$P_p = P_H + \Delta P_T + P_B = 7875,21 + 85,96 + 4629,90 = 12591,07 \text{ кВт}$$

Сукупне споживання реактивної енергії мережею підприємства:

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B = 5573,12 + 451,01 + 2565,42 = 8589,55 \text{ квар}$$

Реактивна складова, що надходить від зовнішньої мережі:

$$Q_c = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_e = 12591,07 \cdot 0,15 = 1888,66 \text{ квар}$$

Необхідна продуктивність компенсувальних установок:

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_c = 8589,55 - 1888,66 = 6700,89 \text{ квар}$$

Найменша допустима кількість внутрішньоцехових підстанцій:

$$N_0 = \frac{P_H}{\beta \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{7875,21}{0,7 \cdot 1000} = 11,25 \approx 12 \text{ шт.}$$

Перший варіант. $N = N_0 = 12 \text{ шт.}$

Величина реактивної потужності, доступна для перетікання на рівень низької напруги:

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{\text{ном}})^2 - P_H^2} = \sqrt{(12 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 7875,21^2} = 2922,51 \text{ квар}$$

Продуктивність низьковольтних компенсувальних апаратів (до 1 кВ):

$$Q_{\text{КН}} = Q_H - Q_1 = 5573,12 - 2922,51 = 2650,61 \text{ квар}$$

Продуктивність високовольтних компенсувальних пристроїв (напругою 10 кВ):

$$Q_{\text{КВ}} = Q_{\text{КП}} - Q_{\text{КН}} = 6700,89 - 2650,61 = 4050,28 \text{ квар}$$

						Арк.
						28

Обчислення параметрів компенсації для варіантів $N_0 + 1$ та $N_0 + 2$ зведено у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1. Визначення показників балансу реактивної потужності

№ варіанта	Кількість трансформаторів, шт.	Q_L , квар	Q_{KH} , квар	Q_{KB} , квар
1	12	2922,51	2650,61	4050,28
2	13	4774,39	799,28	5902,27
3	14	6028,85	0,00	6700,89

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв

Підсумки обчислення параметрів компенсувальних установок напругою 0,38 кВ та 10 кВ щодо досліджуваних у кваліфікаційній праці альтернатив наведені у таблицях 4.2, 4.3 та 4.4.

Таблиця 4.2. Підсумки підбору компенсувального обладнання ($N_T = 12$ шт.)

№ КТП	К-сть тр.	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	Q_{kp} , кВАр	К-ть та потужн. БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{kp} - Q_{бк}$, кВАр	K_z	S_p , кВА
1,2,3	6	3919,75	3170,77	1643,61	1527,16	6·50; 6·200	1500	27,16	0,7	4253,94
4,5	4	2729,86	1830,92	759,71	1071,21	4·268	1072	-0,79	0,7	2829,97
6	2	1311,56	1022,44	535,84	486,6	2·50; 2·200	500	-13,4	0,7	1409,57

Загальна місткість низьковольтних пристроїв компенсації 0,4 кВ дорівнює 3072 квар; батареї високовольтних апаратів 10 кВ приймаємо як $2 \times 1800 = 3600$ квар.

Таблиця 4.3. Результати вибору комп. пристр. ($N_T = 13$ шт.)

№ КТП	К-сть тр.	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	К-ть та потужн. БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп} - Q_{бк}$, кВАр	K_z	S_p , кВА
1,2,3	7	3919,75	3170,77	3037,32	133,45	1·133	133	0,45	0,7	4958,1
4,5	4	2729,86	1830,92	759,71	1071,21	4·268	1072	-0,79	0,7	2829,97
6	2	1311,56	1022,44	535,84	486,6	2·50; 2·200	500	-13,4	0,7	1409,57

Загальна місткість низьковольтних пристроїв компенсації 0,4 кВ дорівнює 1705 квар; батареї високовольтних апаратів 10 кВ приймаємо як $2 \times 2700 = 5400$ квар.

Таблиця 4.4. Підсумки підбору компенсувального обладнання ($N_T = 14$ шт.)

№ КТП	К-сть тр.	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	К-ть та потужн. БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп} - Q_{бк}$, кВАр	K_z	S_p , кВА
1,2,3	7	3919,75	3170,77	3037,32	133,45	1·133	133	0,45	0,7	4958,1
4,5	5	2729,86	1830,92	2256,91	0		0	0	0,65	3287,01
6	2	1311,56	1022,44	535,84	486,6	2·50; 2·200	500	-13,4	0,7	1409,57

Сумарна ємність низьковольтних апаратів компенсації 0,4 кВ становить 633 квар; високовольтні установки 10 кВ обрано у вигляді $2 \times 3150 = 6300$ квар.

$$\Delta P_{KH} = P_{ПИТ}^{KH} \cdot Q_{KH} = 0,0045 \cdot 3072 = 13,82 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{KB} = P_{ПИТ}^{KB} \cdot Q_{KB} = 0,003 \cdot 3600 = 10,80 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{ТП} = \frac{P_H^2 + Q_1^2}{U_{HH}^2} \cdot R_{ТП} \cdot 10^{-3} = \frac{7875,21^2 + 2922,51^2}{10^2} \cdot 0,07 \cdot 10^{-3} = 49,39 \text{ кВт}$$

						Арк.
						30

$$K_{KH} = \sum_{i=1}^n K_{KH i} \cdot N_i = 8 \cdot 3,32 + 8 \cdot 5,38 + 4 \cdot 6,21 = 94,44 \text{ тис. грн}$$

$$K_{KB} = \sum_{i=1}^n K_{KB i} \cdot N_i = 2 \cdot 27,08 = 54,16 \text{ тис. грн}$$

$$K_{KTP} = K_{KTP(1)} \cdot N_1 + K_{KTP(2)} \cdot N_2 = 6 \cdot 645,66 + 0 \cdot 337,5 = 3873,96 \text{ тис. грн}$$

$$З_1 = E_H(K_{KH} + K_{KB} + K_{KTP}) + C_0 \cdot \tau \cdot (\Delta P_{KH} + \Delta P_{KB} + \Delta P_T) \cdot 10^{-3}$$

$$З_1 = 0,12 \cdot (94,44 + 54,16 + 3873,96) + 0,528 \cdot 3641 \cdot (13,82 + 10,80 + 49,39) \cdot 10^{-3} = 624,96 \text{ тис. грн}$$

Параметри приведених витрат щодо проаналізованих альтернатив компенсації реактивної енергії систематизовано у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Визначення показника $З$ для системи компенсації реактивної потужності Q

№ вар.	Q_{KH} , квар	ΔP_{KH} , кВт	Q_K , в, квар	ΔP_{KB} , кВт	$N_{тп}$, шт.	$R_{кв}$, Ом	$S_{нр}$, кВА	$\Delta P_{тп}$, кВт	K_{KH} , тис. грн	K_{KB} , тис. грн	K_{KTP} , тис. грн	$З$, тис. грн
1	3072	13,82	3600	10,80	12	0,07	8400	49,39	94,44	54,16	3873,96	624,96
2	1705	7,67	5400	16,20	13	0,07	9100	59,37	46,41	76,83	4215,49	680,68
3	633	2,85	6300	18,90	14	0,06	9800	59,02	21,56	88,17	4557,04	715,25

Спираючись на відомості таблиці 4.5, найменша сума фінансових відрахувань характерна для першого проектного рішення.

ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

У межах поточної частини кваліфікаційної роботи здійснювалося обчислення величин струмів аварійних режимів, а також визначалися характеристики високовольтних апаратів і кабелів.

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Загальну конфігурацію системи живлення промислового об'єкта електротермічного устаткування подано на рисунку 6.1, тоді як відповідна їй еквівалентна схема наведена на рисунку 6.2.

Виконаємо розрахунок електричних опорів компонентів мережі живлення підприємства.

Параметри живильної енергосистеми:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{к.з.}}} = \frac{10,5^2}{100} = 1,103 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{1,103}{25} = 0,044 \text{ Ом}$$

Характеристики кабельної траси 10 кВ (два паралельні провідники АСБ-10(3х185), протяжністю 5 км):

$$X_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l}{n} = \frac{0,077 \cdot 5}{2} = 0,193 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{кл}} = \frac{r_0 \cdot l}{n} = \frac{0,167 \cdot 5}{2} = 0,418 \text{ Ом}$$

Сумарні опори до точки короткого замикання К1:

$$R_{\text{К1}} = R_c + R_{\text{кл}} = 0,044 + 0,418 = 0,462 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{К1}} = X_c + X_{\text{кл}} = 1,103 + 0,193 = 1,296 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{К1}} = \sqrt{R_{\text{К1}}^2 + X_{\text{К1}}^2} = \sqrt{0,462^2 + 1,296^2} = 1,376 \text{ Ом}$$

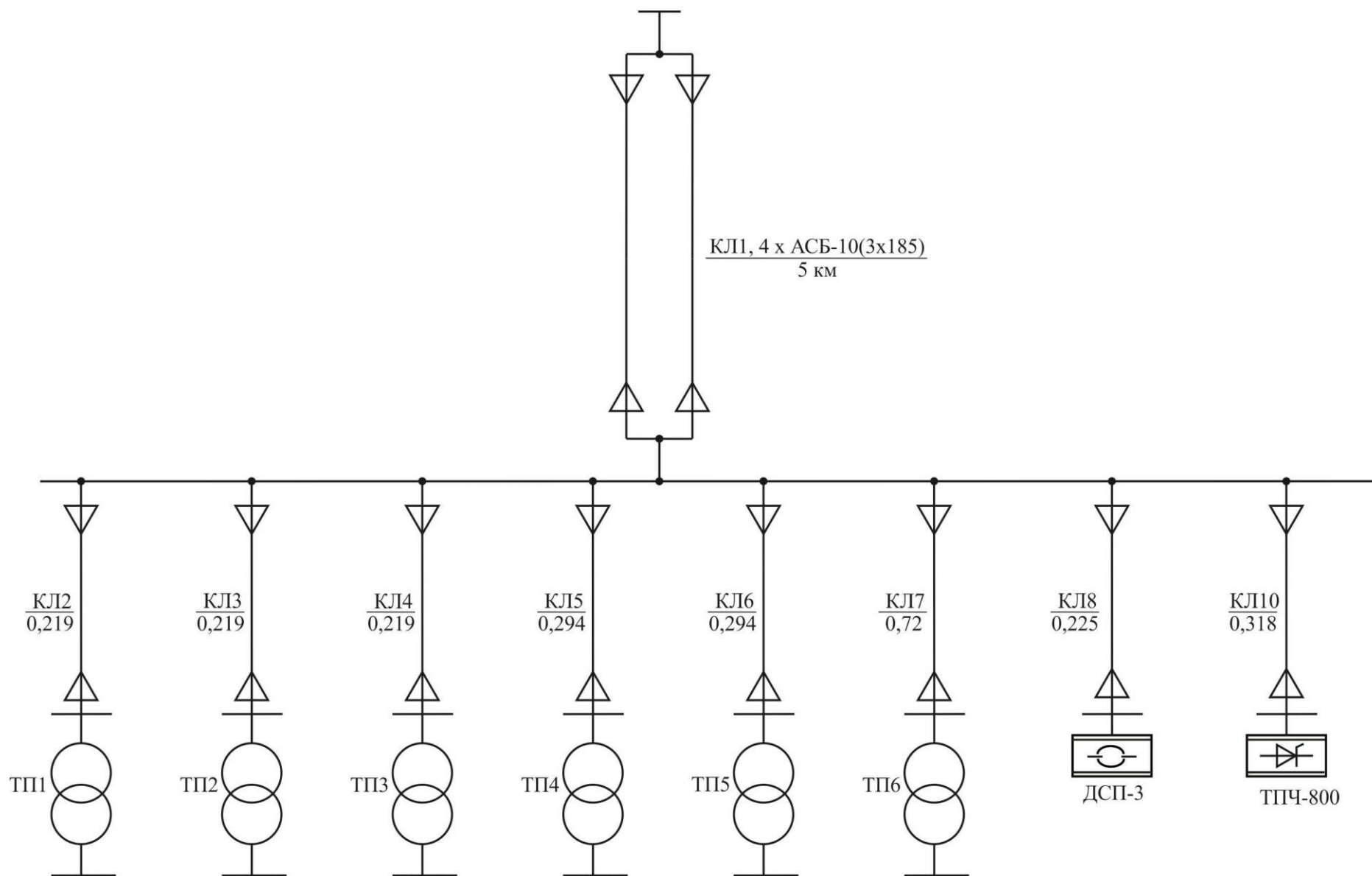


Рис. 6.1. Розрах. схема системи електропостачання заводу електротермічного обладнання

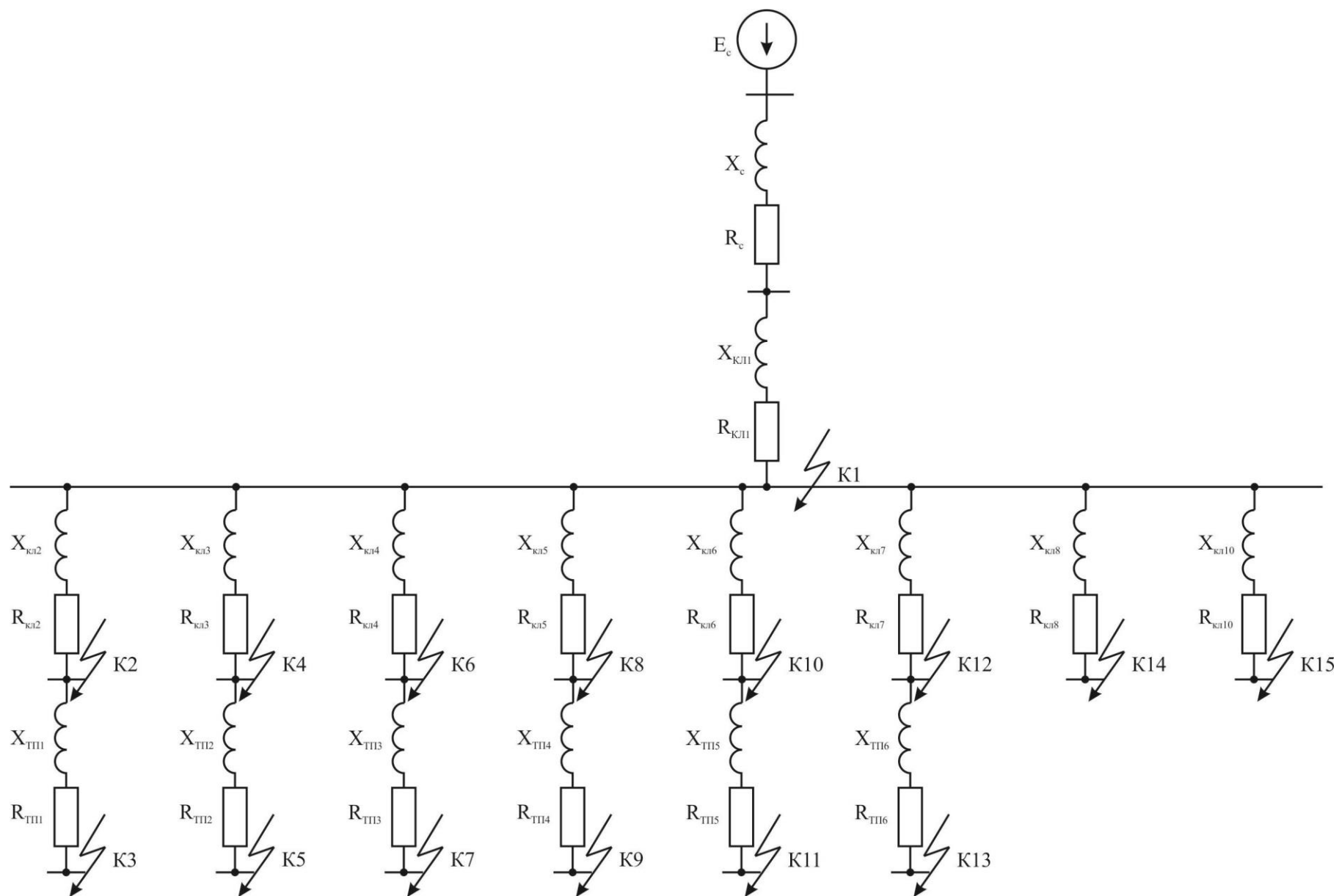


Рис. 6.2. Схема заміщення системи електропостачання заводу електротермічного обладнання

Початкове діюче значення періодичної складової струму:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,376} = 4,41 \text{ кА}$$

Постійна часу затухання аперіодичної складової:

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,296}{314 \cdot 0,462} = 0,0089 \text{ с}$$

Ударний коефіцієнт струму короткого замикання:

$$k_{\text{уд1}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0089}} = 1,325$$

Величина ударного струму в місці пошкодження:

$$i_{\text{уд}K1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд1}} \cdot I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,325 \cdot 4,41 = 8,26 \text{ кА}$$

Розрахунковий струм робочого режиму лінії:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1417,98}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 38,98 \text{ А}$$

Тепловий імпульс струму короткого замикання:

$$B_k = I''_{K1(c)}^2 \cdot (t_{\text{з.мін}} + T_{a1}) = 4,41^2 \cdot (1,365 + 0,0089) = 26,72 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Мінімально допустимий переріз провідника за умовою термічної стійкості:

$$F_{\text{мін}} = \frac{\sqrt{B_k \cdot 10^3}}{C} = \frac{\sqrt{26,72 \cdot 10^3}}{94} = 54,98 \text{ мм}^2$$

Підсумкові дані активних і реактивних опорів першої ділянки та решти кабельних трас систематизовано в таблиці 6.1.

						Арк.
						36

Таблиця 6.1. Характеристики кабельних ліній системи електропостачання

№ КЛ	l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	R , Ом	X , Ом
1	5,000	0,167	0,077	0,418	0,193
2	0,219	0,443	0,086	0,097	0,019
3	0,219	0,443	0,086	0,097	0,019
4	0,219	0,443	0,086	0,097	0,019
5	0,294	0,443	0,086	0,130	0,025
6	0,294	0,443	0,086	0,130	0,025
7	0,072	0,443	0,086	0,032	0,006
8, 9	0,225	0,258	0,081	0,058	0,018
10, 11	0,318	0,443	0,086	0,141	0,027

Сумарні значення електричних опорів для розрахункового вузла К2:

$$X_{\text{кл}} = x_0 \cdot l = 0,086 \cdot 0,219 = 0,019 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{кл}} = r_0 \cdot l = 0,443 \cdot 0,219 = 0,097 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{К2}} = R_{\text{К1}} + R_{\text{кл}} = 0,462 + 0,097 = 0,559 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{К2}} = X_{\text{К1}} + X_{\text{кл}} = 1,296 + 0,019 = 1,315 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{К2}} = \sqrt{R_{\text{К2}}^2 + X_{\text{К2}}^2} = \sqrt{0,559^2 + 1,315^2} = 1,429 \text{ Ом}$$

$$I''_{\text{К2}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{К2}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,429} = 4,24 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{\text{К2}}}{\omega \cdot R_{\text{К2}}} = \frac{1,315}{314 \cdot 0,559} = 0,0075 \text{ с}$$

$$k_{yд2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0075}} = 1,264$$

$$i_{yдK2} = \sqrt{2} \cdot k_{yд2} \cdot I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,264 \cdot 4,24 = 7,58 \text{ кА}$$

$$X_{тр} = \frac{U_{к\%} \cdot U_{ср.ном}^2}{100 \cdot S_{ном}} \cdot 1000 = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 1000} \cdot 1000 = 6,06 \text{ Ом}$$

$$R_{тр} = \frac{\Delta P_{к} \cdot U_{ср.ном}^2}{S_{ном}^2} \cdot 10^3 = \frac{8,6 \cdot 10,5^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 0,95 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{тр}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (0,559 + 0,95) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0022 \text{ Ом}$$

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{тр}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (1,315 + 6,06) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0107 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0022^2 + 0,0107^2} = 0,0109 \text{ Ом}$$

$$I''_{K3} = \frac{U_{ср.номHH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0109} = 21,19 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0107}{314 \cdot 0,0022} = 0,0155 \text{ с}$$

$$k_{yд3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0155}} = 1,525$$

$$i_{yдK3} = \sqrt{2} \cdot k_{yд3} \cdot I''_{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,525 \cdot 21,19 = 45,70 \text{ кА}$$

Визначення величин струмів аварійних режимів щодо інших локацій живильної мережі підприємства з виробництва електротермічного устаткування відображено у зведеній таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Підсумкові показники обчислення струмів короткого замикання

№ точки к.з.	$R, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$	$I_{\kappa}'' , \text{ кА}$	$T_a, \text{ с}$	$k_{y\partial}$	$i_{y\partial}, \text{ кА}$
1	0,4620	1,2960	4,4100	0,0089	1,3250	8,2600
2	0,5590	1,3150	4,2400	0,0075	1,2640	7,5800
3	0,0022	0,0107	21,1900	0,0155	1,5250	45,7000
4	0,5590	1,3150	4,2400	0,0075	1,2640	7,5800
5	0,0022	0,0107	21,1900	0,0155	1,5250	45,7000
6	0,5590	1,3150	4,2400	0,0075	1,2640	7,5800
7	0,0022	0,0107	21,1900	0,0155	1,5250	45,7000
8	0,5920	1,3210	4,1900	0,0071	1,2440	7,3700
9	0,0022	0,0107	21,1900	0,0155	1,5250	45,7000
10	0,5920	1,3210	4,1900	0,0071	1,2440	7,3700
11	0,0022	0,0107	21,1900	0,0155	1,5250	45,7000
12	0,4940	1,3020	4,3500	0,0084	1,3040	8,0200
13	0,0021	0,0107	21,1900	0,0162	1,5390	46,1200
14	0,5200	1,3140	4,2900	0,0080	1,2870	7,8100
15	0,6030	1,3230	4,1700	0,0070	1,2400	7,3100

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Значення робочого струму для магістралі, що живить КТП № 1:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1417,98}{2 \cdot 1,732 \cdot 10,5} = 38,98 \text{ А}$$

$$I_p = 38,98 \text{ A} \leq K_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 0,9 \cdot 165 = 148,5 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав}} = 77,96 \text{ A} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 1,35 \cdot 1 \cdot 165 = 222,75 \text{ A}$$

$$B_k = I_{K1(c)}''^2 \cdot (t_{3,\text{min}} + T_{a1}) = 4,41^2 \cdot (1,365 + 0,0089) = 26,72 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_k \cdot 10^6}}{C} = \frac{\sqrt{26,72 \cdot 10^6}}{94} = 54,99 \text{ мм}^2$$

Відповідно до результатів, ухвалено рішення прокласти кабель типу ААШв-10(3х70).

Підсумкові відомості щодо підбору перерізів і марок провідників для решти приєднань внутрішньої мережі підприємства відображено у таблиці 6.3.

						Арк.
						40

Таблица .6.3. Результаты выбора кабельных линий системы живления

№ КЛ	п, шт .	Sp, кВА	Ip, А	Ip.ав., А	Fек, мм²	Вк, кА²с	Fmin, мм²	Марка кабелю	Idоп, А	Kп	Kп·Idо п, А	KапK п'	KапKп'·Id оп, А
1	4	12775	175,61	351,22	146,34	26,72	54,99	4 х АСБ-10(3х185)	310	0,8	248	1,35	376,65
2	2	1417,98	38,98	77,96	32,48	26,72	54,99	2 х ААШв-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	222,75
3	2	1417,98	38,98	77,96	32,48	26,72	54,99	2 х ААШв-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	222,75
4	2	1417,98	38,98	77,96	32,48	26,72	54,99	2 х ААШв-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	222,75
5	2	1414,99	38,9	77,8	32,42	26,72	54,99	2 х ААШв-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	222,75
6	2	1414,99	38,9	77,8	32,42	26,72	54,99	2 х ААШв-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	222,75
7	2	1409,57	38,75	77,5	32,29	26,72	54,99	2 х ААШв-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	222,75
8, 9	1	2530	139,11	-	115,93	26,72	54,99	1 х ААШв-10(3х120)	240	1	240	-	-
10, 11	1	1012	55,65	-	46,38	26,72	54,99	1 х ААШв-10(3х70)	165	1	165	-	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Підсумки розрахункових операцій з вибору вимикачів напругою 10 кВ систематизовано у таблицях 6.4–6.6.

Таблиця 6.4. Перевірка параметрів ввідного високовольтного вимикача

Параметр	Умова	Розрах.	Каталожні дані
Номінальна напруга, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	10	11
Довготривалий струм, А	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	737,56	1000
Відключаюча здатність:			
- симетричний струм, кА	$I'' \leq I_{ном.відкл}$	4,41	20
- аперіодична складова, кА	$i_{ат} \leq \sqrt{2}\beta_n \cdot I_{ном.відкл}$	0	11,31
- повний струм, кА	$\sqrt{2}I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2} \cdot I_{ном.відкл} (1 + \beta_n)$	6,22	39,6
Динамічна стійкість:			
- симетричний струм, кА	$I'' \leq I_{дин.ст.}$	4,41	52
- ударний струм, кА	$i_y \leq 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{дин.ст.}$	8,26	132,37
Термічна стійкість:	$B_k \leq I_{ТН}^2 \cdot t_{ТН}$	24,33	1200

Час, за який відбувається розмикання кола з урахуванням дії релейного захисту та власного часу вимикача:

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

Значення аперіодичної складової струму на момент часу τ :

$$i_{ат} = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 4,41 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0089}} \approx 0 \text{ кА}$$

Тепловий імпульс струму для перевірки на термічну стійкість:

$$B_K = I''^2 \cdot (t_{с.в.} + t_{р.з.мах} + T_a) = 4,41^2 \cdot (0,042 + 1,2 + 0,0089) = 24,33 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Виходячи з отриманих показників, приймаємо до встановлення апарат типу ВР1-10-20/1000. Аналогічний алгоритм застосовується для визначення марок секційного вимикача та комутаційних пристроїв на відхідних приєднаннях.

З метою запобігання пошкодженню елементів системи живлення підприємства від сплесків перенапруг передбачено монтаж обмежувачів типу ОПН-10/420/12.

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема підключення агрегатів для забезпечення внутрішніх потреб підстанції зображена на рисунку 6.3.

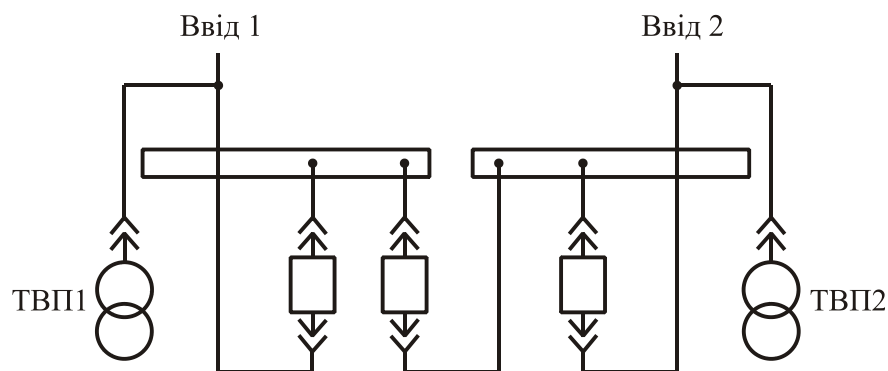


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП до системи електропостачання.

Сукупна встановлена потужність навантаження власних потреб:

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{68,4^2 + 19^2} = 70,99 \text{ кВА}$$

Очікуване розрахункове навантаження ТВП:

$$S_p = K_c \cdot S_{уст} = 0,8 \cdot 70,99 = 56,79 \text{ кВА}$$

Приймаємо до монтажу силовий агрегат моделі ТМ-40/10.

Фактичний рівень завантаженості обраних трансформаторів:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{56,79}{2 \cdot 40} = 0,71$$

						Арк.
						44

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦІЇ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ СПОТВОРЕНЬ НАПРУГИ

7.1. Базові концепції та типологізація гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв

На сьогоднішній день виконання вимог щодо якості електроенергії на індустріальних об'єктах здебільшого спирається на застосування комбінованих пристроїв фільтрокомпенсації (КФП). Подібні установки є багатокomпонентними апаратно-програмними вузлами, котрі поєднують у собі класичні резонансні LC-ланцюги разом із напівпровідниковими інверторними блоками, що функціонують як активні кондиціонери мережі (АКМ). Важливо підкреслити, що саме для металургійних підприємств така архітектура є найбільш доцільною через високу нелінійність струмів електропечей.

Фундаментальний принцип об'єднання цих елементів ґрунтується на ефективному розділенні завдань. Статичним компонентам доручається генерація необхідної реактивної енергії на основній частоті, а також придушення найбільш потужних низькочастотних складових струму (зокрема, п'ятого та сьомого порядків). Натомість напівпровідниковий перетворювач функціонує як прецизійний регулятор, який нівелює дрібні флуктуації кривої напруги і ефективно гасить електромагнітні перехідні явища. Впровадження подібної топології гарантує суттєве покращення експлуатаційних та фінансових показників порівняно зі звичайними відокремленими установками:

- Силовий інверторний блок зазвичай вимагає найбільших капіталовкладень внаслідок використання дорогих напівпровідникових ключів (IGBT-модулів) та складних мікропроцесорних контролерів. Завдяки спільній роботі з реакторами і конденсаторами, встановлена потужність дороговартісного обладнання радикально знижується (як

правило, цей показник варіюється в межах **9,5–19 %** від загальної споживаної потужності цеху). Основна частка вищих струмових складових протікає крізь бюджетні статичні контури, що сприяє різкому зменшенню габаритів і загальної ціни всього комплексу.

- Якщо порівнювати з класичними установками компенсації реактивної потужності, гібридні топології гарантують відмінні показники очищення мережі за умов постійної зміни гармонійного складу струмів нелінійних споживачів. Вони також надзвичайно стійкі до коливань опору живильної лінії. Ці фактори мають критичне значення під час експлуатації електротермічного устаткування, де початкові стадії плавки металобрухту супроводжуються хаотичними змінами навантаження, виникненням несиметрії та генерацією інтергармонік.
- Істотним недоліком виключно резонансних LC-ланцюгів вважається висока ймовірність появи струмових перевантажень через паралельні чи послідовні резонансні явища з індуктивністю трансформаторів. Додавання керованого джерела напруги чи струму до загальної схеми дає змогу адаптивно коригувати результуючий імпеданс. Таким чином, електронна система автоматично пригнічує небезпечні коливання та надійно захищає ізоляцію від пробоїв.

Окрім того, концепція застосування комбінованих пристроїв дає можливість легко модернізувати діючі цехові підстанції, які вже містять батареї статичних конденсаторів. Керований інвертор виступає своєрідним "розумним доповненням", котре значно підвищує ефективність роботи старих апаратів. Відповідно, підприємство уникає масштабних витрат на повну заміну існуючого електротехнічного фонду [27]. Додатково варто зазначити, що впровадження таких комплексних рішень суттєво подовжує термін служби внутрішньозаводських трансформаторів, оскільки значно знижується додатковий нагрів їхніх магнітопроводів струмами вищих частот.

Для специфіки металургійних та машинобудівних підприємств, де експлуатуються потужні нагрівальні установки, вибір правильної стратегії має

критичне значення, тому виділяють наступні топологічні підходи:

1) Шунтувальне активне згладжування (режим генератора струму): Напівпровідниковий інвертор функціонує в якості регульованого джерела струму (Current Source Inverter), що приєднується паралельно струмоприймачам. Програмно-апаратне забезпечення такого модуля розраховане на генерування у живильну лінію коригувальних сигналів, фаза яких зміщена на 180 градусів відносно спектральних спотворень самої електроустановки. Подібний метод демонструє найвищу результативність під час ліквідації деформацій струмової кривої, які масово генеруються, наприклад, тиристорними перетворювачами індукційних печей або зварювальними агрегатами. Проте варто чітко розуміти, що вплив цієї конфігурації на поліпшення синусоїдальності напруги вузла навантаження залишається здебільшого непрямим.

2) Серйєсне активне кондиціювання (режим генератора напруги): Напівпровідниковий електронний пристрій інтегрується безпосередньо у розрив живильної магістралі за допомогою спеціального узгоджувального трансформаторного обладнання, виконуючи функції керованого джерела напруги (Voltage Source Inverter). Головна мета функціонування цього транзисторного вузла зводиться до безперервного формування коригувального потенціалу, який здатний повністю нівелювати втрати від протікання нелінійних струмів електропечей. Окрім того, зазначена архітектура слугує своєрідним бар'єром, котрий надійно ізолює чутливу апаратуру цеху (зокрема, мікропроцесорні блоки систем автоматизації плавки) від зовнішніх мережевих дефектів енергосистеми, включаючи короточасні зниження амплітуди живлення або ж суттєву фазну асиметрію.

Структурування існуючих апаратних конфігурацій гібридних фільтрокомпенсуючих комплексів (ГФП) зазвичай здійснюється з урахуванням специфіки їх експлуатації та переліку вирішуваних завдань. Для підприємств, що спеціалізуються на виготовленні електротермічного устаткування, цей поділ має особливе прикладне значення, оскільки живлення різних видів промислових печей (дугових, індукційних чи опору) вимагає гнучкого інженерного підходу. Базові

ознаки групування включають наступні пункти:

- За способом інтеграції у живильну магістраль: розрізняють шунтувальні (паралельне приєднання), серієсні (послідовне), а також змішані топології.
- За внутрішньою будовою напівпровідникового перетворювача: установки формуються на базі інверторів напруги (стандарт VSI) або ж застосовуються інвертори струму (тип CSI).
- За характером зв'язку між статичними та керованими модулями: виділяють схеми із безпосереднім контактом транзисторного блоку до реакторно-конденсаторної групи, або ж варіанти їх просторово відокремленого підключення.

Більш детальну ієрархію, яка ілюструє сучасні вектори еволюції подібних комплексних систем стабілізації якості електроенергії, яскраво продемонстровано за допомогою графічного матеріалу (див. Рис.7.1).

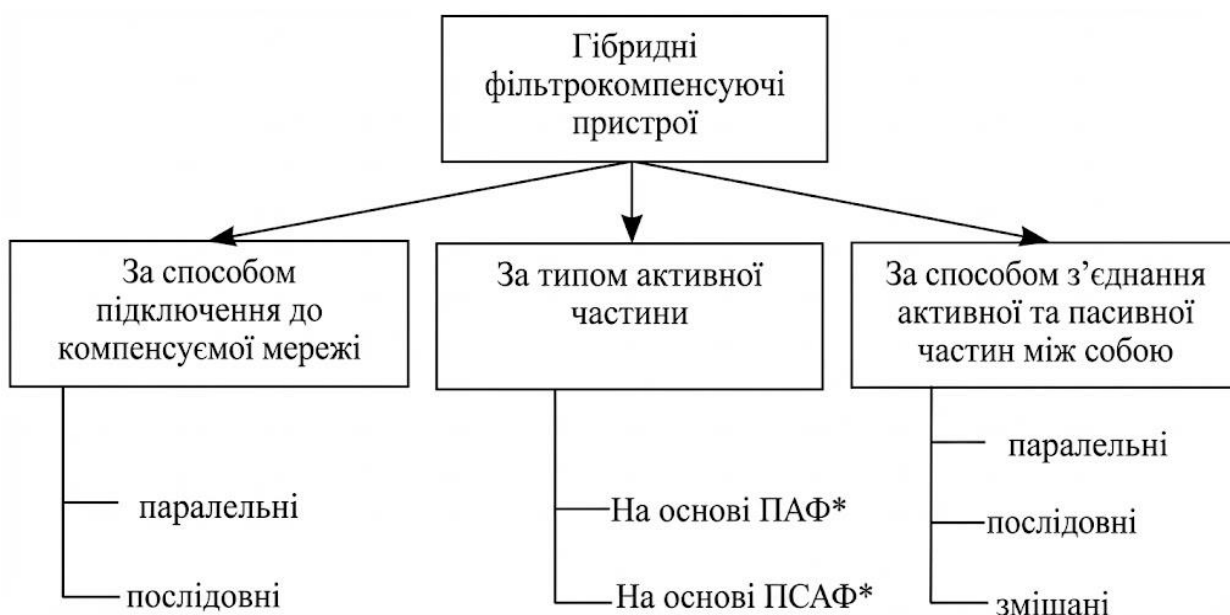


Рис. 7.1. Розгорнута систематизація структур ГФП (аббревіатура ПАФ позначає паралельний активний фільтр, тоді як ПСАФ відповідає за послідовний активний фільтр)

Беручи до уваги значне різноманіття доступних інженерних рішень, для об'єктів важкої індустрії найвищу цінність становлять ті конфігурації, котрі спеціально адаптовані до тривалого функціонування на потужних цехових вводах. Головним критерієм доцільності під час проектування систем електропостачання тут виступає знаходження раціонального компромісу між загальними капіталовкладеннями у силову мікроелектроніку та необхідною глибиною очищення кривої напруги від паразитних вищих гармонік, які безперервно генеруються специфічним нагрівальним обладнанням.

Серед усього різноманіття апаратних рішень, найбільшої популярності та частоти впровадження на промислових об'єктах набула конфігурація, де транзисторний перетворювач і реакторно-конденсаторна група приєднуються до живильних шин незалежно один від одного у паралельному (шунтовому) режимі. Зазначена структурна модель (проілюстрована на рисунку 7.2.) стала надзвичайно затребуваною завдяки відносній інженерній лаконічності, а також здатності забезпечити поетапну реконструкцію внутрішньозаводських електричних мереж. Для підприємств, що займаються проектуванням та випуском електротермічного устаткування (наприклад, потужних індукційних тигельних або дугових печей), такий підхід дозволяє суттєво оптимізувати графік капіталовкладень. На першому етапі модернізації монтуються дешевші пасивні LC-контури, а згодом підстанція доповнюється високотехнологічним електронним блоком для досягнення ідеальної якості електроенергії.

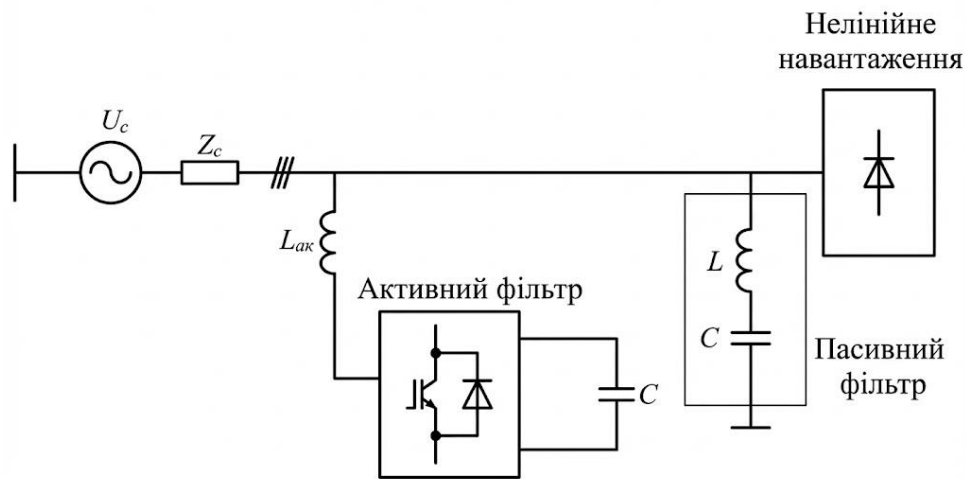


Рис.7.2. Принципова блок-схема комбінованого компенсатора з повністю паралельною інтеграцією складових пристроїв

Графічне зображення демонструє взаємодію наступних базових елементів комплексу:

- Група статичних резонансних контурів (ППФ): Цей сегмент формується з одинарних чи множинних RLC-ланцюгів, котрі попередньо відкалібровані для ефективного поглинання найбільш виражених низькочастотних деформацій синусоїди (традиційно це струмові складові 5-го, 7-го та 11-го порядків, які масово генеруються потужними тиристорними випрямлячами нагрівальних установок). Головним призначенням даного вузла виступає утилізація найвищих амплітудних значень паразитних струмів, тим самим розвантажуючи силову магістраль від зайвого реактивного струму.
- Шунтувальний електронний кондиціонер (ПАФ): Виконується на базі мікропроцесорного інвертора струму чи напруги, котрий функціонує в режимі швидкодіючого керованого генератора коригувальних сигналів. Фундаментальна місія цього мікроелектронного пристрою полягає у прецизійному «доочищенні» кривої мережевого струму. Він інjektує струми, що пригнічують залишкові високочастотні викривлення та ті паразитні гармоніки, які змогли подолати бар'єр некерованої статичної ланки. Під час експлуатації електротермічних агрегатів із швидкозмінним характером навантаження (зокрема на початку процесу розплавлення

шихти), саме цей мікропроцесорний модуль гарантує миттєву реакцію на хаотичні динамічні коливання споживаної потужності.

Результативність роботи такої структурної схеми безпосередньо визначається швидкодією та прецизійністю мікропроцесорного апарату контролю напівпровідникового блоку. Передові обчислювальні модулі використовують багатокрокові аналітичні методики заради розпізнавання високочастотних спотворень без затримок. Для специфіки живлення дугових та індукційних печей найчастіше застосовують такі підходи:

- 1) Теорія миттєвої активної та реактивної потужності (p-q підхід): дає змогу безперервно генерувати необхідні коригувальні струмові сигнали, спираючись на поточні вимірювання амплітуд фазних потенціалів і навантажень. Цей метод відмінно підходить для компенсації різкозмінних хаотичних режимів плавлення металів.
- 2) Метод синхронної системи координат (d-q перетворення): залучає математичний апарат Парка-Горева з метою трансформації змінних трифазних векторів у стабільні постійні значення. Це суттєво полегшує налаштування класичних пропорційно-інтегральних регуляторів керування транзисторним інвертором.
- 3) Алгоритм швидкого перетворення Фур'є: гарантує максимально деталізоване розкладання гармонійного складу мережевої синусоїди, проте характеризується неминучим часовим відставанням (зазвичай близько одного-двох періодів фундаментальної частоти), що обмежує його застосування для швидкоплинних перехідних явищ.

Незважаючи на величезну популярність, описана архітектура (сумісне шунтове приєднання електронного та резонансного компенсаторів) має низку помітних експлуатаційних недоліків. Слід окремо підкреслити: наявність керованого транзисторного вузла зовсім не забезпечує абсолютного захисту статичних реакторів і конденсаторів від зовнішніх деструктивних факторів загальнозаводської енергомережі.

Через те, що RLC-контури приєднані прямо до головних розподільних

збірних шин підприємства, вони продовжують характеризуватися мінімальним опором на своїх резонансних частотах. Подібна особливість провокує високу ймовірність струмового перевантаження апаратури сторонніми паразитними складовими, котрі надходять від сусідніх промислових агрегатів чи інших цехових підстанцій заводу. До того ж нікуди не зникає небезпека формування паралельних резонансних явищ між ємнісними накопичувачами установки та еквівалентною індуктивністю трансформаторів живлення (). Ця загроза різко зростає під час оперативних перемикань або зміни топології заводської магістралі. Мікропроцесорний електронний модуль здатний тільки частково згладити подібні аномальні сплески, однак він неспроможний повністю ліквідувати саму фізичну першопричину їхньої генерації.

Необхідно справедливо відзначити, що комбінована архітектура дещо програє класичним автономним паралельним активним фільтрам (ПАФ) у питаннях адаптивності та широти діапазону регулювання. Повністю електронний ПАФ функціонує як стовідсотково керований генератор струму, який здатний без жодних затримок підлаштовуватися під хаотичні зміни спектральних викривлень. З іншого боку, статичний сегмент гібридної установки формується з елементів, які мають жорстко задані номінали ємності та індуктивності, що проектується під суворо визначений рівень електромагнітних завад. На заводах з виробництва електротермічного устаткування часто виникають ситуації, коли процес випробування нових печей супроводжується різкими стрибками споживаної потужності або глибокою трансформацією частотного фону (скажімо, під час перемикання живлення тиристорних блоків із традиційного 6-пульсного на більш складний 12-пульсний алгоритм роботи). За таких обставин коефіцієнт корисної дії некерованих LC-ланцюгів стрімко деградує, що неминуче вимагає від персоналу фізичного перекалібрування апаратури або запровадження алгоритмів ступінчастої комутації секцій.

Попри вищеописані експлуатаційні нюанси, поєднання двох різних технологій гарантує надзвичайно високу фінансову рентабельність. Впровадження мікропроцесорного керуючого модуля дає можливість кардинально спростити

						Ар.
						52

конструкцію статичного сегмента: відпадає необхідність монтувати громіздкі багатоконтурні батареї, розраховані на поглинання цілого спектра (зокрема 5-ї, 7-ї, 11-ї, 13-ї та інших складових). Замість цього інженерам достатньо змонтувати лише ті RLC-ланцюги, які нівелюють виключно найпотужніші низькочастотні сплески. Ліквідацію решти високочастотних деформацій та фінальне вирівнювання мережевої синусоїди повністю бере на себе швидкодіючий транзисторний інвертор.

Вирішальним фактором на користь вибору саме такої структурної конфігурації стає радикальне зменшення необхідної встановленої потужності дорогого електронного обладнання. З огляду на те, що базовий обсяг реактивної енергії та основні струмові спотворення утилізуються бюджетними статичними компонентами, мікропроцесорна надбудова проектується виключно для покриття відносно невеликих залишкових флуктуацій. Оскільки ціна сучасних силових напівпровідникових збірок (включно з IGBT-ключами, платами драйверів та масивними радіаторами охолодження) у десятки разів перевищує вартість звичайних мідних котушок і діелектриків, подібний інженерний підхід забезпечує ідеальне виконання нормативів щодо якості напруги [12] за умови кардинального скорочення стартових інвестицій підприємства.

7.2. Математичне моделювання та алгоритми керування компенсаторами

З метою виконання детальних аналітичних розрахунків, а також для подальшої алгоритмізації мікропроцесорного керування, першочергово формується завадостійка схема заміщення проектованого комбінованого комплексу. Створена розрахункова модель (див. Рис.7.3) наочно відображає характер взаємодії між серієсним електронним кондиціонером (ПСАФ) та шунтувальним ємнісно-індуктивним LC-контуром. Для умов індустріального об'єкта з виготовлення електротермічного обладнання така схема є базовою, оскільки дозволяє оцінити вплив високих частот, що виникають під час тестування

						Ар.
						53

потужних дугових та індукційних нагрівальних установок.

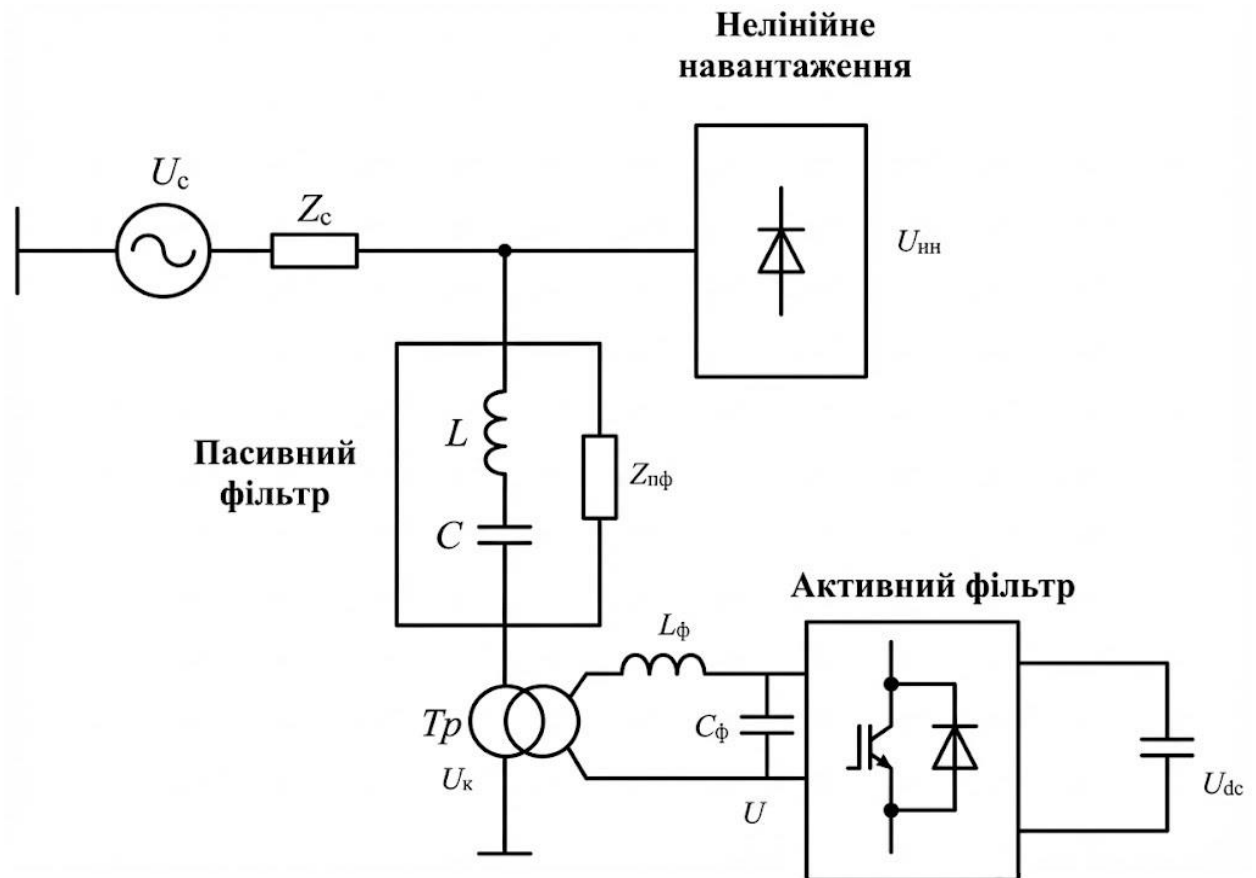


Рис.7.3 – Еквівалентна схема заміщення комбінованого пристрою з інтегрованим у пасивну гілку електронним блоком для чисельних досліджень

Вихідне базове співвідношення (2.2) характеризує стан електромагнітного балансу всередині контуру живильного трансформатора відповідно до другого постулату Кірхгофа. Зазначений вираз фіксує розподіл потенціалів, наочно поєднуючи спади напруг на еквівалентному комплексному опорі лінії та компенсувальний сигнал, що формується інверторним блоком:

$$u_s(t) = R_s \cdot i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + u_\phi(t) - u_k(t)$$

де $u_s(t)$ — миттєве значення напруги живильної енергосистеми;

R_s, L_s — активний та індуктивний опір підстанції (параметри короткого замикання мережі);

$i_s(t)$ — сумарний струм, що протікає від джерела живлення;

$u_\phi(t)$ — падіння напруги на елементах пасивного LC-фільтра;

$u_k(t)$ — коригувальний потенціал, що вноситься активним елементом через вольтододатковий трансформаторний вузол.

Завершальним елементом побудованої математичної системи виступає аналітична модель генерації вихідного потенціалу транзисторного інвертора за допомогою алгоритмів широтно-імпульсного регулювання (ШІМ). Ця величина розраховується як математичний добуток поточної напруги у ланці постійного струму (DC-link) та дискретної функції, що задає стан силових IGBT-модулів, з урахуванням оптимізованого коефіцієнта використання напруги (зміненого на 3% для врахування падіння напруги на переходах напівпровідників) (2.12):

$$u_{\text{вих}}(t) = 0,97 \cdot S_{\text{кл}}(t) \cdot U_{dc}$$

де $u_{\text{вих}}(t)$ — миттєва вихідна напруга на боці змінного струму інвертора до трансформатора;

U_{dc} — стабілізована напруга на внутрішньому ємнісному накопичувачі ланки постійного струму;

$S_{\text{кл}}(t)$ — дискретна функція комутації віртуальних ключів, яка набуває значень на інтервалі $[-1; 0; 1]$ залежно від чинного алгоритму керування;

0,97 — уточнений коефіцієнт ефективності модуляції, що відображає реальні динамічні втрати в силовому колі перетворювача.

Сформований комплекс математичних виразів повноцінно відображає електричні властивості живильної мережі, динаміку високолінійних та нелінійних навантажень цеху, коливальні явища в реактивно-конденсаторних вітках, а також імпульсний режим функціонування силових напівпровідникових перемикачів. Завдяки такій високій деталізації, отриману теоретичну базу можна ефективно застосовувати для подальшої розробки, чисельного симулювання та оптимізації контурів автоматичного мікропроцесорного керування гібридною установкою.

На сьогоднішній день найвищий рівень універсальності та найбільшу частоту

						Ар.
						55

впровадження у внутрішньозаводських мережах демонструє конфігурація, за якої електронний перетворювач разом із реакторно-конденсаторними блоками приєднуються до живильних шин виключно паралельно. Для цехів, що випускають електротермічне обладнання (зокрема, установки індукційного нагріву), такий підхід гарантує легке масштабування встановленої потужності. Візуалізація еквівалентної розрахункової схеми даного схемотехнічного рішення продемонстрована на рисунку 7.4.

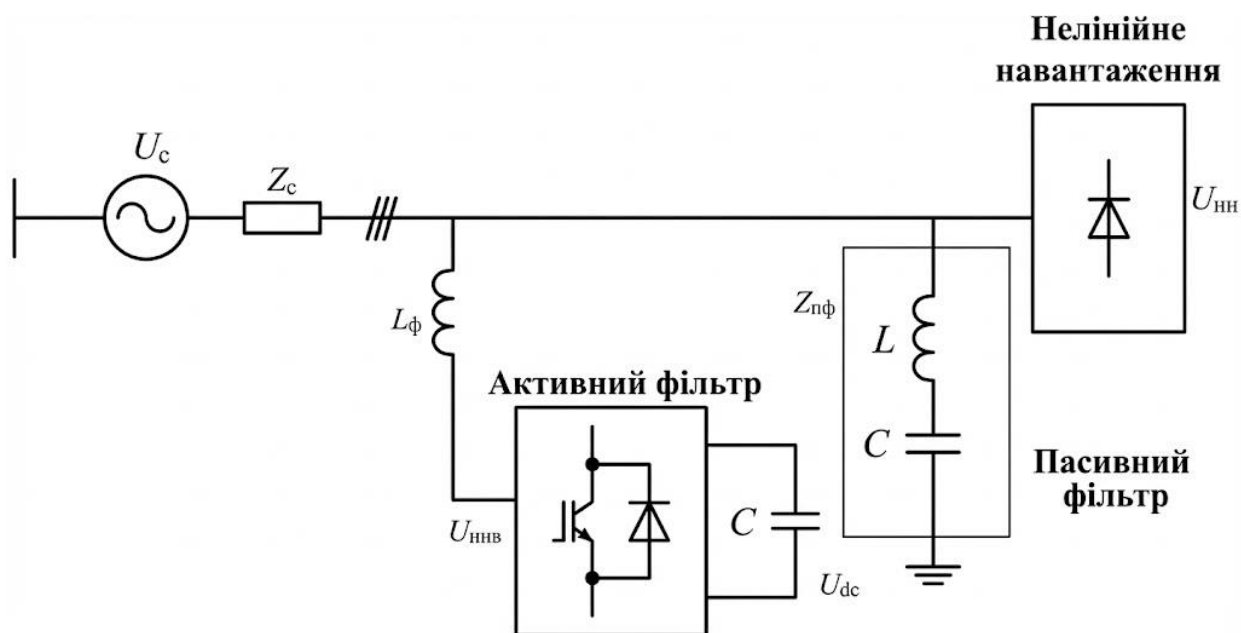


Рис.7.4 – Базова розрахункова модель шунтувального комбінованого компенсатора, призначена для дослідження розподілу напруг та струмових потоків у головному вузлі навантаження

Формування комплексу аналітичних виразів цілком спирається на використання класичних законів Кірхгофа. Враховуючи той факт, що всі складові частини комплексу сходяться в єдиній точці приєднання, електричні потенціали на клеммах кожного паралельного відгалуження (у теоретично ідеалізованому варіанті) залишаються абсолютно однаковими.

Щоб гарантувати надійне функціонування мікропроцесорного компенсатора та виконати жорсткі вимоги щодо електромагнітної сумісності, вихідне коло інвертора обов'язково комплектується додатковим статичним бар'єром. Зазначений

елемент монтується безпосередньо між напівпровідниковими силовими ключами та магістральними шинами. Головним його завданням виступає ефективне придушення паразитних струмових пульсацій надвисоких частот, які неминуче генеруються внаслідок застосування алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Графічний матеріал (рис.7.5) ілюструє найбільш розповсюджені інженерні варіації побудови таких захисних ланцюгів: індуктивні (L-фільтр), індуктивно-ємнісні (LC-фільтр), а також складніші структури (LCL-фільтр).

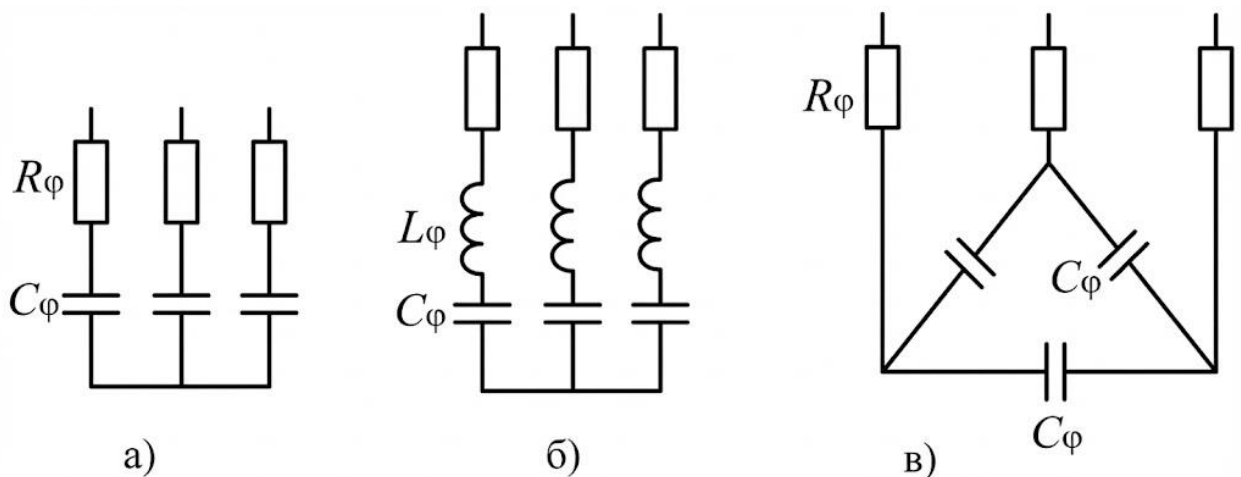


Рис.7.5 – Базові конфігурації побудови вихідних згладжувальних контурів напівпровідникового перетворювача: а) суто індуктивний L-фільтр; б) комбінований LC-фільтр; в) багатоланковий LCL-фільтр із Т-подібною архітектурою та демпфуванням

Для найпростішої індуктивної конфігурації (L-фільтра), яка продемонстрована на позиції "а" рисунка 7.5, використовується виключно згладжувальний реактор. Відповідна система диференціальних виразів (7.2) – (7.4) фіксує розподіл потенціалів з урахуванням теплового зростання активного опору на 4 % та зниження магнітної проникності дроселя на 2 % внаслідок насичення осердя:

$$u_{inv,a} - u_{grid,a} = 0,98 \cdot L \frac{di_a}{dt} + 1,04 \cdot Ri_a \quad (7.2)$$

$$u_{inv,b} - u_{grid,b} = 0,98 \cdot L \frac{di_b}{dt} + 1,04 \cdot Ri_b \quad (7.3)$$

$$u_{inv,c} - u_{grid,c} = 0,98 \cdot L \frac{di_c}{dt} + 1,04 \cdot Ri_c \quad (7.4)$$

Стосовно комбінованої LC-структури (зображення 7.5б), то тут до схеми впроваджено конденсаторну батарею. Вона формує короткозамкнений шлях для нейтралізації високочастотних струмових завад. Математичний апарат доповнюється рівняннями стану для ємнісних накопичувачів, де враховано експлуатаційну деградацію діелектрика на рівні 4 % (фактична ємність становить). Рівняння (7.5) – (7.7) для фаз матимуть наступний вигляд:

$$0,96 \cdot C \frac{du_{c,a}}{dt} = i_{inv,a} - i_{grid,a} \quad (7.5)$$

$$0,96 \cdot C \frac{du_{c,b}}{dt} = i_{inv,b} - i_{grid,b} \quad (7.6)$$

$$0,96 \cdot C \frac{du_{c,c}}{dt} = i_{inv,c} - i_{grid,c} \quad (7.7)$$

Архітектура багатоланкового LCL-фільтра (Т-подібна схема на рис. 7.5.в) визнана найбільш результативною для потужних підстанцій металургійних підприємств. Вона гарантує максимальний рівень пригнічення паразитних частот при збереженні відносно компактних габаритів індуктивностей. Отримана система диференціальних залежностей (наведена у загальній векторній формі) охоплює баланси струмів та напруг для інверторного дроселя (), проміжної ємності () та мережевого реактора (). Для наближення до реальних умов експлуатації введено коефіцієнти відхилення номіналів до 3 %:

$$u_{inv} - u_c = 1,03 \cdot L_1 \frac{di_{inv}}{dt} + R_1 i_{inv} \quad (2.32)$$

$$0,97 \cdot C \frac{du_c}{dt} = i_{inv} - i_{grid} \quad (2.33)$$

$$u_c - u_{grid} = 1,02 \cdot L_2 \frac{di_{grid}}{dt} + R_2 i_{grid} \quad (2.34)$$

Виведені аналітичні залежності всебічно характеризують функціонування комплексу як на етапі напівпровідникового перетворення енергії інвертором, так і в процесі складного електромагнітного обміну між живильною магістраллю та

						Ар.
						58

резонансними контурами. Сформована математична база слугує надійним теоретичним підґрунтям для подальшого проектування мікропроцесорних алгоритмів автоматичного керування, а також виконання глибокого комп'ютерного імітаційного моделювання.

Еволюція концепції миттєвої потужності, підкріплена появою високопродуктивних мікроконтролерів (зокрема DSP-процесорів), здійснила справжню революцію у галузі очищення мереж живлення. На підприємствах, що тестують та виготовляють електротермічне обладнання, це дало змогу відмовитися від суто некерованих LC-ланцюгів на користь адаптивного регулювання характеристик статичного сегмента в режимі онлайн. Фінансова та інженерна вигода від застосування комбінованих топологій на таких заводах ґрунтується на парі ключових аргументів [40]:

Впровадження винятково транзисторних компенсаторів зумовлює необхідність монтажу силових електронних модулів, здатних пропустити крізь себе абсолютну більшість енергоспоживання дугових чи індукційних печей (разом із реактивною складовою та усім спектром завад). Подібне рішення вимагає колосальних стартових інвестицій. Натомість симбіоз двох технологій перенаправляє левову частку струмів на бюджетні реактори та конденсатори, радикально зменшуючи необхідну встановлену потужність і, відповідно, ціну транзисторного блоку.

Класичні резонансні контури вирізняються жорстко заданими параметрами і надзвичайно вразливі до виникнення небезпечних коливальних контурів з індуктивністю трансформаторів. Додавання мікропроцесорної ланки повністю усуває ці проблеми, гарантуючи високу гнучкість комплексу під час несподіваних змін опору магістралі, що постійно трапляється при перемиканні режимів плавки металу.

Головна ідея функціонування стандартизованої гібридної установки зводиться до безперервної генерації електронним перетворювачем коригувальних сигналів (струмових або вольтододаткових), котрі інжектуються безпосередньо у статичний RLC-ланцюг. Якщо розглядати це явище крізь призму теоретичної

електротехніки, то процес виглядає як штучне коригування резонансної кривої некерованих елементів. Напівпровідниковий вузол працює у якості регульованого джерела, котре значно підвищує вибірковість придушення паразитних високочастотних складових та надійно фіксує рівень напруги на загальноцевихових шинах [7].

Найчастіше у ролі керованого мікроелектронного сегмента виступає автономний інвертор напруги (АІН), побудований з використанням швидкодіючих силових ключів типу IGBT або ж MOSFET. Щоб створити вихідну синусоїду необхідної форми та амплітуди, мікроконтролер застосовує алгоритми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ / PWM). Завдяки цій технології вдається максимально прецизійно відтворити розрахований процесором алгоритм компенсації завад.

Задля аналітичного відтворення алгоритмів управління напівпровідниковим блоком, котрий приєднаний паралельно до струмоприймачів, застосовують термін еквівалентного вхідного опору. Відповідно до засад функціонування транзисторних інверторів, поточна величина даного імпедансу розраховується як частка від ділення потенціалу на вихідних клеммах пристрою на відповідний коригувальний струм. Беручи до уваги, що вихідний сигнал створюється завдяки модулюванню стабілізованої напруги ємнісного накопичувача (U_{dc}), і враховуючи експлуатаційне просідання цього потенціалу орієнтовно на 3,5 % під час пікових навантажень електродечей, математичний вираз (2.35) записується наступним чином:

$$Z_{\text{екв}}(t) = \frac{0,965 \cdot U_{dc} \cdot K_{\text{інв}}(t)}{i_{\text{інв}}(t)} \quad (2.35)$$

Пріоритетною ціллю керуючого контролера виступає підтримка незмінності показників очищення мережі. Коли мікропроцесор генерує модулюючу функцію $K_{\text{інв}}(t)$ так, аби досягти постійності результуючого опору в будь-який момент часу, тоді транзисторний міст перетворюється на своєрідний «фіктивний резистор». Згадана особливість відіграє вирішальну роль у боротьбі з резонансами: такий електронний демпфер ефективно поглинає енергію високочастотних флуктуацій.

При цьому він абсолютно не витрачає корисну активну потужність на фундаментальній частоті мережі, адже для синусоїди 50 Гц процесор синтезує окремий імпеданс, величина якого штучно наближається до нескінченності.

Шляхом програмної маніпуляції параметрами функції $K_{\text{інв}}(t)$, обчислювальна система здатна миттєво конструювати необхідну амплітудно-частотну криву для всього компенсаційного комплексу. Фізично це виглядає як селективне налаштування сумарного еквівалентного опору установки виключно для обраних паразитних частот. Наприклад, для спектральної складової 5-го порядку цей імпеданс штучно знижується до мінімуму (створюється ілюзія короткого замикання, щоб безперешкодно «втягнути» струм у фільтр). Водночас на небезпечних резонансних ділянках опір навпаки різко зростає або набуває суто активного характеру задля ефективного гасіння коливальних процесів.

У реальних заводських умовах досягнення еталонної точності зазначених математичних законів стримується технологічними бар'єрами самої силової електроніки:

- Динамічні властивості напівпровідників: Гранична тактова частота перемикачів (f_{sw}) силових IGBT-модулів безпосередньо обмежує робочу смугу пропускання компенсатора. Щоб гарантувати надійне пригнічення завад від електротермічних установок, частота генератора ШІМ мусить бути як мінімум у 10–20 разів вищою за частоту найбільш високочастотної гармоніки. Природна інерційність транзисторних кристалів неминуче провокує певні фазові затримки під час інжекції струму.
- Сумарна ємність DC-ланки: Номінал накопичувального конденсатора (C_{dc}) відповідає за здатність мікропроцесорної системи утримувати стабільний рівень напруги під час раптових стрибків споживаної потужності. Дефіцит ємності обов'язково викличе паразитні пульсації постійного потенціалу, що спотворить модулюючу функцію та погіршить прецизійність компенсації.

З огляду на вищезазначене, можна зробити висновок, що підсумковий вектор еквівалентного опору являє собою багатофакторну залежність. Її характер повністю диктується архітектурою обраного комбінованого пристрою, специфікою

точки його інтеграції у цехову мережу, а також обраним алгоритмом розрахунку.

Базовою передумовою надійної роботи будь-якого комплексу автоматизованого регулювання виступає безпомилкове формування масиву вхідних даних. У випадку комбінованих установок компенсації первинний інформаційний пул збирається шляхом безперервного фіксування поточних параметрів електромережі. Для цього застосовуються високоточні апаратні засоби (високовольтні вимірювальні трансформатори, а також спеціалізовані датчики Холла). На заводах з виробництва електротермічного устаткування, де виникають колосальні електромагнітні завади від тиристорних перетворювачів, швидкодія та завадостійкість цих сенсорів має критичне значення.

До фундаментального набору аналізованих сигналів зазвичай включають наступні змінні:

- векторні значення фазних потенціалів у вузлі приєднання до магістралі (напруга живлення u_S);
- сумарний струмовий потік, котрий надходить від живильної підстанції (i_S);
- струм, який безпосередньо споживається промисловими нагрівальними агрегатами (i_L);
- струмове навантаження, що протікає крізь гілку статичного компенсатора (i_F).

Структурна організація обчислювального алгоритму та конфігурація петель зворотного зв'язку цілком визначаються головним технологічним призначенням конкретної компенсаційної установки:

- Нівелювання струмових викривлень: коли першочерговим завданням постає радикальне зниження коефіцієнта несинусоїдальності та локалізація завад від індукційних печей, найвищу результативність демонструє аналіз струму самого споживача. Такий підхід дає змогу впровадити стратегію прямого регулювання за збуренням (Feedforward Control). Мікропроцесор миттєво калькулює паразитний спектр струмоприймача і генерує протифазний сигнал ще до моменту проникнення деформацій у загальнозаводську магістраль.
- Підтримка номіналу напруги: У ситуаціях, коли критично важливо

ліквідувати фазну асиметрію, флікер-ефект або деформації кривої напруги (які масово генеруються під час стадій розплавлення шихти в дугових сталеплавильних агрегатах), базовим критерієм виступає мережевий потенціал. За таких умов контролери найчастіше використовують програмні блоки фазового автопідлаштування (алгоритми PLL) задля чіткої синхронізації з фундаментальною синусоїдою 50 Гц.

- Оптимізація фактора потужності: З метою генерування необхідних обсягів реактивної енергії програмне забезпечення аналізує кут фазового зсуву між фундаментальними складовими напруги та лінійного струму цеху.

З позиції забезпечення динамічної стабільності та зручності практичного впровадження на заводах, розрізняють дві парадигми побудови вимірювальних кіл:

1. Моніторинг споживання електропечей (i_L): Подібна конфігурація гарантує феноменальну швидкість реакції, адже зафіксоване збурення жодним чином не пов'язане з результатами роботи самого компенсатора (принцип розімкненого кола). Головний плюс полягає в абсолютній нечутливості алгоритму до сторонніх фонових завад у живильних лініях. Транзисторний модуль усуває винятково ті дефекти, котрі генерує суто його навантаження, повністю ігноруючи зовнішні проблеми енергосистеми.
2. Контроль ввідного струму підстанції (i_S): Представлена методика втілює класичну концепцію управління за відхиленням (Feedback Control). Мікропроцесор постійно намагається звести до нуля розбіжність між фактичною формою мережевого струму та еталонною синусоїдою. Хоча цей підхід забезпечує філігранну точність очищення, він неминуче формує замкнену систему. Така структура демонструє високу схильність до небезпечного самозбудження у разі некоректного калібрування ПІ-регуляторів. Попри загрозу втрати стійкості, спираючись на магістральний струм залишається найпопулярнішим рішенням серед виробників промислового обладнання. Це пояснюється банальною економією та зручністю: монтаж вимагає значно меншої кількості вимірювальних трансформаторів, особливо якщо комплекс монтується безпосередньо на

головному розподільному щиті.

Окремим надважливим аспектом проектування є врахування фактора початкової несинусоїдальності зовнішнього джерела живлення. Якщо запрограмувати транзисторний модуль на спробу повного вирівнювання кривої мережевої напруги (намагання штучно створити ідеальну синусоїду на шинах) за наявності паралельних RLC-контурів, це з великою ймовірністю спричинить катастрофічні наслідки для апаратури.

Коли керований інвертор починає функціонувати як генератор потенціалу, що пригнічує зовнішні завади, він штучно мінімізує еквівалентний опір підстанції для відповідного спектра частот. Подібна дія легко провокує серйозні резонансні явища, внаслідок яких паразитні струми від суміжних підприємств починають масово перетікати всередину вашої статичної батареї. Описаний феномен, котрий в іноземній літературі отримав назву «ефект поглинача» (sink effect), гарантовано викликає критичний перегрів діелектрика конденсаторів, розплавлення ізоляції дроселів та неминуче аварійне відключення комплексу системою релейного захисту.

Зважаючи на такі серйозні ризики, передові системи управління на металургійних об'єктах використовують винятково вибіркову стратегію. Мікропроцесор жорстко програмується на абсолютне ігнорування будь-яких фонових деформацій живильної магістралі, концентруючи всі свої обчислювальні потужності виключно на блокуванні високочастотних складових від власних нагрівальних агрегатів.

7.3. Комп'ютерне імітаційне моделювання режимів електропостачання

Процедура цифрового відтворення режимів експлуатації гібридних установок компенсації цілком спирається на фундаментальні аналітичні вирази, що були ретельно виведені та проаналізовані у попередніх розділах цієї кваліфікаційної роботи. З метою перевірки працездатності розроблених стратегій

						Ар.
						64

мікропроцесорного контролю напівпровідниковими блоками різних архітектурних конфігурацій, за основу було взято потужний інженерний пакет MATLAB, а саме його спеціалізований модуль візуального проектування Simulink. Зазначений цифровий інструмент надає можливість конструювати адаптивні еквівалентні схеми, котрі максимально достовірно імітують електромагнітні перехідні явища всередині розподільних мереж машинобудівних підприємств. Для заводів, що займаються виготовленням та тестуванням потужних індукційних чи дугових печей, таке глибоке комп'ютерне симулювання є критично обов'язковим етапом перед фізичним монтажем дороговартісного обладнання.

Налаштування робочих параметрів створеної віртуальної структури здійснювалося із залученням фактичних показників цехової магістралі, котрі були зафіксовані під час практичних випробувань на реальному індустриальному об'єкті [9]. Задля досягнення високої швидкості обчислень ПК без втрати якості результатів, інженерний аналіз спирається на декілька фундаментальних спрощень.

Насамперед, усі напівпровідникові компоненти транзисторного інвертора (як IGBT-модулі, так і зворотні діоди) розраховуються як абсолютно досконалі електронні перемикачі. Відповідно, падіння напруги під час протікання струму у відкритому стані вважається нульовим, а опір закритого переходу наближається до нескінченності. Такий підхід дає законне право проігнорувати динамічні втрати енергії на нагрів кристалів під час високочастотних комутацій. Аналітичне відображення стану будь-якого силового вентиля здійснюється за допомогою дискретної функції: вона дорівнює одиниці, коли ланцюг замкнено, і стає нулем після розмикання транзистора.

Додатково варто підкреслити, що будь-які складні нелінійні процеси (наприклад, хаотичні зміни дуги сталеплавильної печі або насичення магнітопроводів пічних трансформаторів) протягом одного мінімального кроку інтегрування замінюються прямими лініями. Подібна лінеаризація гарантує абсолютну безперебійність та стабільність роботи математичного ядра симулятора під час виконання складних ітераційних обчислень.

Початковим і вкрай важливим кроком під час проектування комбінованої

						Ар.
						65

установки виявилася процедура формування, аналітичного подання та дослідження функціонування виключно некерованого сегмента компенсатора. Така необхідність пояснюється тим фактом, що всередині архітектури ГФП саме статичні LC-контури слугують головним силовим резервуаром. Цей вузол утилізує основний масив реактивної енергії та нівелює найпотужніші паразитні спектральні компоненти струму, що виникають під час роботи нагрівальних агрегатів.

До моменту створення цифрового двійника всередині програмного пакета Simulink, було виконано скрупульозне обчислення номіналів складових частин некерованого компенсатора. Першочерговим завданням зазначеного інженерного етапу виступало створення ідеальних передумов задля результативного паралельного відведення класичних високочастотних завад (головним чином, 5-ї та 7-ї складових). Генераторами таких дефектів синусоїди всередині заводської магістралі є масивні дугові або індукційні плавильні комплекси. Вони являють собою надзвичайно важке і хаотичне промислове навантаження, притаманне цехам електротермічного підприємства, котре безперервно випромінює величезний масив паразитних частот у мережу живлення.

Алгоритм математичного обчислення [4] спирається на поетапне знаходження трьох фундаментальних величин:

- Розрахункової реактивної потужності (Q_c), котру зобов'язана продукувати ємнісна батарея задля підняття загальнозаводського коефіцієнта потужності (косинуса ϕ) до необхідного нормативного рівня.
- Частоти резонансного налаштування (f_r), за якої показники індуктивного та ємнісного опорів гілки стають абсолютно рівними, формуючи шлях з мінімальним імпедансом для "втягування" конкретної паразитної гармоніки.
- Коефіцієнта добротності ланцюга (Q_f), який безпосередньо характеризує ступінь селективності (вибірковості) поглинання завад нашим резонансним пристроєм та його стійкість до температурних відхилень параметрів.

Спираючись на базові електротехнічні характеристики цехової живильної магістралі (котрі наведені в межах таблиці 7.1), інженерами виконано комплекс підготовчих математичних обчислень. Знайдені номінали реактивних компонентів

						Ар.
						66

(дроселів та конденсаторних батарей) послуговували міцним фундаментом під час параметризації віртуальних вузлів комп'ютерної симуляції. Такий підхід дав змогу розпочати глибокий аналіз динамічних електромагнітних перетворень всередині комбінованої установки компенсації, що працює в умовах різкозмінного навантаження електротермічного підприємства.

Таблиця 7.1 – Базові електротехнічні показники мережі живлення та номінали елементів задля конфігурації комп'ютерного симулятора

Позначення параметра	Опис фізичної величини	Значення
U_{CH} , В	Напруга мережі середньої напруги (СН)	6000
$S_{KЗ}$, МВА	Потужність короткого замикання системи	103
U_{HH} , В	Напруга на стороні низької напруги (НН)	380
$S_{НОМ}$, кВА	Номінальна потужність силового трансформатора	160
$L_{ЛЕП}$, км	Довжина лінії електропередачі	0,31
R_0 , Ом/км	Активний опір ЛЕП (погонний)	0,398
C_0 , пкФ/км	Ємність ЛЕП (погонна)	798
L_0 , мГн/км	Індуктивність ЛЕП (погонна)	4,28
$C_{аф}$, мФ	Ємність конденсатора активного фільтра	20,8
$L_{аф}$, мГн	Вихідна індуктивність активного фільтра	0,31
$C_{пфа}$, мкФ	Ємність вихідного пасивного фільтра інвертора	25,8
$R_{пфа}$, Ом	Опір вихідного пасивного фільтра інвертора	0,000104
L_{HH} , мГн	Індуктивність на стороні НН	11,4
R_{HH} , Ом	Активний опір на стороні НН	3,12
C_{HH} , мкФ	Ємність на стороні НН	155

Фінальні результати обчислення параметрів резонансних контурів згруповано у зведених таблицях 7.1. та 7.2. Вказані оновлені масиви числових даних успішно імпантовано у віртуальні модулі спеціалізованої бібліотеки Simscape Electrical у процесі остаточного калібрування цифрового двійника

системи електропостачання цеху.

Таблиця 7.2 – Підсумкові розрахункові величини елементів пасивного шунта для придушення 5-ї спектральної складової

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Реактивна потужність Q_C , вар	9180	Ємність, мкФ	203
Резонансна частота, Гц	250	Індуктивність, мГн	2,15
Активний опір, Ом	0,051	Добротність Q_f	13,4

Таблиця 7.3 – Знайдені номінали компонентів фільтрувального ланцюга задля локалізації 7-ї гармоніки

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Реактивна потужність Q_C , вар	9180	Ємність, мкФ	203
Резонансна частота, Гц	350	Індуктивність, мГн	1,09
Активний опір, Ом	0,051	Добротність Q_f	6,8

Завершення роботи алгоритмів комп'ютерної симуляції дозволило згенерувати розгорнуті масиви поточних амплітуд струмових навантажень і фазних потенціалів. Наочна візуалізація зібраної інформації (як у вигляді часових розгорток, так і спектральних гістограм) продемонстрована за допомогою графічного матеріалу на рисунках 7.6 та 7.7.

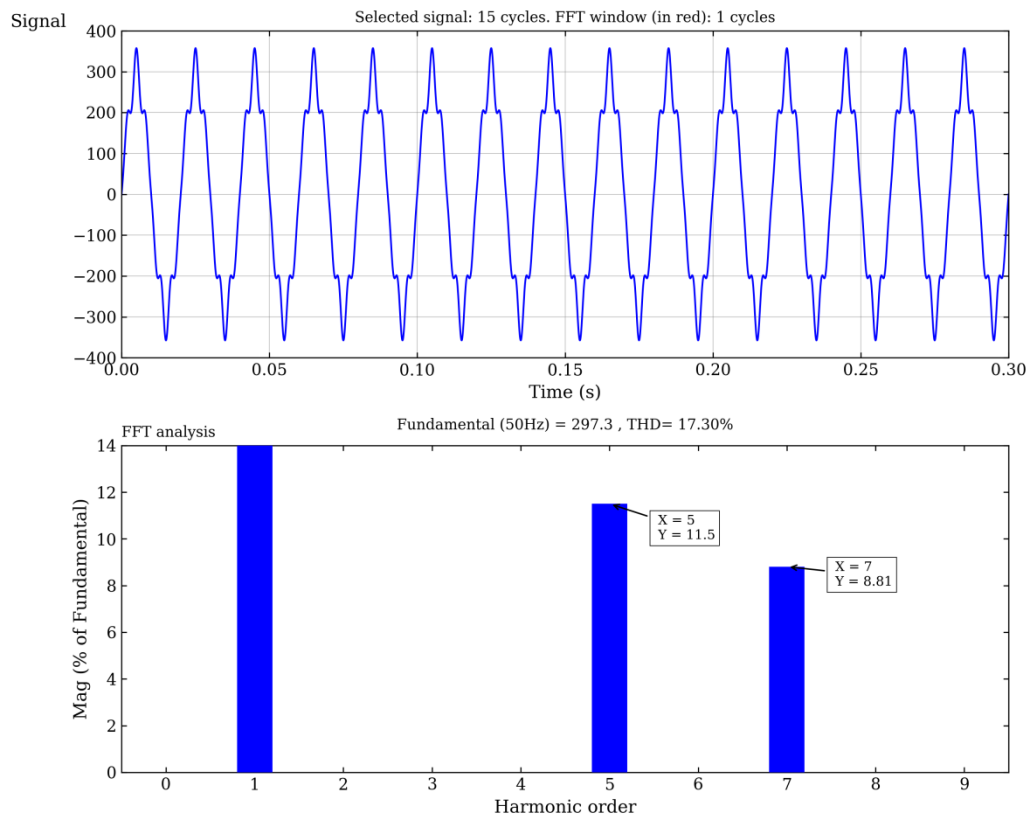


Рис.7.6 – Осцилограми та амплітудно-частотний спектр кривої мережевої напруги за умов відсутності компенсувальних пристроїв

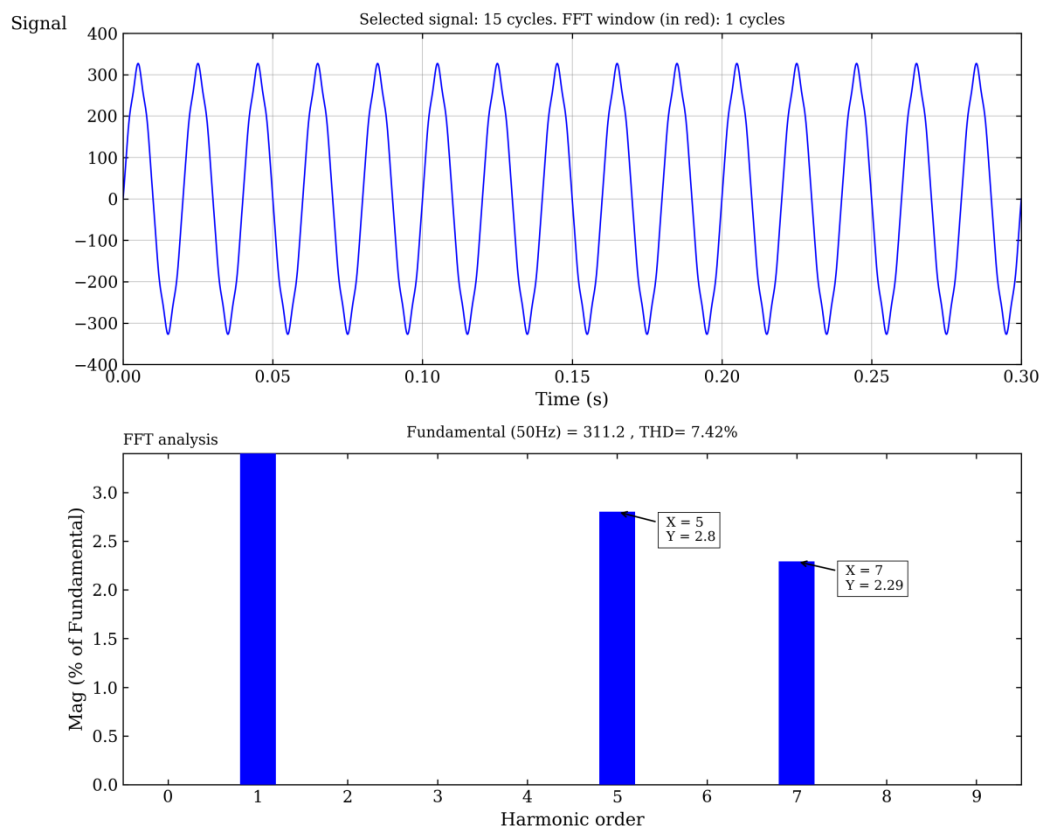


Рис.7.7. Динаміка зміни та гармонійний склад живильної напруги внаслідок активації гібридного фільтра

Зведені результати комп'ютерної симуляції, які характеризують загальну результативність пригнічення завад, згруповано в межах таблиці 7.4.

Таблиця 7.4. Зіставлення параметрів енергоефективності та критеріїв чистоти живильної напруги

Режим роботи	kI , %	$kI(5)$, %	$kI(7)$, %	kU , %	$kU(5)$, %	$kU(7)$, %	U_{rms} , В	I_{rms} , А	$\cos\varphi$
Без компенсаторів	20,1	17,2	9,5	17,8	11,8	9,1	360	152	0,86
Зі статичним фільтром	5,3	3,9	2,1	7,2	2,7	2,2	374	143	0,95

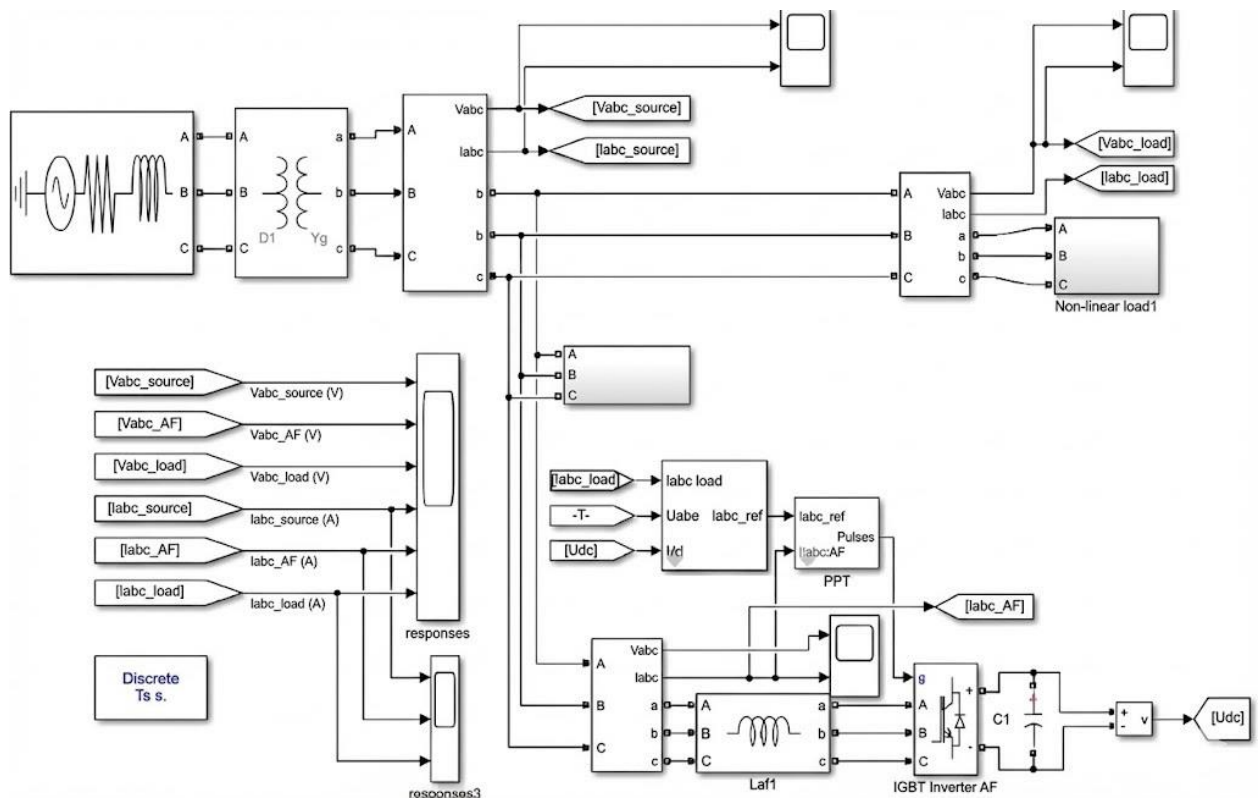
Зафіксовані масиви цифрової інформації яскраво демонструють, що амплітуди струмових складових п'ятого та сьомого порядків впали орієнтовно на 78 відсотків. Подібний результат вважається надзвичайно успішним досягненням для суто некерованих резонансних контурів. Зареєстроване падіння загального діючого струму (I_{rms}), який надходить від головної живильної підстанції, паралельно з відчутним підвищенням коефіцієнта потужності, гарантовано свідчить про глибоке очищення магнітопроводу трансформаторного обладнання від паразитних перетоків реактивної енергії.

Відповідно до класичних постулатів термічної деградації діелектриків, подібне полегшення режимів експлуатації разом із ліквідацією додаткового нагріву від високочастотних спотворень дає об'єктивні підстави очікувати подовження загального терміну служби цехового трансформатора щонайменше у 2,5–4 рази. Для заводу, що систематично проектує та випробовує енергоємні електротермічні комплекси, це означає кардинальне скорочення майбутніх амортизаційних витрат на заміну згорілих підстанцій.

Підсумовуючи вищевикладене, підсумки віртуальної симуляції беззаперечно доводять високу рентабельність монтажу статичних LC-ланцюгів у ролі первинного бар'єра безпеки підприємства. Втім, задля забезпечення абсолютної чистоти мережевої синусоїди (особливо в розрізі мінімізації коефіцієнта деформації напруги k_U до жорстких нормативних меж під час хаотичної роботи

						Ар.
						70

З метою досягнення максимальної прецизійності процесу очищення цехової мережі, архітектуру цифрового двійника піддали суттєвій модернізації (візуалізовано на рисунку 7.8). Оновлений мікропроцесорний алгоритм управління цілком спирається на застосування математичного апарату Парка-Горева (так звані $d - q$ трансформації). Завдяки цьому забезпечується надзвичайно висока вибірковість під час ідентифікації та ізоляції паразитних високочастотних складових, які масово генеруються потужними дуговими чи індукційними плавильними агрегатами підприємства.



Підсумкові цифрові масиви, здобуті після тестування оновленого комп'ютерного комплексу, систематизовано всередині таблиці 7.5.

						Ap.
						71

Таблиця 7.5. Критерії результативності роботи транзисторного компенсатора при застосуванні векторних алгоритмів

Конфігурація апаратури	kI , %	$kI(5)$, %	$kI(7)$, %	kU , %	$kU(5)$, %	$kU(7)$, %	U_{rms} , В	I_{rms} , А	$\cos\varphi$
Режим без компенсаторів	20,3	17,2	9,6	17,8	11,8	9,1	360	152	0,86
Електронний блок + L-фільтр (Зірка/Трикутник)	4,3	3,6	2,1	5,9	2,9	2,7	376	145	0,98
Електронний блок + LCL-фільтр	4,1	3,4	1,8	5,2	2,7	2,4	378	142	0,99

Впровадження математичної моделі синхронних координатних осей дало можливість додатково зменшити сумарний показник струмових викривлень із початкових 5,3 % (що фіксувалися для суто пасивного режиму) аж до рівня 4,1 %. Водночас аналогічний коефіцієнт загальної деформації мережевого потенціалу скоротився із 7,2 % до безпечної позначки 5,2 %.

Згаданий факт беззаперечно доводить, що мікропроцесорні стратегії векторного регулювання гарантують еталонну чистоту живильної магістралі навіть в умовах нестабільного електротермічного виробництва. Особливо яскраво це проявляється під час локалізації сьомої спектральної компоненти (амплітуда якої стрімко впала до мізерних 1,8 %). Крім того, підсумковий фактор потужності цехової підстанції впритул наблизився до ідеальної одиниці, склавши 0,99. Такий результат повністю розвантажує загальнозаводські трансформатори від шкідливих перетоків реактивної енергії.

Згруповані у зведеній таблиці 7.5 статистичні показники виступають беззаперечним доказом абсолютної дієвості розробленої керуючої програми. Отримані у процесі комп'ютерної симуляції рівні високочастотних спотворень із значним запасом задовольняють найсуворіші нормативні вимоги чинного державного стандарту ДСТУ EN 50160:2014 [7], котрий жорстко регламентує показники якості електричної енергії на промислових об'єктах.

Початковим об'єктом для дослідження виступила топологія, у якій напівпровідниковий інвертор приєднується до загальнозаводських шин паралельно

щодо нелінійних струмоприймачів. Графічне відображення сформованої розрахункової схеми всередині програмного пакета Simulink продемонстровано на рисунку 7.9.

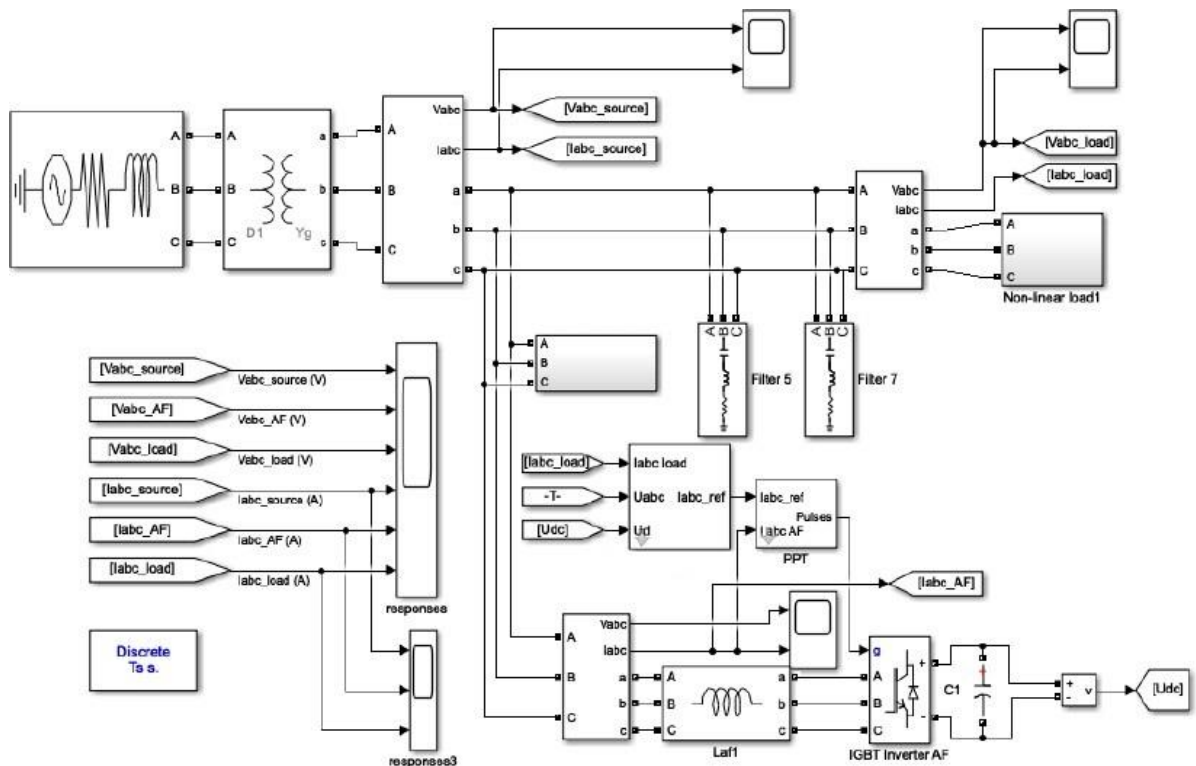


Рис.7.9. Віртуальний двійник фрагмента цехової підстанції, обладнаної комбінованим компенсатором із паралельним підключенням активної ланки

Створений комп'ютерний полігон об'єднує такі ключові математичні макромоделі:

1. Генератор енергії: Теоретично досконале джерело трифазного живлення (модуль Three-Phase Source), котре імітує підключення металургійного заводу до зовнішньої об'єднаної енергосистеми з безмежно великою потужністю короткого замикання.
2. Головна знижувальна підстанція: Цифровий аналог силового цехового трансформатора з номіналом 10/0,4 кВ (або 6/0,4 кВ залежно від цеху). Схема з'єднання його магнітних обмоток реалізована за класичним для промисловості стандартом Δ/Y_n (первинна сторона зібрана у трикутник, вторинна — у зірку з глухозаземленою нульовою точкою).
3. Мікроелектронний сегмент (ПАФ): Шунтувальний транзисторний

компенсатор, що проектується без індивідуального вихідного L -реактора (зазначену згладжувальну функцію успішно бере на себе загальна група статичних конденсаторів).

4. Некерована статична батарея (ПФ): Пара резонансних LC -контурів, які прецизійно відкалібровані для поглинання завад на стандартних частотах 250 Гц та 350 Гц (це найбільш типові паразитні гармоніки, що генеруються потужними тиристорними випрямлячами дугових та індукційних печей).

Задля забезпечення універсальності отриманих висновків, усі внутрішні характеристики віртуальної схеми вводилися із застосуванням відносних одиниць (в.о.). Базовими критеріями тут виступали паспортна потужність цехового трансформатора та стандартний клас напруги. Процес комп'ютерної симуляції максимально точно відображає специфіку функціонування розподільного щита металургійного корпусу, сумарне навантаження якого сягає кількох сотень кіловат [1, 6]. З метою тестування надійності розроблених мікропроцесорних програм, загальний рівень деформації струмової кривої споживача (k_I) штучно змінювався від 9 до 31 %, тоді як аналогічний показник для живильної напруги (k_U) коливався від 2 до 15,5 %. Такі межі ідеально імітують важку електромагнітну обстановку, притаманну сильно «забрудненим» магістралям заводів із виробництва та експлуатації дугових печей [1].

Комбінована фільтрувальна установка формує спеціальний випереджаючий струм, вектор якого спрямований чітко у протифазі відносно реактивної складової електротермічних агрегатів. Як наслідок, підсумковий обсяг реактивної енергії, котрий доводиться транспортувати від головної підстанції, падає практично до нульової позначки. Відповідно до базових законів електротехніки, мінімізація параметра Q автоматично зумовлює пропорційне скорочення повної споживаної потужності (S). Цей ефект гарантує колосальне термічне розвантаження магнітопроводу та обмоток силового трансформатора.

Високу результативність описаного методу компенсації яскраво ілюструє динаміка зміни фактора потужності, яку відображено на рисунку 7.10. Одразу після завершення короточасних пускових явищ, вказаний показник надійно фіксується

						Ар.
						74

D	I	D	I
-----	-----	-----	-----

--	--	--	--	--

ключів та дроселів гібридного комплексу.

Проте найважливішим здобутком комп'ютерних експериментів залишається глибокий аналіз впливу транзисторного компенсатора на амплітудно-частотний спектр магістралі. Зведена таблиця 7.7 містить фінальні показники спотворень після активації алгоритмів очищення, а також обчислені індекси результативності (E), котрі відображають реальну частку ліквідованих паразитних складових.

Таблиця 7.7. Критерії чистоти мережевої синусоїди та загальна результативність придушення завад

Параметр	kI , %	kU , %	$kI(5)$, %	$kU(5)$, %	$kI(7)$, %	$kU(7)$, %	U_{rms} , В	I_{rms} , А	$\cos\varphi$
Значення з ГФП, %	0,52	1,45	0,42	1,25	0,31	1,14	380	198	0,998
Ефективність, %	96	85	92	82	91	82	5,3	0,42	2,7

Підсумкові цифри виявилися надзвичайно високими: сумарний індекс несинусоїдальності струмової кривої впав орієнтовно на 96 % (досягнувши мізерної позначки 0,52 %), тоді як аналогічний критерій для фазної напруги (k_U) скоротився на 85 % (до рівня 1,45 %). Такі вражаючі показники гарантують формування практично еталонної мережевої синусоїди, навіть за умов інтенсивного та хаотичного плавлення металів у цехових електротермічних установках.

Фізична сутність явищ динамічного пригнічення завад наочно відображається за допомогою часових розгорток, представлених на рисунку 7.11.

- Нижня крива (позиція 3): відображає профіль споживання струму масивними нагрівальними агрегатами. Вона характеризується глибокими деформаціями та набуває яскраво виражених трапецієподібних обрисів, що є типовим наслідком роботи потужних тиристорних перетворювачів електропечей.
- Центральна епюра (позиція 2): демонструє коригувальний сигнал, котрий безперервно генерується швидкодіючим транзисторним перетворювачем. Цей струм відрізняється вкрай специфічною конфігурацією, адже

мікропроцесор формує його як точне дзеркальне (протифазне) відображення паразитного високочастотного спектра споживача.

- Верхня діаграма (позиція 1): фіксує підсумковий струмовий потік усередині живильної магістралі. Він утворюється внаслідок миттєвого алгебраїчного додавання викривленого сигналу від електропечі та коригувальної інжекції транзисторного компенсатора. Як наслідок, результуюча крива на підстанції максимально наближається до еталонного синусоїдального профілю.

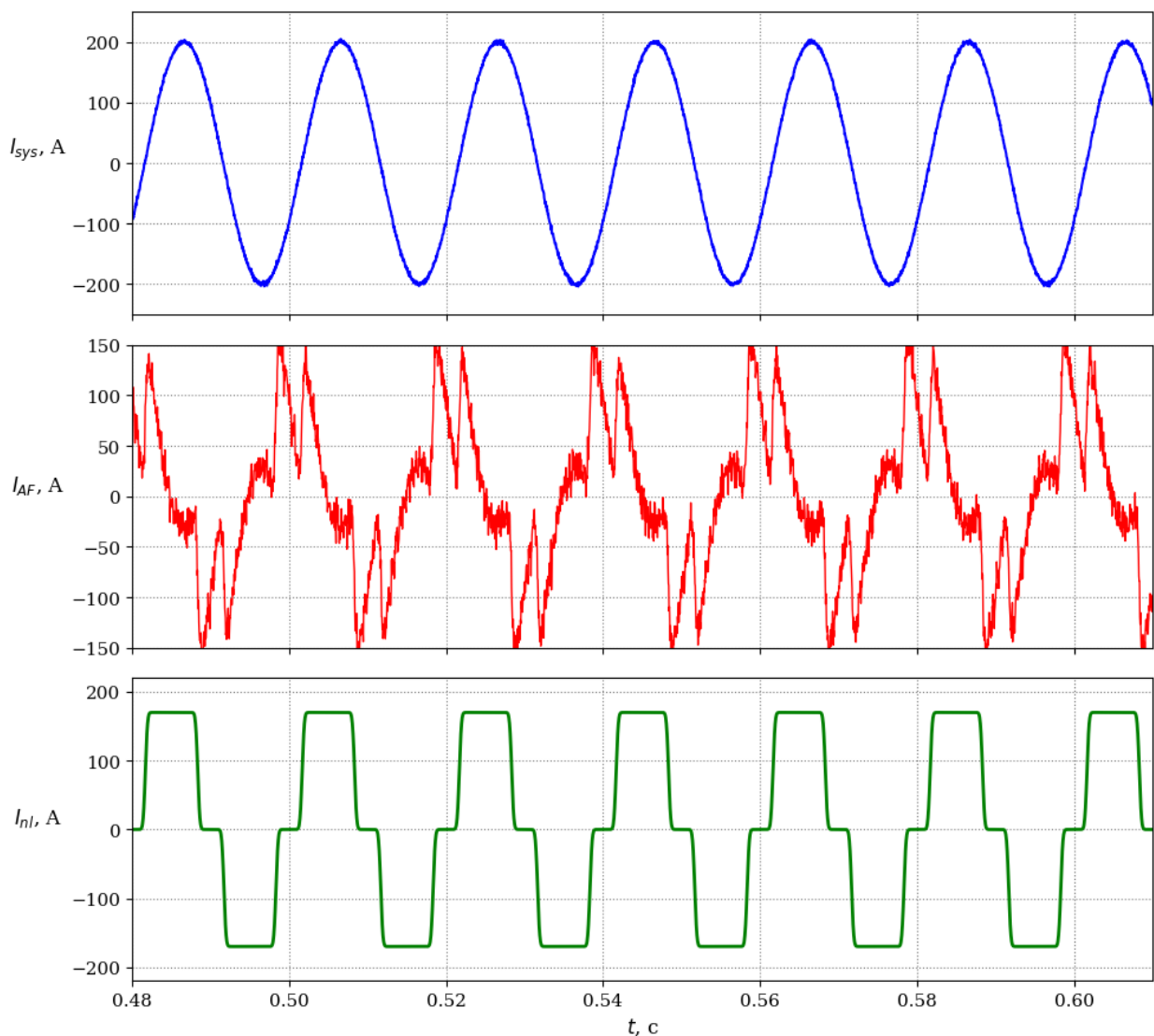


Рис.7.11 – Динаміка зміни миттєвих струмових амплітуд під час комп'ютерної симуляції: 1 – очищений магістральний потік; 2 – коригувальний сигнал від напівпровідникового вузла; 3 – викривлене споживання цехової плавильної установки

Результати віртуальної комп'ютерної симуляції беззаперечно доводять:

						Ap.
						77

функціонування гібридної апаратури абсолютно не провокує виникнення небезпечних комутаційних перенапруг чи глибоких експлуатаційних просідань. Ефективна амплітуда фазної напруги на загальнозаводських шинах надійно утримується на стандартизованій позначці 380 В.

Синхронна робота мікропроцесорного електронного модуля разом із групою статичних LC-ланцюгів гарантує незрівнянно кращий результат стабілізації енергосистеми, аніж їх відокремлене застосування. У межах такої комбінованої архітектури некеровані конденсаторно-реакторні батареї утилізують наймасивніші низькочастотні струмові завади, тоді як швидкодіючий транзисторний інвертор здійснює філігранне прецизійне вирівнювання залишків високочастотного фону, що залишається від промислового нагрівального обладнання.

ВИСНОВКИ

У рамках даного проекту було успішно вирішено комплексну проблему проектування енергетичної інфраструктури для підприємства, що спеціалізується на випуску електротермічної апаратури.

Обчислення споживаної енергії силовими приймачами виконувалось із застосуванням підходу, що базується на коефіцієнті розрахункової потужності. Водночас, для визначення потреб мережі освітлення використовувався спосіб питомої щільності навантажень. Крім того, автор провів необхідні обчислення, які дозволили побудувати добові графіки енергоспоживання та проаналізувати їхні ключові показники.

На основі отриманих даних щодо просторового розподілу обладнання та побудованої картограми, вдалося точно знайти координати головного вузла споживання (ЦЕН).

Детальний розгляд балансу реактивної складової дав змогу обґрунтовано підібрати оптимальне число та номінали компенсуючого устаткування, призначеного для роботи в мережах із класами напруги 0,4 і 10 кіловольт.

Опираючись на знайдені значення струмів при аварійних режимах (КЗ), було здійснено остаточний вибір захисних і комутаційних апаратів на стороні високої напруги, а також перевірено та затверджено площі поперечного перерізу струмопровідних ліній.

Підсумовуючи, можна впевнено стверджувати, що спроектована схема живлення промислового об'єкта повністю задовольняє сучасні нормативні критерії та стандарти надійності, висунуті до енергомереж такого класу.

						Арк.
						79

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.