

Центральноукраїнський національний технічний університет

Центр заочної та дистанційної освіти

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 трансформаторного обладнання»

Виконала здобувачка вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–22з,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

Людмила ПАРАХІНА

« » 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

Василь ЗІНЗУРА

« » 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

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

Парахіної Людмили Дмитрівни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва трансформаторного обладнання

Design of the power supply system for a transformer manufacturing plant

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 розробка системи електропостачання підприємства з виробництва трансформаторного обладнання. 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 _____

Людмила ПАРАХІНА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 84 с.; 16 рис.; 23 табл.; 5 джерел

Парахіна Л. Д. Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва трансформаторного обладнання. – Рукопис.

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

Робота присвячена розробці системи електропостачання підприємства з виробництва трансформаторного обладнання.

Під час виконання роботи було здійснено глибоку оцінку енергоспоживання об'єкта. Це передбачало обчислення сумарної номінальної потужності для кожної групи споживачів струму. Значний акцент зроблено на моделюванні добових кривих електроспоживання, особливо враховуючи пікові години роботи цехів та інтенсивність технологічних процесів у різні зміни.

Одним із ключових етапів став вибір оптимальних установок для її компенсації, що дозволить суттєво підвищити загальну енергоефективність мережі та знизити втрати.

Окрім нормальних умов, ретельно вивчено потенційні позаштатні ситуації. Шляхом обчислення величин струмів КЗ (короткого замикання) для різних ступенів напруги, вдалося коректно підібрати сучасні пристрої мікропроцесорного релейного захисту, автоматики, а також відповідні комутаційні апарати.

Обґрунтовано доцільність впровадження автоматизованих систем комерційного обліку (АСКОЕ) та розраховано контури надійного заземлення виробничих площ.

Ключові слова: система електропостачання, компенсація реактивної потужності, облік електроенергії

ABSTRACT

Qualification work: 84 p.; 16 Fig.; 23 tables; 5 sources

Parakhina L. Design of the power supply system for a transformer manufacturing plant. – Manuscript.

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

The work is devoted to the development of a power supply system for a transformer equipment manufacturing enterprise.

During the work, a deep assessment of the facility's energy consumption was carried out. This involved calculating the total rated power for each group of current consumers. Significant emphasis was placed on modeling daily power consumption curves, especially taking into account peak hours of operation of workshops and the intensity of technological processes in different shifts.

One of the key stages was the selection of optimal installations for its compensation, which will significantly increase the overall energy efficiency of the network and reduce losses.

In addition to normal conditions, potential emergency situations were carefully studied. By calculating the values of short-circuit currents for different voltage levels, it was possible to correctly select modern microprocessor relay protection devices, automation, as well as appropriate switching devices.

The feasibility of implementing automated commercial metering systems (ACSM) was substantiated and reliable grounding circuits for production areas were calculated.

Keywords: power supply system, reactive power compensation, electricity metering

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	10
1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ	10
1.2 Освітлювальні електричні навантаження.....	11
1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ	12
1.4 Графіки електричних навантажень заводу	17
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	21
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ	23
3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....	23
3.2 Схема внутрішнього електропостачання	25
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	28
4.1 Баланс реактивної потужності.....	28
4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв	29
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	31
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	32
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	32
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. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ	45
7.1 Пасивні засоби локалізації вищих гармонік	51
7.2 Засоби активної фільтрації для зниження гармонійних спотворень	54
7.3 Схемотехнічні рішення трифазних інверторів із широтно-імпульсним керуванням на базі джерел струму та напруги.....	58
7.4 Базова архітектура та принципи керування трифазними паралельними активними фільтрами	61

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Парахіна Л.Д.				Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва трансформаторного обладнання Design of the power supply system for a transformer manufacturing plant	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.	Зінзура В.В.						6	84
						ЦНТУ зр. ЕЕ-22з		
Н. контр.								
Затвер.	Плешков П.Г.							

7.5 Низьковольтні гібридні фільтрувальні комплекси без використання розділювальних трансформаторів	69
7.6. Комплексне зіставлення та аналітична оцінка суто електронних і гібридних топологій нормалізації параметрів енергомережі	73
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84

						Ар.
						7

ВСТУП

Дане дослідження присвячене проектуванню системи електропостачання заводу, що спеціалізується на випуску трансформаторного обладнання.

Слід зазначити, що попит на електрику серед промислових майданчиків постійно та невпинно зростає. Така динаміка зумовлена масштабною інтеграцією новітніх технологій, а також збільшенням контурів автоматики у цехах. Окрім цього, передові верстати та агрегати (зокрема, що відповідають концепції Індустрії 4.0) відрізняються надзвичайно високою енергозатратністю. Тому для їхньої безперебійної та продуктивної роботи вкрай необхідне потужне і надійне джерело живлення.

Заводи такого профілю висувають унікальні вимоги до параметрів енергомережі через характерні технологічні операції. Наприклад, створення габаритних перетворювальних пристроїв вимагає цілодобової експлуатації великих сушильних камер, вакуумних установок для просочування котушок, а також важких гідравлічних пресів для збірки сталевих осердь. Крім того, величезні обсяги струму споживають високовольтні випробувальні стенди, де тестують зібрані апарати перед відвантаженням. Відповідно, кожна ланка цього ланцюга потребує колосальних резервів потужності.

Актуальні вектори розвитку заводської енергетики передбачають перехід до інтелектуальних архітектур (Smart Grid), залучення "зелених" об'єктів генерації та впровадження комплексних заходів з енергоефективності. Завдяки розгортанню комп'ютеризованих систем диспетчеризації з'являється можливість безперервно контролювати витрати кіловат-годин та гнучко балансувати графіки споживання у години пік.

Окремо варто виділити критичну важливість дотримання жорстких стандартів якості струму. На підприємствах із випуску складної електротехніки найменші відхилення параметрів мережі (зокрема, просадки чи стрибки напруги) здатні порушити процес намотки або ізолювання. Як наслідок, це призводить до

						Арк.
						8

появи серйозного браку та суттєвих фінансових збитків через необхідність переробки продукції.

Додатковим викликом є масове використання частотних перетворювачів на сучасних лініях, які генерують небезпечні вищі гармоніки. Для боротьби з цим явищем система електропостачання має включати активні фільтри. Також найбільш чутливі вузли керування доцільно оснащувати джерелами безперебійного живлення (ДБЖ), щоб гарантувати збереження налаштувань контролерів та безпечну зупинку конвеєрів у разі раптового знеструмлення.

						Арк.
						9

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ

Приклад розрахунку для центрального виробничого блоку наведена далі.

$$m = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{40,5}{5,1} = 7,9$$

$$P_{\text{зм}} = \sum P_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}} = 3947 \cdot 0,4 = 1578,8 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{зм}} = P_{\text{зм}} \cdot \text{tg}\varphi = 1578,8 \cdot 0,62 = 978,86 \text{ квар}$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot \sum P_{\text{н}}}{P_{\max}} = \frac{2 \cdot 3947}{40,5} \approx 195 \rightarrow \text{приймаємо } 160$$

Спираючись на довідник [1], коефіцієнт $K_{\text{р}}$ становить 1,1.

Визначені значення шуканих потужностей:

$$P_{\text{р}} = P_{\text{зм}} \cdot K_{\text{р}} = 1578,8 \cdot 1,1 = 1736,68 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{зм}} = 978,86 \text{ квар}$$

Підсумкові дані проведених обчислень зведено у табл. 1.1.

						Ар.
						10

Таблиця 1.1. Силowe електроspоживання мереж до 1000 В

№	Найменування підрозділу	Нспо ж, шт	Pmin, кВт	Pmax, кВт	Pсум, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Рзм, кВт	Qзм, квар	псф	Кр	Ррозр, кВт	Qрозр, квар	Spрозр, кВА
1	Центральний виробничий блок	160	5,1	40,5	3947	7,9	0,4	0,85	0,62	1578,8	978,86	160	1,1	1736,7	978,86	1993,55
2	Зварювально-складальний цех	160	1,72	30,5	3695	18	0,35	0,7	1,02	1293,25	1319,12	160	1,11	1435,5	1319,1	1949,56
3	Відділення апаратобудування	100	5,05	101	2103	20	0,4	0,75	0,88	841,2	740,26	42	1,21	1017,9	740,26	1258,58
4	Цех нанесення ізоляції	50	1,01	30,4	726	30	0,6	0,9	0,48	435,6	209,09	48	1,12	487,87	209,09	530,78
5	Станція генерації кисню	15	5,08	81,2	138	16	0,6	0,7	1,02	82,8	84,46	3	1,66	137,45	92,91	165,91
6	Теплогенераторна	25	3,04	50,6	918	17	0,6	0,75	0,88	550,8	484,7	25	1,17	644,44	484,7	806,38
7	Дільниця обробки деревини	20	1,01	15,2	153	15	0,2	0,65	1,17	30,6	35,8	20	1,55	47,43	35,8	59,43
8	Відділ лакофарбових матеріалів	30	5,06	253	2932	50	0,3	0,7	1,02	879,6	897,19	23	1,38	1213,9	897,19	1509,43
9	Автотранспортний підрозділ	13	3,05	7,11	64	2,3	0,3	0,65	1,17	19,2	22,46	13	1,53	29,38	22,46	36,98
10	Складально-механічний підр.	170	5,06	253	6228	50	0,25	0,65	1,17	1557	1821,69	49	1,28	1993	1821,7	2700,08
11	Дільниця заготівлі та звар.	160	3,03	202	4820	67	0,3	0,75	0,88	1446	1272,48	48	1,25	1807,5	1272,5	2206,03
	Разом по підприємству	903	1,01	253	25724	250	0,34	0,742	0,9	8714,85	7866,11	203	1	8714,9	7866,1	11740,1

1.2 Освітлювальні електричні навантаження

Зразок обчислення потужностей освітлювальних установок для центрального виробничого блоку наведено далі.

$$P_{\text{BCT}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 2081 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 33,3 \text{ кВТ}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot K_1 \cdot P_{\text{БСТ}} = 0,95 \cdot 0,4 \cdot 33,3 = 12,65 \text{ кВТ}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 12,65 \cdot 0,62 = 7,84 \text{ квар}$$

Отримані результати підрахунків відображено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Потужності освітлювальних струмоприймачів

№	Найменування підрозділу	Fцеху, м ²	p0, Вт/м ₂	Rвста н, кВт	Kп	K1	cosφ	tgφ	Pрозр, кВт	Qроз р, квар	Sрозр, кВА
1	Центральний виробничий блок	2081	16	33,3	0,95	0,4	0,85	0,62	12,65	7,84	14,88
2	Зварювально-складальний цех	1631	17	27,73	0,95	0,4	0,7	1,02	9,22	9,4	13,17
3	Відділення апаратобудування	1826	15	27,39	0,95	0,4	0,75	0,88	10,41	9,18	13,88
4	Цех нанесення ізоляції	1117	17	18,99	0,95	0,6	0,9	0,48	10,82	5,24	12,02
5	Станція генерації кисню	692	16	11,07	0,95	0,6	0,7	1,02	6,31	6,44	9,01
6	Теплогенераторна	1042	13	13,55	0,95	0,6	0,75	0,88	7,72	6,81	10,29
7	Дільниця обробки деревини	1749	15	26,24	0,95	0,2	0,65	1,17	4,99	5,83	7,68
8	Відділ лакофарбових матеріалів	1603	18	28,85	0,95	0,3	0,7	1,02	8,22	8,38	11,74
9	Автотранспортний підрозділ	870	18	15,66	0,95	0,3	0,65	1,17	4,46	5,21	6,86
10	Складально-механічний підр.	2647	17	44,99	0,95	0,3	0,65	1,17	10,69	12,5	16,45
11	Дільниця заготівлі та звар.	2477	12	29,72	0,95	0,3	0,75	0,88	8,47	7,47	11,29
12	Промисловий майданчик підпр.	104240	1	104,2	0,1	1	0,98	0,2	10,42	2,12	10,63
	Всього			381,7					104,4	86,4	135,5

1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ

Результати розрахунків навантажень вище 1 кВ приведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	N _{спож} шт	P _{одн.сп.}		P _{сум} , кВт	m	K _в	cos φ	tg φ	Сер. зм. нав.		n _{сф}	K _р	Розрах. навант.		
		min, кВт	max, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
ТП 1, 2															
Центральний виробничий блок															
силове:	160	5,1	40,5	3947	7,9	0,4	0,85	0,62	1578,8	978,86	160	1,1	1736,68	978,86	1993,55
освітлювальне:				33,3									12,65	7,84	
Всього:				3980,3					1578,8	978,86			1749,33	986,7	2008,43
Зварювально-складальний цех															
силове:	160	1,72	30,45	3695	17,7	0,35	0,7	1,02	1293,25	1319,12	160	1,11	1435,51	1319,12	1949,56
освітлювальне:				27,73									9,22	9,4	
Всього:				3722,73					1293,25	1319,12			1444,73	1328,52	1962,73
Відділення апаратобудування															
силове:	100	5,05	101	2103	20	0,4	0,75	0,88	841,2	740,26	42	1,21	1017,85	740,26	1258,58
освітлювальне:				27,39									10,41	9,18	
Всього:				2130,39					841,2	740,26			1028,26	749,44	1272,46
Всього по ТП 1, 2:															
силове:	420	1,72	101	9745	58,7	0,38	0,77	0,82	3713,25	3038,24	192	1,09	4047,42	3038,24	5064,28
освітлювальне:				88,42									32,28	26,42	
БК 0,4 кВ									-1532,3					-1532,3	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 1, 2:									3713,25	1505,94			4079,7	1532,36	4358,01
Втрати в трансформаторах:													43,6	246,2	
Кількість трансформаторів: 4															
Номінальна потужність, кВА: 1600															
Коефіцієнт завантаження: Kз = 0,68															
Всього на шинах 10 кВ ТП 1, 2:													4123,3	1778,56	4490,48
ТП 3															
Станція генерації кисню															
силове:	15	5,08	81,2	138	16	0,6	0,7	1,02	82,8	84,46	3	1,66	137,45	92,91	165,91
освітлювальне:				11,07									6,31	6,44	
Всього:				149,07					82,8	84,46			143,76	99,35	174,68
Автотранспортний підрозділ															

Продовження табл. 1.3

силове:	13	3,05	7,11	64	2,3	0,3	0,65	1,17	19,2	22,46	13	1,53	29,38	22,46	36,98
освітлювальне:				15,66									4,46	5,21	
Всього:				79,66					19,2	22,46			33,84	27,67	43,72
Складально-механічний підпр.															
силове:	170	5,06	253	6228	50	0,25	0,65	1,17	1557	1821,69	49	1,28	1992,96	1821,69	2700,08
освітлювальне:				44,99									10,69	12,5	
Всього:				6272,99					1557	1821,69			2003,65	1834,19	2716,63
Промисловий майданчик підпр.															
освітлювальне:				104,24									10,42	2,12	
Всього:				104,24									10,42	2,12	10,63
Всього по ТП 3:															
силове:	198	3,05	253	6430	83	0,26	0,65	1,16	1659	1928,61	51	1,27	2109,79	1928,61	2859,71
освітлювальне:				175,96									31,88	26,27	
БК 0,4 кВ									-1489,5					-1489,5	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 3:									1659	439,11			2141,67	465,38	2191,63
Втрати в трансформаторах:													21,95	123,6	
Кількість трансформаторів: 2															
Номінальна потужність, кВА: 1600															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,68															
Всього на шинах 10 кВ ТП 3:													2163,62	588,98	2242,32
ТП 4															
Теплогенераторна															
силове:	25	3,04	50,6	918	16,6	0,6	0,75	0,88	550,8	484,7	25	1,17	644,44	484,7	806,38
освітлювальне:				13,55									7,72	6,81	
Всього:				931,55					550,8	484,7			652,16	491,51	816,68
Дільниця обробки деревини															
силове:	20	1,01	15,15	153	15	0,2	0,65	1,17	30,6	35,8	20	1,55	47,43	35,8	59,43
освітлювальне:				26,24									4,99	5,83	
Всього:				179,24					30,6	35,8			52,42	41,63	66,94
Відділ лакофарбових матеріалів															
силове:	30	5,06	252,8	2932	50	0,3	0,7	1,02	879,6	897,19	23	1,38	1213,85	897,19	1509,43
освітлювальне:				28,85									8,22	8,38	
Всього:				2960,85					879,6	897,19			1222,07	905,57	1520,95

Продовження табл. 1.3

Всього по ТП 4:																
силове:	75	1,01	252,8	4003	250,2	0,36	0,72	0,97	1461	1417,69	32	1,27	1850,71	1417,69	2331,44	
освітлювальне:				68,64									20,93	21,02		
БК 0,4 кВ									-336,5					-336,5		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 4:									1461	1081,19			1871,64	1102,21	2173,08	
Втррати в трансформаторах:													21,68	122,25		
Кількість трансформаторів: 2																
Номінальна потужність, кВА: 1600																
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,68																
Всього на шинах 10 кВ ТП 4:													1893,32	1224,46	2256,12	
ТП 5																
Цех нанесення ізоляції																
силове:	50	1,01	30,42	726	30,1	0,6	0,9	0,48	435,6	209,09	48	1,12	487,87	209,09	530,78	
освітлювальне:				18,99									10,82	5,24		
Всього:				744,99					435,6	209,09			498,69	214,33	542,67	
Дільниця заготівлі та звар.																
силове:	160	3,03	202	4820	66,7	0,3	0,75	0,88	1446	1272,48	48	1,25	1807,5	1272,48	2206,03	
освітлювальне:				29,72									8,47	7,47		
Всього:				4849,72					1446	1272,48			1815,97	1279,95	2219,3	
Всього по ТП 5:																
силове:	210	1,01	202	5546	200	0,34	0,78	0,79	1881,6	1481,57	55	1,21	2275,37	1481,57	2715,13	
освітлювальне:				48,71									19,29	12,71		
БК 0,4 кВ									-1674					-1674		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 5:									1881,6	-192,43			2294,66	-179,72	2301,69	
Втррати в трансформаторах:													23,55	132,15		
Кількість трансформаторів: 2																
Номінальна потужність, кВА: 1600																
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,72																
Всього на шинах 10 кВ ТП 5:													2318,21	-47,57	2318,7	
Всього по об'єкту																
силове:	903	1,01	253	25724	250,5	0,34	0,95	0,33	8714,85	2835,63	203	1	8714,85	2835,63	9164,88	
освітлювальне:				381,73									104,38	86,42		
Всього:				26105,7					8714,85	2835,63			8819,23	2922,05	9291,55	

Продовження табл. 1.3

Потужність КП 0,4 кВ:									-5032,3					-5032,3	
Втрати в трансформаторах:													110,78	624,2	
Всього по об'єкту:													8930,01	-1486,05	9052,78
Високовольтне навантаження															
АД 1- АД4	4	808	808	3232		0,75	0,9	0,48	2424	1174,01			2424	1174,01	2693,34
Всього високовольтного навантаження:													2424	1174,01	2693,34
Всього по об'єкту 10 кВ:													11354,01	-312,04	11358,3
КП 10 кВ:														-3643	
Всього 10 кВ з КП:													11354,01	-3955,04	12023,59
tgφ=0,096															

1.4 Графіки електричних навантажень заводу

Отримані підсумки розрахунку добових графіків споживання електроенергії наведені далі

Таблиця 1.4. Вихідні показники для побудови добових графіків

№	Роб. дні		Вих.дні	
	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %
1	48,5	39,4	44,5	68,7
2	48,5	44,5	44,5	68,7
3	41,5	41,5	44,5	68,7
4	41,5	39,4	44,5	68,7
5	53,6	50,6	44,5	68,7
6	53,6	46,5	44,5	68,7
7	83,9	58,6	44,5	68,7
8	92	76,8	44,5	68,7
9	100	100	25,3	51,6
10	100	100	25,3	51,6
11	92	71,8	25,3	51,6
12	80,9	61,7	25,3	51,6
13	86,9	74,8	25,3	51,6
14	94	74,8	25,3	51,6
15	98,9	81,9	25,3	51,6
16	98,9	74,8	25,3	51,6
17	86,9	79,9	25,3	51,6
18	81,9	64,7	44,5	68,7
19	60,7	45,5	44,5	68,7
20	57,6	54,6	44,5	68,7
21	46,5	48,5	44,5	68,7
22	50,6	49,5	44,5	68,7
23	50,6	41,5	44,5	68,7
24	48,5	44,5	44,5	68,7

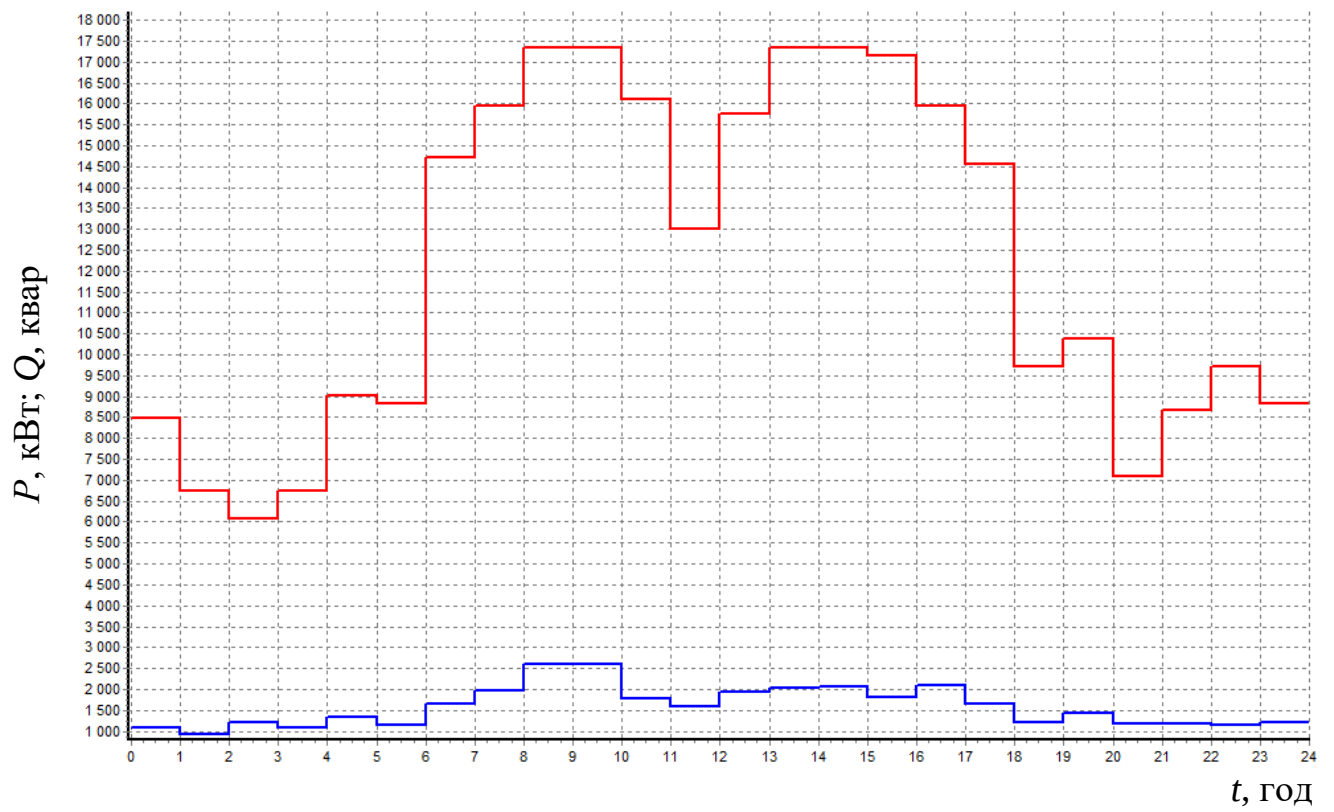


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

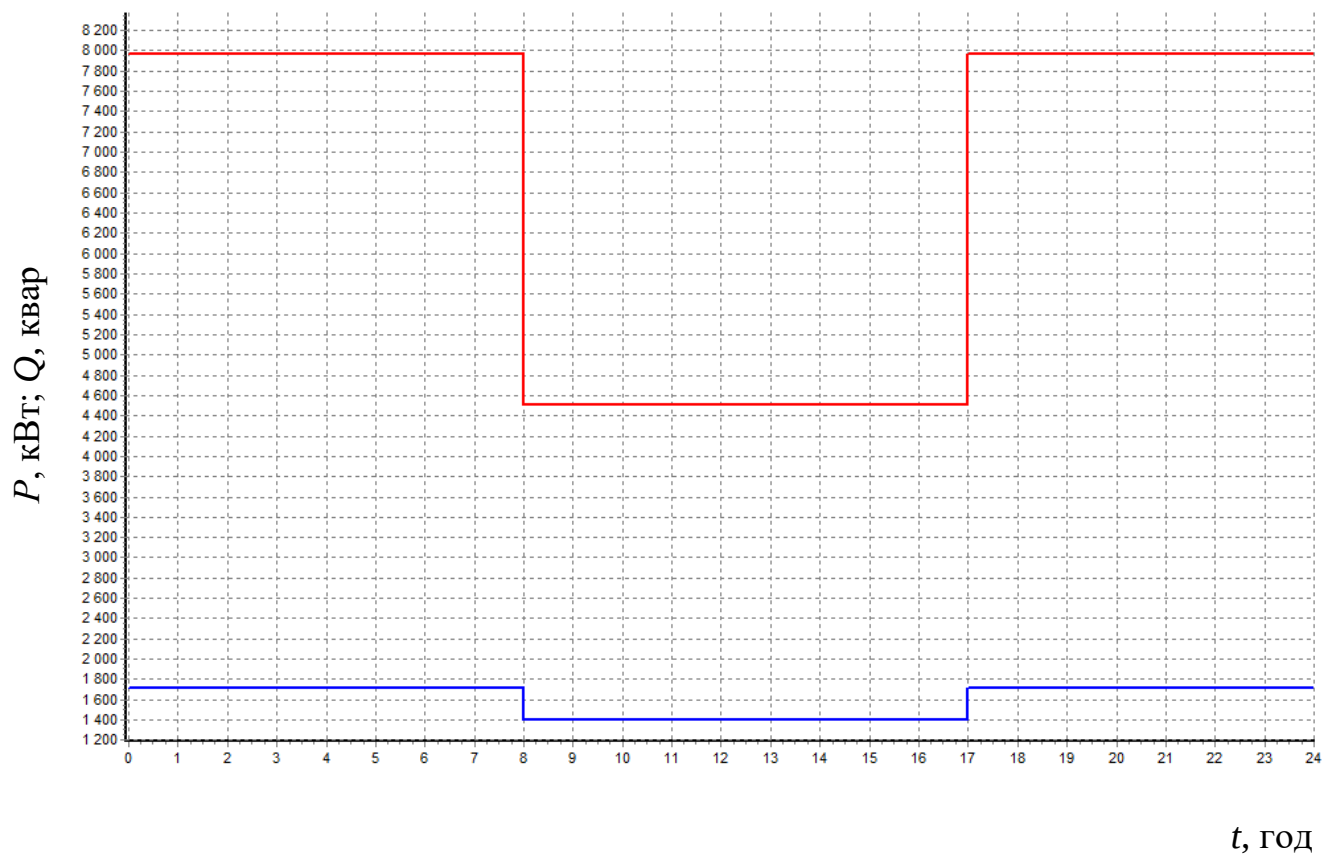


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (з.в.)

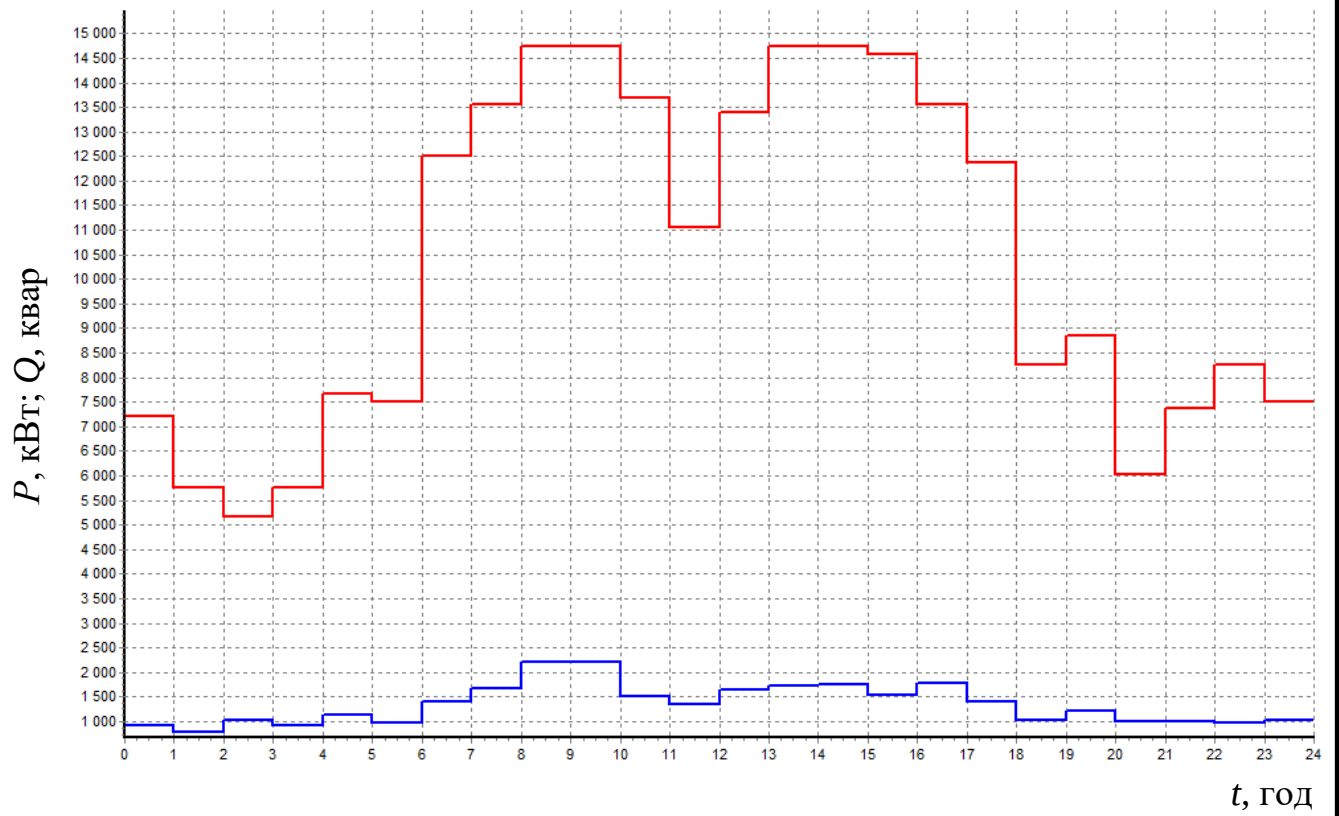


Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

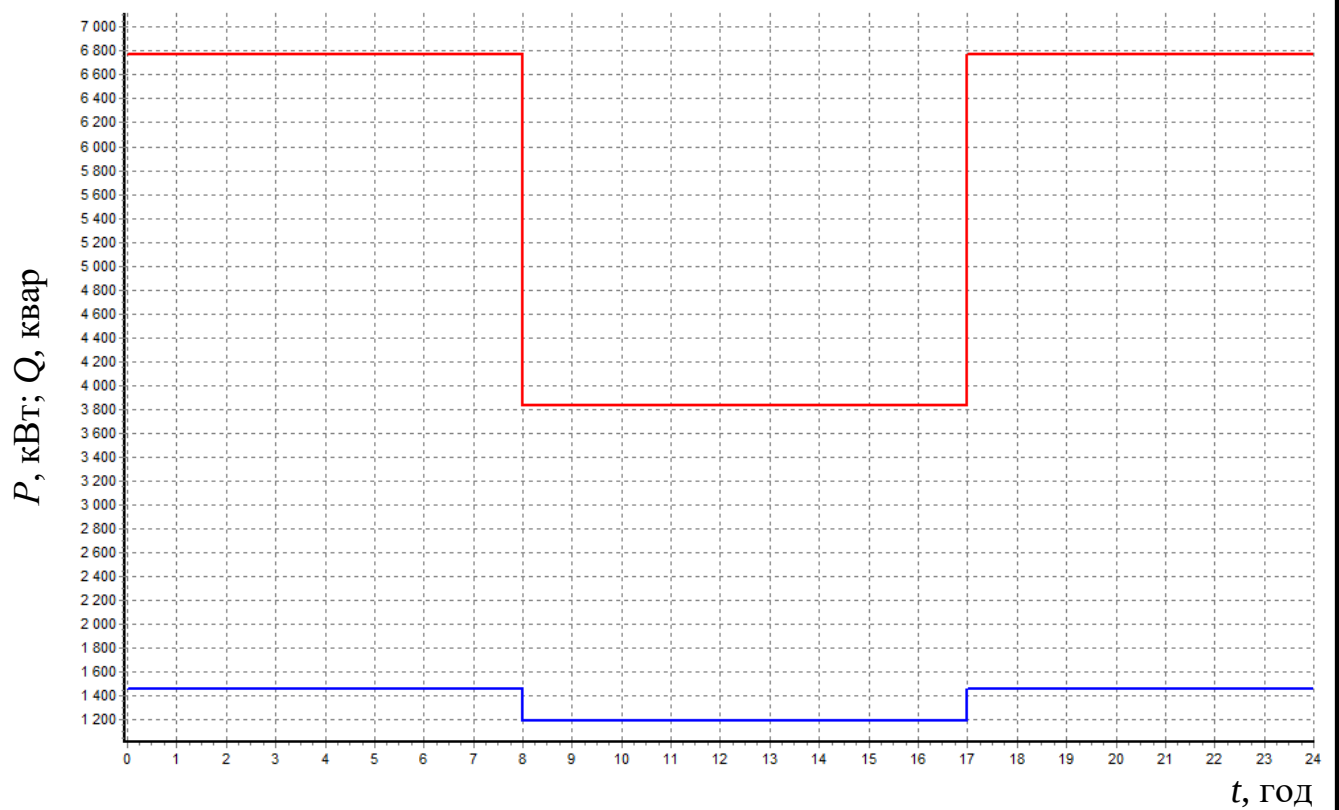


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Обчислення параметрів для відображення центрального виробничого блоку:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_{\text{осб}} + P_{\text{сил}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{12,65 + 1736,68}{3,14 \cdot 0,2}} = 52,78 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{360 \cdot P_{\text{осб}}}{P_{\text{сид}} + P_{\text{осб}}} = \frac{360 \cdot 12,65}{1736,68 + 12,65} = 2,6^\circ$$

Координати умовного центру електроспоживання:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m X_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{56853,23}{1749,33} = 32,5 \text{ M}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{281642,13}{1749,33} = 161,0 \text{ М}$$

Таблиця 2.1. Картограма ел. навантажень

№	Назва цеху	$P_{\text{сил}}, \text{кВт}$	$P_{\text{осв}}, \text{кВт}$	$P_1, \text{кВт}$	m	$R, \text{мм}$	$\alpha, \text{град}$	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$	$P_1 \cdot x, \text{кВт} \cdot \text{м}$	$P_1 \cdot y, \text{кВт} \cdot \text{м}$
1.	Центральний виробничий блок	1736,68	12,65	1749,33	0,20	52,78	2,60	32,50	161,00	56853,23	281642,13
2.	Зварювально-складальний цех	1435,51	9,22	1444,73	0,20	48,22	2,32	31,51	212,71	45523,44	307308,52
3.	Відділення апаратобудування	1017,85	10,41	1028,26	0,20	40,63	3,68	178,16	267,25	183194,80	274802,49
4.	Цех нанесення ізоляції	487,87	10,82	498,69	0,20	28,21	7,94	41,21	272,30	20551,01	135793,29
5.	Станція генерації кисню	137,45	6,31	143,76	0,20	15,16	16,03	281,18	277,35	40422,44	39872,34
6.	Теплогенераторна	644,44	7,72	652,16	0,20	32,32	4,32	402,18	267,25	262285,71	174289,76
7.	Дільниця обробки деревини	47,43	4,99	52,42	0,20	9,18	34,49	416,73	84,23	21844,99	4415,34
8.	Відділ лакофарбових матеріалів	1213,85	8,22	1222,07	0,20	44,30	2,44	50,62	64,70	61861,18	79067,93
9.	Автотранспортний підрозділ	29,38	4,46	33,84	0,20	7,35	48,11	140,39	33,23	4750,80	1124,50
10.	Складально-механічний підр.	1992,96	10,69	2003,65	0,20	56,79	1,93	140,39	33,31	281292,42	66741,58
11.	Дільниця заготівлі та звар.	1807,50	8,47	1815,97	0,20	54,04	1,70	298,76	23,23	542539,20	42184,98
12.	Промисловий майданчик підпр.	0,00	10,42	10,42	0,20	4,09	360,00	242,20	145,04	2523,72	1511,32
	Всього по підприємству	10550,92	104,38	10655,30						1523642,94	1408754,18

РОЗДІЛ 3

3.1 Схема зовнішнього електропостачання

Протяжність лінійної траси від промислового майданчика до трансформаторної підстанції 35/10 кВ становить 6,06 км. Зважаючи на це, раціонально проаналізувати дві альтернативні конфігурації електрозабезпечення:

1. Кабельна лінія 10 кВ.
2. Повітряна лінія 35 кВ.

1 варіант. Використання КЛ 10 кВ.

Визначення струмового навантаження магістралі:

$$I_{\text{розр}} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{11518,45}{\sqrt{3} \cdot 10} = 664,99 \text{ A}$$

До встановлення приймаємо чотири паралельні КЛ марки АСБ-10(3х150).

Тестування обраного перерізу:

$$I_{\text{н.р.}} = \frac{I_{\text{розр}}}{4} = 166,25 \text{ A} \leq K_{\text{п}} \cdot I_{\text{д}} = 0,84 \cdot 275 = 231 \text{ A}$$

$$I_{\text{а.п.}} = 2 \cdot I_{\text{н.п.}} = 2 \cdot 166,25 = 332,50 \text{ A} \leq K_{\text{а.п.}} \cdot I_{\text{д}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 275 = 343,75 \text{ A}$$

Прокладена лінія цілком відповідає критеріям надійності.

Таблиця 3.2. Щорічні експлуатаційні відрахування

№	Назва	K_j	P_{aj}	C_{aj}	P_{ej}	C_{ej}	C_j
1	КЛ 10 кВ	1322,05	5	66,10	5	66,10	132,20
2	Земляна траншея	87,51	5	4,38	5	4,38	8,76
3	Комірки КРП	21,60	15	3,24	5	1,08	4,32
	Загальна сума						145,28

Приведені економічні показники:

$$Z = E_n \cdot K + C + B_{втр} + Z_6 = 0,12 \cdot 1431,16 + 145,28 + 2631,16 + 9,23 \\ = 2957,41$$

Таблиця 3.3. Зіставлення параметрів конфігурацій зовнішньої мережі

Назва показника	Варіант	
	1	2
Капітальні інвестиції	1431,16	2511,97
Експлуатаційні відрахування	145,28	463,00
Вартісна оцінка втрат електроенергії	2631,16	10661,56
Фінансові збитки	9,23	4,01
Приведені витрати	2957,41	11430,01

За результатами розрахунків обираємо 1 варіант.

3.2 Схема внутрішнього електропостачання

Під час проектування локальної електричної мережі підприємства було прийнято рішення застосувати радіальну архітектуру. Такий інженерний підхід зумовлений низкою суттєвих експлуатаційних переваг над магістральним принципом:

1. Високий рівень безперебійності та селективність захисту. Завдяки тому, що кожна виробнича ділянка чи окремий потужний агрегат отримує напругу через індивідуальний фідер від головного розподільчого щита, забезпечується надійна

						Ар.
						25

ізоляція ймовірних пошкоджень. У разі виникнення короткого замикання на лінії, автоматика відсікає виключно проблемний сегмент, тоді як решта технологічного устаткування продовжує функціонувати у штатному режимі без жодних зупинок.

2. Зручність оперативного керування та сервісу. Подібна топологія є максимально прозорою для електротехнічного персоналу заводу. Вона дозволяє миттєво ідентифікувати аварійну ділянку, оскільки кожен провідник має чітко визначеного адресата. Додатково це гарантує безпечне проведення планово-попереджувальних ремонтів або заміни комутаційної апаратури без необхідності масштабного знеструмлення всього цеху.

3. Фінансова доцільність за умови розсосередження навантажень. У випадках, коли ключові енергоємні вузли знаходяться на значному просторовому віддаленні один від одного всередині великих промислових приміщень, монтаж індивідуальних кабельних трас стає рентабельнішим. Це дозволяє повністю уникнути прокладання масивних і дорогих магістральних шинопроводів через усю територію об'єкта.

4. Гнучкість та масштабованість інфраструктури. Інтеграція додаткових верстатів у майбутньому не вимагатиме складної реконструкції діючої мережі. Для розширення виробництва достатньо лише змонтувати нову лінію від вільної комірки цехової підстанції безпосередньо до місця встановлення запланованого обладнання.

5. Мінімізація технологічних втрат електроенергії. Враховуючи нерівномірність графіків споживання різних груп механізмів та їхню неодноразову експлуатацію, передача струму по виділених каналах дозволяє суттєво знизити загальні показники втрат активної потужності.

Варто наголосити, що для трансформаторобудівного комплексу вибір саме такого формату є критично необхідним. Наявність специфічних установок (наприклад, високовольтних випробувальних станцій або індукційних сушильних камер) генерує значні перешкоди в мережі. Застосування радіальної розводки зводить до мінімуму взаємний негативний вплив різних споживачів, гарантуючи

						Ар.
						26

еталонну якість напруги для чутливої електроніки систем числового програмного керування (ЧПК).

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Баланс реактивної потужності

Обчислювальні процедури щодо визначення балансового розподілу, спираючись на джерело [1], викладено далі.

Перша конфігурація. $N = 10$ шт.

$$P_p = P_H + \Delta P_T + P_B = 10392,07 + 143,35 + 2424 = 12959,42 \text{ кВТ}$$

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B = 7949,49 + 796,88 + 1174,78 = 9921,15 \text{ квар}$$

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 12959,42 \cdot 0,15 = 1943,91 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{кп}} = Q_{\text{п}} - Q_{\text{е}} = 9921,15 - 1943,91 = 7977,24 \text{ квар}$$

$$N = \frac{P_{\text{H}}}{\beta_0 \cdot S_{\text{HOM}}} = \frac{10392,07}{0,7 \cdot 1600} = 9,28 \approx 10 \text{ шт.}$$

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta_0 \cdot S_{\text{НОМ}})^2 - P_{\text{H}}^2} = \sqrt{(10 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 10392,07^2} = 4176,71 \text{ квap}$$

$$Q_{KH} = Q_H - Q_1 = 7949,49 - 4176,71 = 3772,78 \text{ квар}$$

$$Q_{KB} = Q_p - Q_{KH} - Q_e = 9921,15 - 3772,78 - 1943,91 = 4204,46 \text{ квар}$$

Таблиця 4.1. Підсумки розподілу реактивних навантажень

№ вар.	N_T	Q_I , кВт	Q_{KH} , кВт	Q_{KB} , кВт
1	10	4176,71	3772,78	4204,46
2	11	6617,19	1332,30	6644,94
3	12	8522,82	0	7977,24

4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв

Розрахунки з вибору КП наведені нижче.

Таблиця 4.2. Підсумки підбору конденсаторних установок ($N_T = 10$ шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{\text{розр,}}$ кВт	$Q_{\text{розр,}}$ квар	$Q_{\text{проп,}}$ квар	$Q_{\text{комп,}}$ квар	К-сть та потужн. батарей конд., шт. ·кВАр	$Q_{\text{БКсум,}}$ квар	$Q_{\text{кл -}}$ $Q_{\text{БК,}}$ квар	$K_{\text{зав}}$	$S_{\text{розр,}}$ кВА
1, 2	4	4146,74	3368,75	1832,9	1535,84	3·67; 1·112,5; 4·300;	1531,66	4,18	0,71	4535,45
3	2	2174,59	2137,92	640,25	1497,67	2·200; 2·536;	1489,66	8,01	0,71	2269,15
4	2	1896,69	1577,59	1241,49	336,1	2·166;	335,98	0,11	0,71	2266,94
5	2	2328,08	1670,97	0	1670,97	2·200; 2·225; 2·402;	1673,85	-2,87	0,73	2328,08

Таблиця 4.3. Підсумки підбору конденсаторних установок ($N_T = 10$ шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{\text{розр, кВт}}$	$Q_{\text{розр, квар}}$	$Q_{\text{проп, квар}}$	$Q_{\text{комп, квар}}$	К-сть та потужн. батарей конд., шт. ·кВАр	$Q_{\text{БКсум, квар}}$	$Q_{\text{кл}} - Q_{\text{БК, квар}}$	$K_{\text{зав}}$	$S_{\text{розр, кВА}}$
1, 2	4	4146,74	3368,75	1832,9	1535,84	2·50; 2·112,5; 4·300;	1543,3	-7,46	0,71	4530,75
3	3	2174,59	2137,92	2614,07	0		0	0	0,64	3049,51
4	2	1896,69	1577,59	1241,49	336,1	2·166;	335,98	0,11	0,71	2266,94
5	2	2328,08	1670,97	0	1670,97	2·300; 2·536;	1692,06	-21,09	0,73	2328,17

Таблиця 4.4. Підсумки підбору конденсаторних установок ($N_T = 10$ шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{\text{розр, кВт}}$	$Q_{\text{розр, квар}}$	$Q_{\text{проп, квар}}$	$Q_{\text{комп, квар}}$	К-сть та потужн. батарей конд., шт. ·кВАр	$Q_{\text{БКсум, квар}}$	$Q_{\text{кл - } Q_{\text{БК, квар}}}$	$K_{\text{зав}}$	$S_{\text{розр, кВА}}$
1, 2	4	4146,74	3368,75	1832,9	1535,84	2·50; 2·112,5; 4·300;	1543,3	-7,46	0,71	4530,75
3	3	2174,59	2137,92	2614,07	0		0	0	0,64	3049,51
4	2	1896,69	1577,59	1241,49	336,1	2·166;	335,98	0,11	0,71	2266,94
5	2	2328,08	1670,97	0	1670,97	2·300; 2·536;	1692,06	-21,09	0,73	2328,17

Втрати потужності:

$$\Delta P_{\text{БКН}} = P_{\text{пит}} \cdot Q_{\text{БКН}} = 0,0045 \cdot 5032,3 = 22,65 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{БКВ}} = P_{\text{ПИТ}} \cdot Q_{\text{БКВ}} = 0,003 \cdot 3643,0 = 10,93 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_T = \frac{P_H^2 + Q_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot R_T \cdot 10^{-3} = \frac{10392,07^2 + 4176,71^2}{10^2} \cdot 0,05 \cdot 0,001 = 62,72 \text{ кВТ}$$

$$K_{\text{БКН}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_i = 3 \cdot 25,68 + 1 \cdot 28,42 + 2 \cdot 34,61 + \\ + 4 \cdot 38,80 + 2 \cdot 40,26 + 4 \cdot 48,91 + 2 \cdot 59,57 + 2 \cdot 74,50 = 874,17 \text{ тис. грн}$$

$$K_{\text{БКВ}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_i = 2 \cdot 311,97 = 623,94 \text{ тис. грн}$$

$$K_{\text{ТП}} = K_{\text{ТП1}} + K_{\text{ТП2}} = 5 \cdot 6456,56 + 0 \cdot 3415,50 = 32282,80 \text{ тис. грн}$$

Приведені економічні показники:

$$\begin{aligned} 3 &= E_H \cdot (K_{BKH} + K_{BKB} + K_{TP}) + C_0 \cdot \tau \cdot (\Delta P_{BKH} + \Delta P_{BKB} + \Delta P_T) \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,12 \cdot (874,17 + 623,94 + 32282,80) + 8,96 \cdot 3365,31 \\ &\quad \cdot (22,65 + 10,93 + 62,72) \cdot 10^{-3} = 6957,46 \text{ тис. грн} \end{aligned}$$

Таблиця 4.5. Оцінка приведених витрат на компенсацію реактивної потужності

№	ҚБКН, квар	ДРБКН, кВт	ҚБКВ, квар	ДРБКВ, кВт	Нт, шт.	Ре, Ом	Спроп, кВА	ДРт, кВт	КБКН, тис. грн	КБКВ, тис. грн	КТП, тис. грн	З, тис. грн
1	5032,30	22,65	3643,00	10,93	10	0,05	11200	62,72	874,17	623,94	32282,80	6957,46
2	3571,30	16,07	4554,00	13,66	11	0,04	12320	61,44	616,25	623,94	35698,30	7180,78
3	3554,10	15,99	4554,00	13,66	12	0,04	13440	73,12	609,14	623,94	38739,36	7895,51

Приймаємо 1-й варіант.

РОЗДІЛ 6

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Опори елементів мережі:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{K.3.}} = \frac{10,5^2}{100} = 1,103 \text{ OM}$$

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

$$R_{\kappa l} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{\kappa l}} = \frac{0,206 \cdot 6}{2} = 0,618 \text{ OM}$$

$$X_{\kappa l} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{\kappa l}} = \frac{0,079 \cdot 6}{2} = 0,24 \text{ OM}$$

$$X_{K1} = X_c + X_{KL} = 1,103 + 0,24 = 1,343 \text{ OM}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{\kappa l} = 0,044 + 0,618 = 0,662 \text{ OM}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,662^2 + 1,343^2} = 1,497 \text{ OM}$$

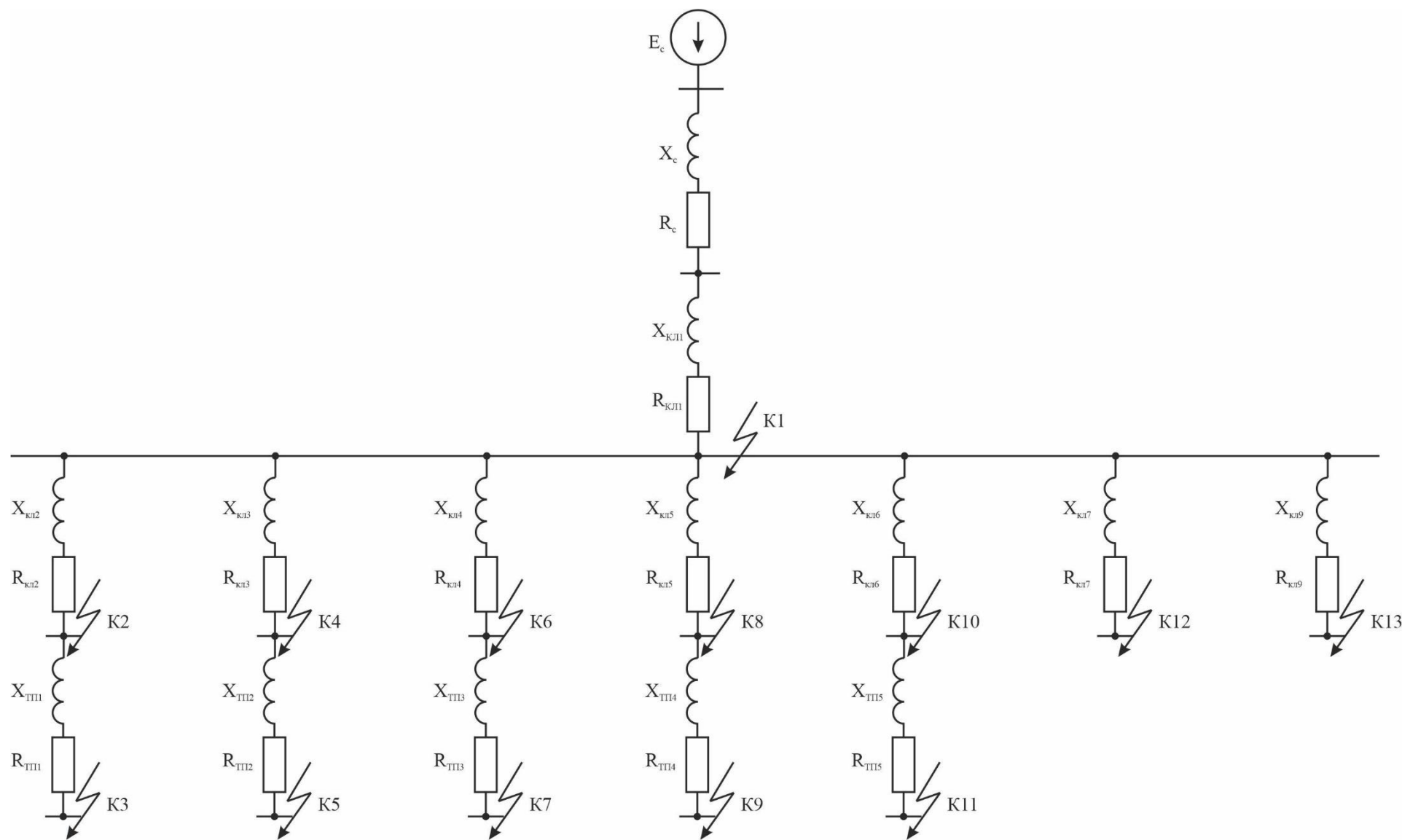


Рис. 6.1. Розрахункова схема

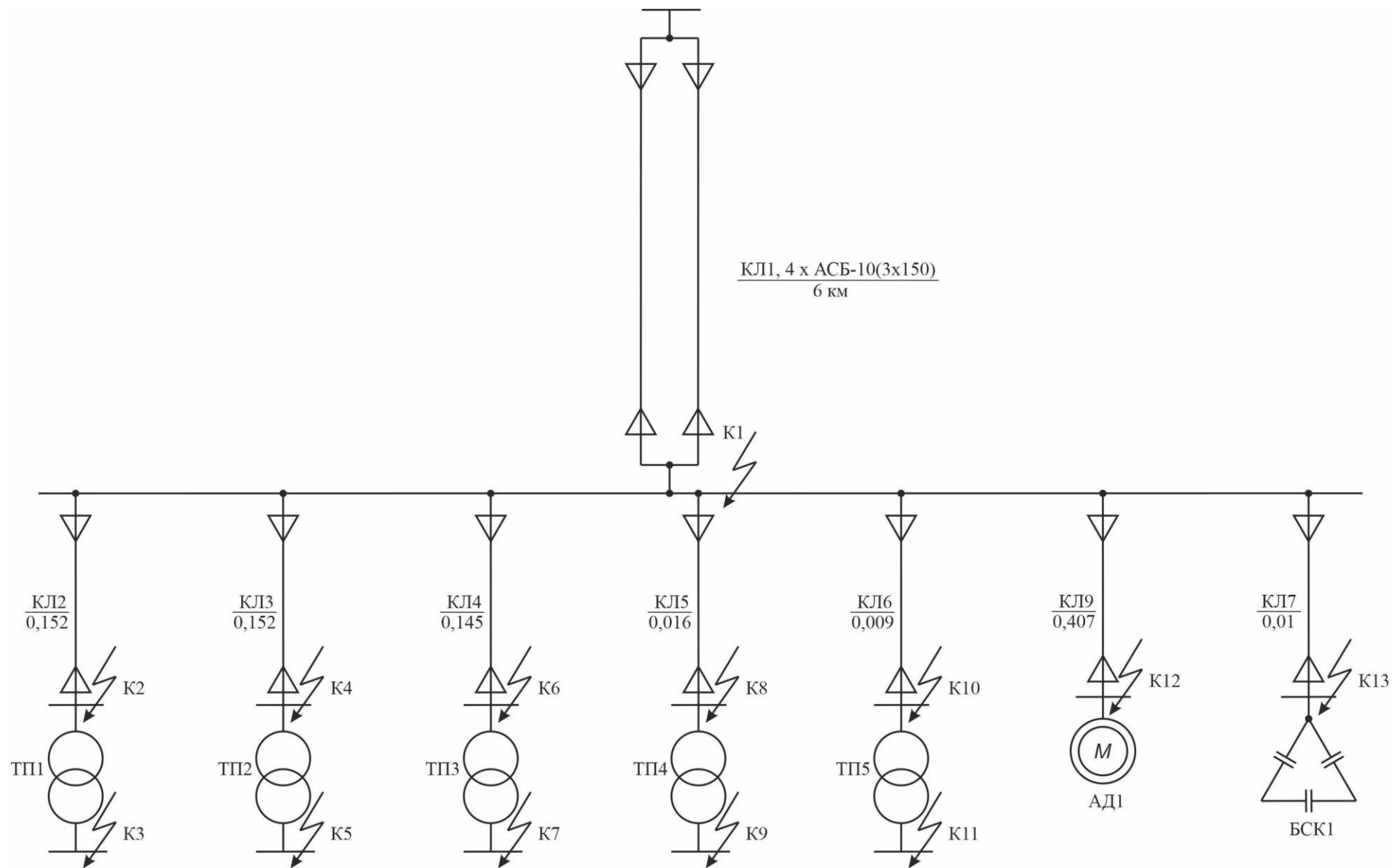


Рис. 6.2. Схема заміщення

Параметри струму к.з. в т. К1:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,497} = 4,05 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{1,343}{314 \cdot 0,662} = 0,0065 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0065}} = 1,215$$

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2}k_{y\partial} I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,215 \cdot 4,05 = 6,96 \text{ кА}$$

Струм підживлення від АД 10 кВ:

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi_{ном} \cdot \eta} = \frac{0,8}{0,8 \cdot 0,92} = 1,087 \text{ МВА}$$

$$X_{АД} = \frac{1}{I_{пуск}} \frac{U_{cp.ном}^2}{S_{ном}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 1,087} = 19,5 \text{ Ом}$$

$$I''_{K1(АД)} = n_{АД} \frac{E_* \cdot U_{cp.ном}}{\sqrt{3}X_{АД}} = 4 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 19,5} = 1,12 \text{ кА}$$

$$i_{y\partial 1(АД)} = \sqrt{2}k_{y\partial(АД)} I''_{K1(АД)} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 1,12 = 2,69 \text{ кА}$$

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(АД)} = 4,05 + 1,12 = 5,17 \text{ кА}$$

						Ар.
						35

$$i_{y\partial 1} = i_{y\partial 1(c)} + i_{y\partial 1(AD)} = 6,96 + 2,69 = 9,65 \text{ кА}$$

Параметри вибору КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{2240,84}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 61,61 \text{ А}$$

$$B_{\kappa} = I_{K1}''^2 (t_{p.з.min} + T_a) = 5,17^2 (1,365 + 0,0065) = 36,66 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_{\kappa}} = \frac{1}{94} \sqrt{36,66 \cdot 10^3} = 64,41 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель ААШВ-10(3 х 70).

Опір КЛ1:

$$R_{\kappa l} = r_0 \cdot l_{\kappa l} = 0,443 \cdot 0,152 = 0,067 \text{ Ом}$$

$$X_{\kappa l} = x_0 \cdot l_{\kappa l} = 0,086 \cdot 0,152 = 0,013 \text{ Ом}$$

Параметри струму к.з. в т. К2:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{\kappa l} = 1,343 + 0,013 = 1,356 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{\kappa l} = 0,662 + 0,067 = 0,729 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,729^2 + 1,356^2} = 1,54 \text{ Ом}$$

						Ар.
						36

Таблиця 6.1. Розрахунок опорів КЛ

№	l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	R , Ом	X , Ом
1	6,000	0,206	0,079	0,618	0,237
2	0,152	0,443	0,086	0,067	0,013
3	0,152	0,443	0,086	0,067	0,013
4	0,145	0,443	0,086	0,064	0,012
5	0,016	0,443	0,086	0,007	0,001
6	0,009	0,443	0,086	0,004	0,001
7,8	0,010	0,326	0,083	0,003	0,001
9,12	0,407	0,443	0,086	0,180	0,035

$$I_{K2}'' = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,54} = 3,94 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{1,356}{314 \cdot 0,729} = 0,0059 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0059}} = 1,184$$

$$i_{y\partial 2} = \sqrt{2}k_{y\partial}I_{K2}'' = \sqrt{2} \cdot 1,184 \cdot 3,94 = 6,6 \text{ кА}$$

Опір ТМ-1600/10:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{\kappa} U_{cp.ном}^2}{S_{ном}^2} = \frac{11,6 \cdot 10,5^2}{1600^2} \cdot 10^3 = 0,5 \text{ Ом}$$

						Ар.
						37

$$X_{mp} = \frac{U_{\kappa, \%} U_{cp. ном}^2}{S_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{1600} \cdot 10 = 3,79 \text{ Ом}$$

Параметри струму к.з. в т. КЗ:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (1,356 + 3,79) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0075 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (0,729 + 0,5) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0018 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0018^2 + 0,0075^2} = 0,0077 \text{ Ом}$$

$$I_{K3}'' = \frac{U_{cp. ном.}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0077} = 29,99 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0075}{314 \cdot 0,0018} = 0,0133 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0133}} = 1,471$$

$$i_{y\partial 3} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,471 \cdot 29,99 = 62,39 \text{ кА}$$

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

№	R, Ом	X, Ом	I_{κ}'' , кА	T_a , с	$k_{уд}$	$i_{уд}$, кА
1	0,6620	1,3430	5,17	0,0065	1,215	9,65
2	0,7290	1,3560	3,94	0,0059	1,184	6,60
3	0,0018	0,0075	29,99	0,0133	1,471	62,39
4	0,7290	1,3560	3,94	0,0059	1,184	6,60
5	0,0018	0,0075	29,99	0,0133	1,471	62,39
6	0,7260	1,3550	3,94	0,0059	1,184	6,60
7	0,0018	0,0075	29,99	0,0133	1,471	62,39
8	0,6690	1,3440	4,04	0,0064	1,210	6,91
9	0,0017	0,0075	29,99	0,0141	1,492	63,28
10	0,6660	1,3440	4,04	0,0064	1,210	6,91
11	0,0017	0,0075	29,99	0,0141	1,492	63,28
12	0,6650	1,3440	4,04	0,0064	1,210	6,91
13	0,8420	1,3780	3,75	0,0052	1,146	6,08

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

КЛ до ТП1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{2240,84}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 61,61 \text{ A}$$

Обираємо 2 х ААШВ-10(3х70).

$$I_p = 61,61 \text{ A} \leq K_n \cdot I_{дон} = 0,9 \cdot 165 = 148,5 \text{ A}$$

$$I_{a\phi} = 123,22 \text{ A} \leq K_{an} \cdot K_n' \cdot I_{\phi on} = 1,35 \cdot 1 \cdot 165 = 222,75 \text{ A}$$

$$B_{\kappa} = I_{K1}''^2 (t_{p.3.\min} + T_a) = 5,17^2 (1,365 + 0,0065) = 64,41 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_{\kappa}} = \frac{1}{94} \sqrt{36,66 \cdot 10^3} = 64,41 \text{ мм}^2$$

						Ар.
						40

Таблиця .6.3. Вибір КЛ

№	$n_{\text{КЛ, шт}}$	$S_{\text{розр, МВА}}$	$I_{\text{р, А}}$	$I_{\text{р.ав, А}}$	$B_{\text{к, кА}^2\text{с}}$	$F_{\text{min, мм}^2}$	Марка КЛ	$I_{\text{доп, А}}$	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$	$K_{\text{ап}}$	$K'_{\text{п}}$	$K_{\text{ап}} K'_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$
1	4	11275	154,99	309,98	36,66	64,41	4 х АСБ-10(3 х 150)	275	0,8	220	1,35	0,9	334,13
2	2	2240,84	61,61	123,22	36,66	64,41	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
3	2	2240,84	61,61	123,22	36,66	64,41	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
4	2	2242,25	61,65	123,3	36,66	64,41	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
5	2	2240,06	61,59	123,18	36,66	64,41	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
6	2	2300,47	63,25	126,5	36,66	64,41	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
7,8	1	1800	98,97	-	36,66	64,41	1 х ААШВ-10(3х95)	205	1	205	-	-	-
9,12	1	800	43,99	-	36,66	64,41	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	165	-	-	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Розрахункові параметри вибору ввідного вимикача наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача

Назва параметру	Умова	Розрах. значення
Номінальна напруга, кВ	$U_{вст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 11$
Довготр. струм, кА	$I_{р.ф.} \leq I_{ном}$	$650,9 \leq 1000$
Відключаюча здатність: - симетр. струм: - аперіод. склад.: - повний струм:	$I_{нт} \leq I_{в.н.}$ $i_{a\tau} \leq \sqrt{2}\beta_{ном} I_{в.н.}$ $\sqrt{2}I_{нт} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2}I_{н.в.}(1 + \beta_{ном})$	$4,05 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 4,05 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $5,73 \leq 39,6$
Динамічна стійкість: - симетр. струм: - уд. струм:	$I'' \leq I_{д.ст.}$ $i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{д.ст.}$	$4,05 \leq 52$ $6,96 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{т.ном}^2 t_{т.ном}$	$20,48 \leq 1200$

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

$$i_{a\tau} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 4,05 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0065}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_k = I''^2 (t_{c.в.} + t_{pz.max} + T_a) = 4,05^2 (0,042 + 1,2 + 0,0065) = 20,48 \text{ кА}^2\text{с}$$

Обираємо ВР2-10-20/1000.

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема приєднання ТВП наведена на рис. 6.3.

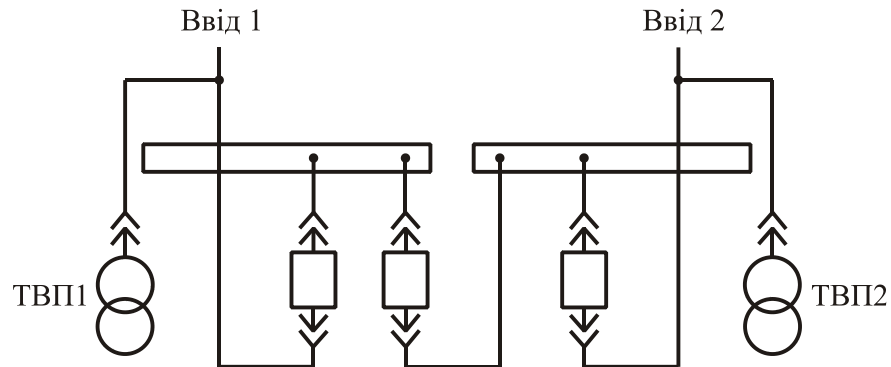


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП

Таблиця 6.5. Розрахунок електр. навант. ТВП

№	Назва споживача	$P_{\text{н}},$ кВт	n , шт.	$P_{\Sigma},$ кВт	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$P_{\text{вст}},$ кВт	$Q_{\text{вст}},$ квар
1.	Пристрої підігріву комірок КРП	0,6	20	12	0,97	0,25	12	3
2.	Приміщення персоналу	6	3	18	0,97	0,25	18	5
3.	Зовнішнє освітлення	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
4.	Оперативні кола	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
Всього							66	18

Сумарне навант. ТВП:

$$S_{\text{BCT}} = \sqrt{P_{\text{BCT}}^2 + Q_{\text{BCT}}^2} = \sqrt{66^2 + 18^2} = 68,41 \text{ kBA}$$

$$S_{\text{розр}} = K_{\text{п}} S_{\text{вст}} = 0,8 \cdot 68,41 = 54,73 \text{ кВА}$$

Обираємо ТМ-40/10.

$$K_{\text{зав}} = \frac{S_{\text{розр}}}{n_{\text{т}} S_{\text{н.т.}}} = \frac{54,73}{2 \cdot 40} = 0,68$$

						Ар.
						44

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

З метою підвищення показників живлення в сучасних мережах застосовують декілька базових груп концептуальних інженерних рішень. Актуальність цих методів постійно зростає через масове впровадження чутливої мікропроцесорної техніки та інтеграцію відновлюваних джерел, що генерують специфічні завади.

Початковий напрямок фокусується на структурному вдосконаленні розподільних комплексів. Він охоплює розширення пропускних можливостей магістральних ліній, використання вищих класів напруг під час живлення споживачів із нелінійними характеристиками струму, і оновлення парку силових трансформаторів (до прикладу, заміна застарілих одиниць на сучасні ТМ-1000 зі стандартною напругою 10/0,4 кВ, але з пониженими втратами). Зазначені кроки дають змогу гарантувати високу надійність функціонування енергетичного комплексу та мінімізувати технологічні втрати при транспортуванні струму. Додатково варто зазначити, що зростання потужності короткого замикання в точці приєднання суттєво знижує еквівалентний опір мережі. Застосування схем з'єднання обмоток трансформаторів типу "зірка-зигзаг" сприяє локалізації струмів нульової послідовності безпосередньо всередині магнітопровода, не пропускаючи їх у первинну високовольтну мережу.

Наступний концептуальний підхід базується на локалізації шкідливого впливу навантажень шляхом цілеспрямованої зміни характеристик устаткування безпосередньо на стороні клієнта. Цей спектр заходів містить монтаж установок поперечної компенсації, інтеграцію динамічних активних гармонійних фільтрів, експлуатацію частотно-керованих приводів та розгортання автоматизованих алгоритмів диспетчеризації споживання. Впровадження активних фільтрів є особливо ефективним: вони здатні генерувати струми, що знаходяться в строгій протифазі до вищих гармонік, які утворюються випрямлячами та імпульсними блоками живлення. Сучасні електроприводи з активними випрямлячами

						Ар.
						45

(технологія Active Front End) здатні працювати з одиничним коефіцієнтом потужності, нівелюючи негативний вплив на живлячий центр.

Наступний комплекс інженерних рішень, що логічно розширює цю типологію, ґрунтується на залученні інноваційних концепцій "розумних мереж" (Smart Grid) та інструментів безперервного відстеження параметрів живлення. Впровадження подібних інновацій охоплює саморегульовані конденсаторні установки, комплекси швидкісного придушення кондуктивних завад та цифрові енергомережі, які здатні самостійно коригувати режими роботи, опираючись на поточний експлуатаційний стан системи. Завдяки технологіям векторного вимірювання (PMU), диспетчерські центри фіксують найменші відхилення фазного кута або частоти. Це формує технологічну базу для миттєвого реагування на провали напруги чи перехідні електромагнітні процеси.

Крім того, окремим важливим вектором є безпосередня інсталяція вузькоспеціалізованих апаратних комплексів для нормалізації показників живлення. Таке обладнання працює в ролі локальних стабілізаторів окремих або одразу декількох критеріїв надійності енергопостачання, включаючи супутні параметри споживаного струму.

Серед найпоширеніших варіантів реалізації такого апаратного підходу виділяють наступні технології.

Традиційні установки на базі косинусних ємностей передбачають експлуатацію спеціальних конденсаторних збірок для генерування випереджаючого струму та загальної оптимізації $\cos \varphi$. Подібні агрегати результативно нівелюють вплив індуктивних споживачів на систему, тим самим розвантажуючи магістральні кабелі від перетікань реактивної складової. При наявності значного фону вищих гармонік (понад 5-8%), послідовно з ємностями встановлюють антирезонансні дроселі, які зміщують резонансну частоту контуру (зазвичай налаштовують на 189 Гц або 210 Гц для базової частоти 50 Гц).

Системи статичної компенсації (технологія SVC) являють собою високотехнологічне силове обладнання на базі напівпровідникових ключів, котре гарантує практично миттєву зміну рівня реактивної генерації без застосування

						Ар.
						46

класичних механічних контакторів. Їх архітектура зазвичай поєднує в собі силові індуктивності, струм у яких плавно регулюється тиристорами, та ємнісні щаблі, що комутуються аналогічними електронними вентилями. Швидкодія таких комплексів дозволяє успішно боротися з флікером від дугових сталеплавильних печей. Логічним продовженням стали системи STATCOM на базі транзисторів типу IGBT, які зберігають номінальний струм компенсації навіть при глибоких просадках напруги.

Для ілюстрації ефективності впровадження описаних пристроїв, розрахунок зниження втрат активної потужності ΔP у лініях електропередачі здійснюється за скоригованою базовою залежністю:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q_{res}^2}{U^2} R_{eq}$$

де Q_{res} – залишкова реактивна потужність після компенсації; R_{eq} – еквівалентний активний опір ділянки мережі.

Зміна динамічних характеристик обладнання при модернізації відображена у порівняльній зведеній таблиці нижче. Значення параметрів наведені з урахуванням похибки вимірювальних трансформаторів та реальних умов експлуатації типових промислових об'єктів.

Таблиця 7.1. Порівняльний аналіз ефективності швидкодіючих засобів компенсації

Тип впровадженого обладнання	Середній час реакції системи, мс	Очікуване зниження втрат в магістралі, %	Можливість плавно-імпульсного регулювання
Контакторні конденсаторні збірки	125	11,8	Відсутня (ступінчаста)
Тиристорно-керовані установки (SVC)	18	19,4	Присутня
Синхронні компенсатори (STATCOM)	4	22,1	Присутня (високоточна)

Комплекси активної фільтрації являють собою високотехнологічне інтелектуальне устаткування, побудоване із використанням сучасної силової перетворювальної техніки. Принцип дії цих пристроїв полягає у безперервному моніторингу та швидкому спектральному аналізі струмової кривої в режимі реального часу. На основі отриманих обчислень мікропроцесорна система формує зустрічні компенсаційні імпульси, які генеруються в лінію та дозволяють повністю нівелювати гармонійні викривлення. Дані апаратно-програмні засоби демонструють виняткову результативність у боротьбі з вищими гармоніками, котрі постійно генеруються різноманітними нелінійними навантаженнями промислового чи побутового характеру. Завдяки використанню швидкодіючих транзисторів та цифрових сигнальних процесорів, подібні агрегати здатні реагувати на перехідні процеси протягом мікросекунд. Важливою перевагою такого інноваційного підходу є повна відсутність ризику виникнення паразитних резонансних явищ, що завжди залишається типовою експлуатаційною проблемою класичних пасивних LC-контурів.

Комбіновані (або гібридні) компенсаційні установки є комплексними інженерними рішеннями, у яких декілька вищезгаданих технологічних концепцій об'єднуються за паралельною топологією підключення. Зазначені архітектури гарантують всебічну нормалізацію цілого ряду показників надійності електроживлення в одночасному режимі. Вони успішно виконують завдання з генерування необхідної реактивної енергії, глибокого очищення мережі від спотворень та жорсткої стабілізації рівнів напруги. Економічна доцільність впровадження подібних гібридів зумовлена тим, що базове ємнісне навантаження на основній частоті бере на себе дешевша пасивна частина, тоді як значно дорожчий активний модуль згладжує лише залишкові динамічні відхилення та високочастотні флуктуації, зменшуючи загальну вартість проекту.

Окремої уваги у цьому списку заслуговують машини синхронного типу (компенсатори). Вони являють собою класичні обертові електродвигуни змінного струму, які спеціально розроблені для функціонування у режимі холостого ходу (тобто без приєднання будь-якого корисного механічного навантаження на вал).

Їхня головна перевага полягає у здатності працювати у двох реверсивних режимах: як споживати індуктивний струм, так і видавати ємнісну складову в систему, спираючись на поточний системний баланс потужностей. В умовах глобальної трансформації енергетики ці агрегати набувають нового змісту, оскільки вони здатні забезпечувати так звану "фізичну інерцію" мережі. Ця властивість обертових мас є критично важливою для стабілізації частоти в магістралях із високою часткою сонячних інверторів та вітрових генераторів.

Відмітною рисою поведінки сучасних "активних клієнтів" (так званих проз'юмерів) є їхня готовність до керованого самостійного коригування графіків власного електроспоживання. Історично цей диспетчерський процес асоціювався виключно із завданнями підтримання загальносистемної рівноваги активної енергії (концепція Demand Response). Втім, надзвичайно пріоритетною задачею для операторів розподільних компаній є і залишатиметься жорстке дотримання локального балансу реактивної складової струму. Це об'єктивно необхідно для максимізації рівнів напруги в ключових вузлових центрах живлення та суттєвого нарощування резервів статичної стійкості точок підключення комплексного навантаження.

З метою реалізації зазначених системних цілей традиційно практикується монтаж автономних генераторів реактивної енергії в безпосередній близькості до точок приєднання кінцевих абонентів. Така класична стратегія розбудови мережі передбачає просторове розосередження обертових синхронних агрегатів, встановлення швидкодіючих систем STC, а також обов'язкове впровадження механізмів автоматичного регулювання напруги під навантаженням (АРНН) на трансформаторних підстанціях. Устаткування АРНН дозволяє дискретно змінювати коефіцієнт трансформації без переривання енергопостачання, що є базовим інструментом оперативного впливу диспетчера.

Попри це, при аналізі парадигми інтерактивної взаємодії абонентів, їхня фактична участь здебільшого штучно звужується лише до банального монтажу типових конденсаторних збірок для підтримання нормативного косинуса фі. На превеликий жаль, під час проектування промислових об'єктів майже не звертається

увага на величезні приховані можливості клієнтів щодо гнучкого динамічного контролю за обсягами генерації неактивної компоненти. Експлуатація жорстко запрограмованих компенсаторів позбавляє локальну мережу необхідної маневреності під час раптових збурень.

Сьогоднішні інтерактивні абоненти володіють апаратною базою для розгортання розумних керуючих алгоритмів. Ці високотехнологічні комплекси дають шанс не просто статично відсікати реактивні перетоки, а цілеспрямовано і плавно маневрувати ними, орієнтуючись на поточну топографію та стан енергосистеми. Зазначена інноваційна концепція охоплює залучення гнучких адаптивних стратегій цифрового управління, котрі обов'язково аналізують наступні вхідні критерії:

- актуальні індикатори якості енергопостачання в точці комерційного обліку (наприклад, глибина провалів напруги, коефіцієнт несиметрії фаз або сумарний відсоток гармонійних спотворень).
- вартісні параметри та динамічні тарифні сітки (що створює прямі фінансові стимули для підприємств розвантажувати лінії живлення в години системного піку).
- аналітичні прогнози щодо ймовірних коливань споживаної потужності (часто побудовані із застосуванням нейромережевих моделей та методів машинного навчання).
- поточна продуктивність об'єктів розподіленої генерації (як приклад, використання вільних апаратних потужностей інверторів сонячних панелей у нічний час для генерації чистого реактивного струму).

Впровадження описаного багатокритеріального підходу докорінно змінює логіку взаємовідносин на ринку, трансформуючи звичайних пасивних реципієнтів у повноправних і діяльних суб'єктів підтримки надійності єдиної енергетичної мережі. Дана тенденція є критично необхідною у площині масштабного розгортання концепції розумних енергомереж (Smart Grid) та стрімкого збільшення встановлених генеруючих потужностей на базі нетрадиційних відновлюваних

джерел електроенергії, які за своєю природою потребують постійного балансувального супроводу.

7.1. Пасивні засоби локалізації вищих гармонік

Класичні фільтрувальні контури пасивного типу являють собою спеціалізовані електротехнічні комплекси, апаратна база яких формується з ретельно підібраних ємнісних, індуктивних та теплорозсіювальних (резистивних) складових. За своїм функціональним призначенням і амплітудно-частотними характеристиками їх класифікують на два фундаментальні класи: вузькосмугові резонансні ланцюги та широкосмугові системи пропускання верхніх частот. Подібне захисне обладнання монтується виключно за паралельною схемою підключення відносно вузлів генерації кондуктивних завад. До головних джерел таких електромагнітних забруднень належать різноманітні нелінійні споживачі: потужні промислові перетворювачі на базі керованих вентилів, сталеплавильні печі з нестабільною дугою, частотно-керовані електроприводи станков і конвеєрів, а також сучасна силова електроніка високої потужності.

Математично, повний комплексний опір $\underline{Z}_h$ окремої гілки фільтра для довільної гармоніки порядку h можна виразити наступною розширеною залежністю:

$$\underline{Z}_h = R + j \left(h\omega_1 L - \frac{1}{h\omega_1 C} \right)$$

де ω_1 – кутова частота основної складової (наближено 314,16 рад/с); L та C – параметри реакторів і конденсаторних батарей відповідно; R – активний опір втрат.

Вузькосмугові (налагоджувані) апарати розробляються для точкової нейтралізації чітко визначених паразитних частот спектру. Їхня робота базується на явищі резонансу напруг, при якому реактивний опір гілки наближається до нуля, залишаючи лише мінімальну величину активного опору, тоді як для струмів базової промислової частоти такий контур залишається високоімпедансним.

До базової номенклатури резонансних пристроїв відносять:

1. Одинарні LC-контури – цілеспрямовано проектуються для захоплення однієї домінуючої компоненти спектру. З огляду на необхідність уникнення паразитних резонансів із самою мережею, на практиці їх налаштовують із відхиленням до 3-5 %. Наприклад, замість точної 5-ї гармоніки, резонансну точку зміщують на значення $h_{res} \approx 4,85$, а для 7-ї – на $h_{res} \approx 6,78$.

2. Здвоєні фільтрувальні ланцюги – складна архітектура, яка еквівалентна двом паралельним одинарним гілкам, проте має значно менші втрати активної потужності на базовій частоті 50 Гц і дозволяє одночасно "відсмоктувати" дві сусідні паразитні частоти.

3. Контури з демпфуванням – їхня структура доповнюється шунтуючим резистором, що штучно знижує добротність коливального контуру, тим самим роблячи смугу захоплення дещо ширшою та менш чутливою до коливань параметрів мережі.

Своєю чергою, контури пропускання високих частот (або ФВЧ) орієнтовані на зрізання цілого масиву високочастотних коливань, починаючи від певної межі. Інженерна практика виділяє архітектури першого, другого і третього ступенів. Вони суттєво різняться за кутом нахилу асимптоти на логарифмічній частотній характеристиці, кількістю задіяних радіоелементів та загальним обсягом неминучих теплових втрат.

На об'єктах важкої промисловості, де експлуатуються масивні багатокрокові випрямні агрегати (зокрема, 12-пульсні тиристорні мости), оптимальним рішенням стає проектування змішаних (гібридних) фільтрокомпенсуючих установок. Вони інтегрують у собі сильні сторони різних схемотехнічних підходів. Стандартний промисловий пакет такого рівня містить:

- комплект із чотирьох незалежних одинарних LC-гілок, які відповідають за ліквідацію найбільш потужних канонічних гармонік (5-ї, 7-ї, 11-ї та 13-ї).
- широкосмуговий демпфований модуль другого ступеня, налаштований на зрізання 17-ї складової та всього вищого завадового спектру.

						Ар.
						52

- спеціальні антирезонансні ланки, головна функція яких – не допустити виникнення перенапруг при перехідних процесах.

Така багаторівнева стратегія гарантує радикальне покращення синусоїдальності напруги. Для оцінки результативності таких заходів використовується коефіцієнт нелінійних спотворень струму (THD_I), який після впровадження фільтрів має задовольняти жорстким галузевим нормативам:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \leq 5,0 \%$$

Фундаментальна ідея, на якій ґрунтується робота будь-якого пасивного фільтра, зводиться до формування штучних струмопровідних магістралей із гранично низьким значенням комплексного опору для цільових паразитних частот. Завдяки розміщенню цих шунтувальних контурів у безпосередній близькості до джерела емісії завад, відбувається перерозподіл струмів згідно з законами Кірхгофа. Спотворені струмові компоненти фізично "засмоктуються" у фільтрувальне обладнання, де їхня енергія локалізується або розсіюється, що гарантовано блокує їхнє подальше проникнення у зовнішню розподільну енергосистему та захищає живлячий трансформатор від перегріву.

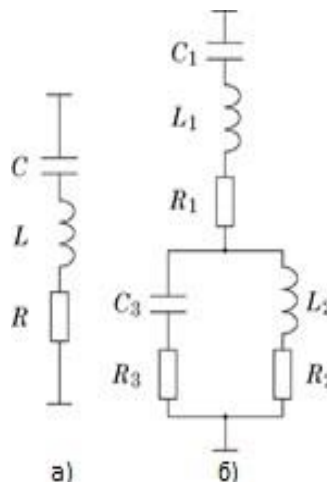


Рис. 7.1. Схемотехнічні рішення для налагоджуваних фільтрувальних ланцюгів:

(а) одноконтурна топологія; (б) двоконтурна архітектура з комбінованим налаштуванням.

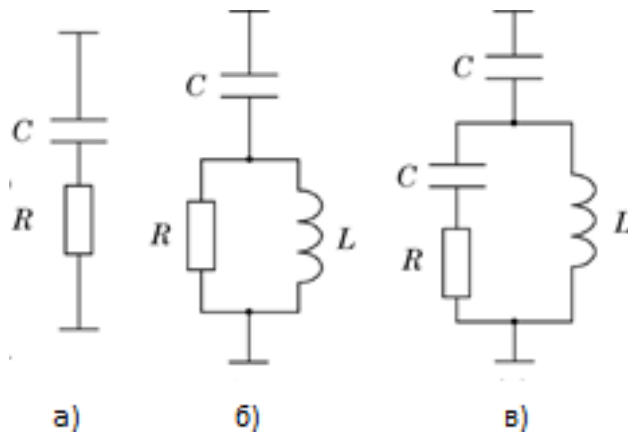


Рис. 7.2. Структурні схеми широкосмугових високочастотних фільтрів:
 (а) Найпростіший контур першого порядку; (б) Оптимізована схема другого
 порядку; (в) Багатoeлементна конфігурація третього порядку.

7.2. Засоби активної фільтрації для зниження гармонійних спотворень

Залежно від обраної топології інтеграції в існуючу схему електропостачання, сучасні силові активні нормалізатори якості електроенергії класифікують на два фундаментальні типи: паралельні (або шунтувальні) та послідовні апарати. Практичний досвід експлуатації та проектування доводить, що обладнання шунтувального типу володіє безперечними конструктивними, економічними та експлуатаційними перевагами над послідовними модифікаціями. Це переважно зумовлено тим, що паралельний пристрій не пропускає через власні напівпровідникові ключі весь номінальний струм об'єкта, що суттєво мінімізує встановлену потужність перетворювача та загальні теплові втрати.

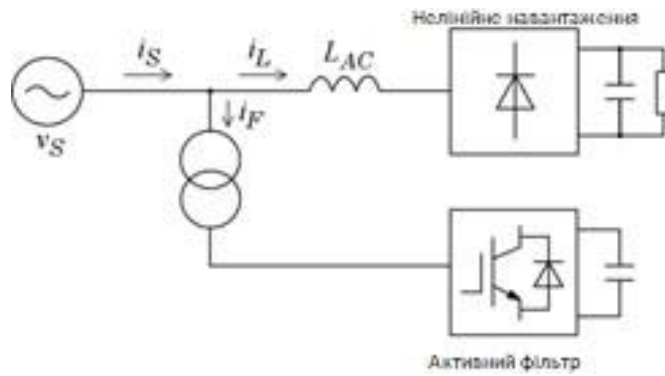


Рис. 7.3. Структурна топологія підключення паралельного нормалізатора для однофазних та трифазних електромереж

Архітектура паралельного приєднання виступає найбільш поширеним і концептуально базовим схемотехнічним рішенням серед усього різноманіття гібридних або суто електронних засобів корекції. Широке впровадження цієї перетворювальної техніки на виробничих підприємствах пояснюється її винятковою результативністю та відпрацьованою роками технологією побудови силових інверторних блоків.

У переважній більшості індустріальних задач (зокрема, при живленні систем постійного струму) еквівалентним потужним джерелом генерації завад виступають приводні механізми. Класичним прикладом є асинхронні електродвигуни змінного струму, швидкість обертання яких гнучко регулюється перетворювачами частоти із залученням алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Саме такі напівпровідникові вузли виступають головними винуватцями погіршення синусоїдальності напруги на збірних шинах підприємства. З інженерної точки зору, апаратна частина фільтра може розроблятися у двох варіаціях: із застосуванням розв'язувального трансформатора для гальванічної ізоляції, або ж за безтрансформаторною конфігурацією. Електронний компенсатор завжди приєднується паралельно до тих вузлів навантаження, що генерують струмові викривлення. Впровадження розділювального магнітопровода гарантує надійний захист електроніки та дозволяє точно узгодити класи напруг, проте цей крок неминуче призводить до відчутного збільшення масогабаритних показників шафи керування та здорожчання проекту загалом.

Алгоритмічна стратегія керування шунтувальними комплексами найчастіше спирається на концепцію прямого регулювання (Feed-forward control). Цей надзвичайно швидкий процес структурно розбивається на три ключові мікропроцесорні цикли:

1. Стадія збору даних (моніторинг): дискоточні вимірювальні датчики безперервно фіксують повну криву миттєвого струму споживача $i_L(t)$.

2. Математична фільтрація (цифрова обробка): сигнал передається на потужний DSP-контролер, де за допомогою спеціалізованих математичних перетворень (наприклад, теорії миттєвих потужностей) з повної кривої виокремлюється суто гармонійна складова струму $i_{Lh}(t)$. У загальному вигляді повний струм вузла можна описати наступним рівнянням:

$$i_L(t) = i_1(t) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{Lh}(t) + i_q(t)$$

де $i_1(t)$ – корисна активна компонента основної частоти; $i_q(t)$ – реактивна складова.

3. Генерація протифазного імпульсу (компенсація): мікроконтролер змушує IGBT-інвертор видавати в мережу інжекційний компенсуючий струм $i_{AF}(t)$, який за амплітудними значеннями повністю ідентичний паразитній складовій навантаження, проте дзеркально обернений за фазовим кутом. Відповідно, виконується жорстка умова:

$$i_{AF}(t) = -i_{Lh}(t)$$

Внаслідок фізичної суперпозиції струмів у точці паралельного підключення, вищі гармоніки взаємознищуються.

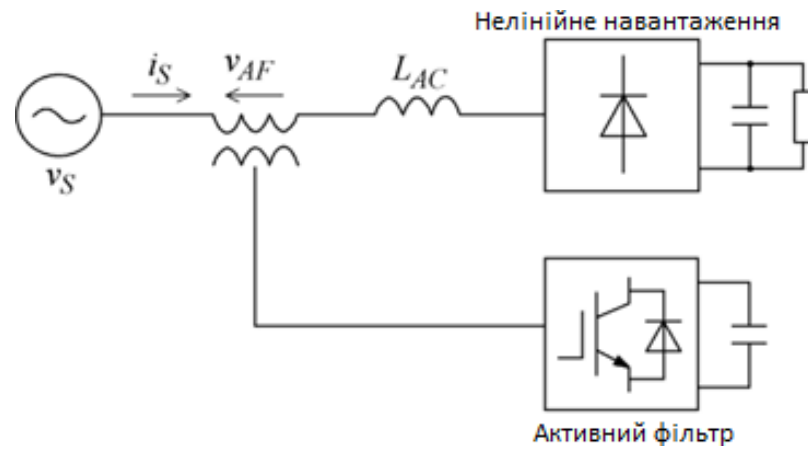


Рис. 7.4. Принципова схема інтеграції послідовного електронного фільтра в одно- та багатофазні мережі

У конфігураціях з послідовним підключенням критично важливим елементом виступає лінійний реактор (дросель змінного струму), змонтований перед вхідними клемми діодного випрямляча. Цей індуктивний компонент є абсолютно необхідним для обмеження швидкості наростання струмів та забезпечення загальної динамічної стійкості роботи всієї захисної установки. Кардинальною відмінністю такої топології від паралельної є використання замкнутої системи управління з глибоким негативним зворотним зв'язком. З фізичної точки зору, такий апарат функціонує як високодинамічне кероване джерело напруги.

Функціональний цикл роботи послідовного пристрою розбивається на такі технологічні кроки:

1. Вимірювання параметрів магістралі: Сенсорна апаратура сканує форму миттєвого струму i_s , що безпосередньо надходить від живильного центру (енергосистеми).
2. Спектральна декомпозиція: Шляхом залучення інноваційних обчислювальних алгоритмів виконується розкладання отриманого масиву, внаслідок чого з фіксованого струму мережі екстрагується небажана гармонійна компонента i_{sh}
3. Формування зустрічного потенціалу: Замість прямої інжекції струму, даний пристрій створює відповідну компенсаційну напругу U_{AF} , котра вводиться в

розрив фазної лінії через первинні обмотки вольтододаatkового узгоджувального трансформатора. Величина генерованої напруги математично пов'язана зі струмом завади через коефіцієнт зворотного зв'язку K :

$$U_{AF} = K \cdot i_{Sh}$$

При налаштуванні достатньо високого значення параметра K (еквівалентного опору), електронний блок починає діяти як нездоланий бар'єр виключно для вищих частот.

Описаний алгоритм взаємодії гарантує радикальне очищення струмової кривої джерела живлення від спектральних викривлень, фізично блокуючи їхнє поширення від нелінійного навантаження вглиб розподільної електромережі.

7.3. Схемотехнічні рішення трифазних інверторів із широтно-імпульсним керуванням на базі джерел струму та напруги

У практиці конструювання силової частини трифазних нормалізаторів якості електроенергії домінують два фундаментальні підходи до побудови перетворювального каскаду. Першою базовою конфігурацією виступає автономний інвертор напруги (АІН) з ШІМ-керуванням, характерною ознакою якого є наявність ємнісного накопичувача (потужної конденсаторної батареї) у ланці постійного струму. Ця топологія схематично проілюстрована на рисунку 7.5 (а). Другою, альтернативною концепцією є використання ШІМ-інвертора струму (АІС), де роль буферного накопичувального елемента відіграє масивний згладжувальний реактор (дросель), що підтримує неперервність струмового потоку (подано на рисунку 7.5 (б)).

Аналізуючи апаратну структуру обох перелічених конфігурацій, можна легко помітити їхню майже повну візуальну та компонентну ідентичність із класичними транзисторними перетворювачами, які масово впроваджуються для частотного регулювання обертів асинхронних електродвигунів. Втім, незважаючи на

зовнішню морфологічну схожість, їхнє цільове призначення та динамічні режими експлуатації кардинально різняться. Якщо стандартний промисловий електропривід формує на своїх клеммах ідеальну гладку синусоїду з регульованою частотою та амплітудою для плавного обертання вала, то електронні фільтрувальні комплекси змушені працювати у жорсткому режимі надшвидкісних генераторів специфічних несинусоїдальних сигналів. Вони мають за лічені мікросекунди відпрацьовувати складні струмові траєкторії, що містять глибокий спектр вищих гармонік, аби дзеркально нейтралізувати завади від нелінійного навантаження.

Для глибшого розуміння фізики процесів необхідно розглянути енергетичні характеристики цих двох топологій. У системі з джерелом напруги (АІН), конденсатор виконує роль резервуара енергії, що жорстко стабілізує потенціал U_{dc} на входах інверторного моста. Обсяг запасеної електростатичної енергії W_C у ланці постійного струму описується класичною залежністю:

$$W_C = \frac{C \cdot U_{dc}^2}{2}$$

де C – еквівалентна ємність конденсаторної збірки. Важливою умовою для коректної інжекції компенсуючого струму назад у розподільну мережу є те, що напруга на конденсаторі повинна обов'язково перевищувати амплітудне значення лінійної напруги мережі. З урахуванням необхідного динамічного запасу на регулювання (збільшеного на 5 % для гарантованого уникнення перемодуляції), мінімально допустимий рівень розраховується як:

$$U_{dc} \geq 1,05 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{line}$$

На противагу ємнісним системам, у топології джерела струму (АІС) акумулювання енергії відбувається виключно в електромагнітному полі індуктивності L . Згладжувальний реактор підтримує заданий рівень постійного струму I_{dc} , а кінетична енергія магнітного поля W_L визначається за виразом:

						Ар.
						59

$$W_L = \frac{L \cdot I_{dc}^2}{2}$$

Сучасна індустріальна статистика свідчить, що архітектура на базі джерела напруги отримала тотальну перевагу на ринку. Це пояснюється низкою об'єктивних інженерних факторів: плівкові конденсатори є в рази компактнішими, дешевшими та мають суттєво менші питомі теплові втрати (вищий ККД) порівняно з громіздкими мідними обмотками дроселів. Крім того, силові IGBT-модулі ідеально пристосовані саме для комутації напруги, оскільки мають вбудовані зустрічно-паралельні діоди зворотного струму. Водночас для побудови схем АІС потрібні спеціалізовані напівпровідникові кристали з високою зворотною блокувальною здатністю (або додавання послідовних високовольтних діодів, що подвоює теплові втрати провідності).

Створення керуючих імпульсів для транзисторних ключів у сучасних АІН найчастіше реалізується за допомогою передових алгоритмів просторової векторної модуляції (SVPWM). Ця математична модель дозволяє на 15 % ефективніше використовувати доступну напругу DC-шини та суттєво мінімізувати кількість паразитних перемикачів вентилів, що є вкрай критичним параметром для зниження комутаційного нагріву радіаторів при генерації високочастотних компенсаційних струмів.

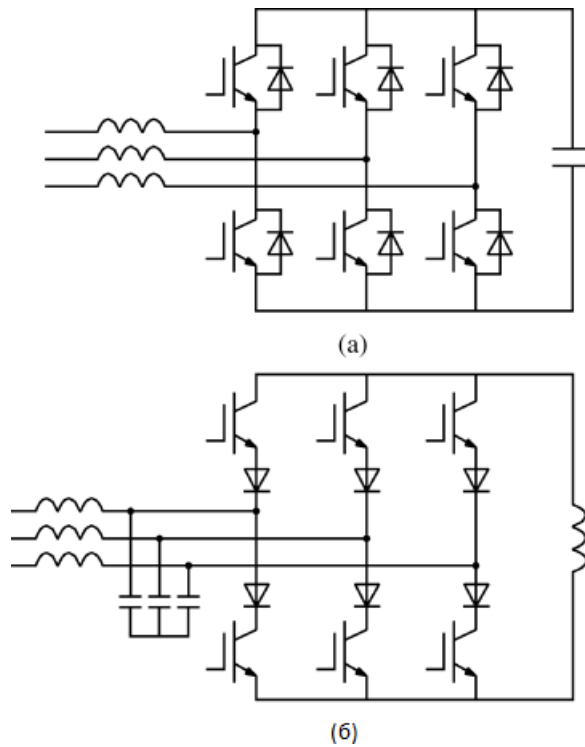


Рис. 7.5. Базові топології перетворювальних блоків для трифазних активних нормалізаторів мережі:

(а) Архітектура ШІМ-інвертора на основі джерела напруги (із застосуванням ємнісного буфера); (б) Конфігурація ШІМ-інвертора на базі джерела струму (з використанням індуктивного накопичувача).

7.4. Базова архітектура та принципи керування трифазними паралельними активними фільтрами

На рисунку 7.6 наочно відображено повну принципову схемотехнічну конфігурацію типового трифазного активного нормалізатора паралельного (шунтувального) типу.

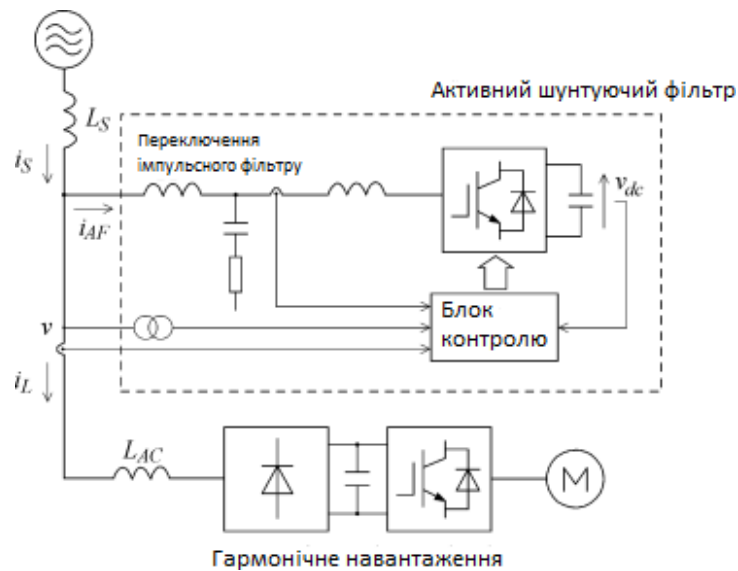


Рис. 7.6. Розгорнута структурно-функціональна схема трифазного паралельного активного компенсатора та його мікропроцесорного ядра управління.

З апаратної точки зору, представлена захисна установка структурно розмежовується на три фундаментальні вузли:

1. Силовий перетворювач: класичний трифазний інвертор (АІН) з ШІМ-модуляцією, який використовує масивну ємнісну збірку в ролі джерела постійної напруги (DC-ланки).

2. Пасивний високочастотний фільтр (LC-ланка): цей невеликий контур (встановлений між інвертором та мережею) критично необхідний для того, щоб згладжувати круті фронти напруги та відсікати високочастотні "голки", котрі генеруються самими транзисторними ключами під час їх швидкісних комутацій.

3. Обчислювальний центр (система керування): це мозок фільтра, обчислювальне ядро якого зазвичай будується на спеціалізованих високошвидкісних цифрових сигнальних мікропроцесорах (DSP) або ПЛІС. Для узгодження сигналів перед АЦП використовуються прецизійні операційні підсилювачі. Безпосередній збір фізичних параметрів енергосистеми (струмів і напруг) здійснюється за допомогою гальванічно розв'язаних сенсорів, що функціонують на основі ефекту Холла.

Що стосується алгоритмічного забезпечення трифазних нормалізаторів, то для швидкого і точного виокремлення гармонійних завад (так званого опорного сигналу струму) інженери переважно спираються на два потужних математичних апарати.

Перший метод – це класична теорія миттєвих активних і реактивних потужностей (відома як $p-q$ теорія), запропонована Х. Акагі у 1983 році. Для її реалізації мікроконтролер повинен одночасно отримувати дані як про струми навантаження, так і про миттєві значення фазних напруг (що і відображено лініями зворотного зв'язку на рис. 7.6). Математично цей процес починається з перетворення Кларка (перехід від трифазної системи $a - b - c$ до двофазної ортогональної системи $\alpha - \beta$):

$$\begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

де x позначає вектор напруг або струмів. Наступним кроком обчислюються миттєві потужності, з яких цифрові фільтри високих частот вилучають пульсуючі (змінні) складові $\tilde{p}$ та $\tilde{q}$, котрі і є математичним еквівалентом вищих гармонік струму.

Другий підхід базується на методі синхронно-обертової системи координат ($d-q$ перетворення). Головна перевага цієї методики полягає в тому, що струми основної частоти (50 Гц) після перетворення Парка-Горєва перетворюються на константи (постійні величини), тоді як вищі гармоніки продовжують коливатися. Це дозволяє легко відділити їх за допомогою найпростіших цифрових фільтрів. Проте, цей метод вимагає жорсткої синхронізації з кутом вектора напруги мережі, тому в структуру управління обов'язково інтегрується блок фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ або PLL - Phase-Locked Loop).

У 1988 та 1990 роках провідні електротехнічні лабораторії світу запатентували низку інноваційних концепцій так званих гібридних фільтрів. Їх створення було продиктовано бажанням об'єднати надійність традиційних

резонансних контурів із гнучкістю транзисторної техніки, тим самим здешевивши встановлену потужність силової електроніки. На рисунках 7.7 та 7.8 наведено ключові схемотехнічні рішення цих комбінованих установок.

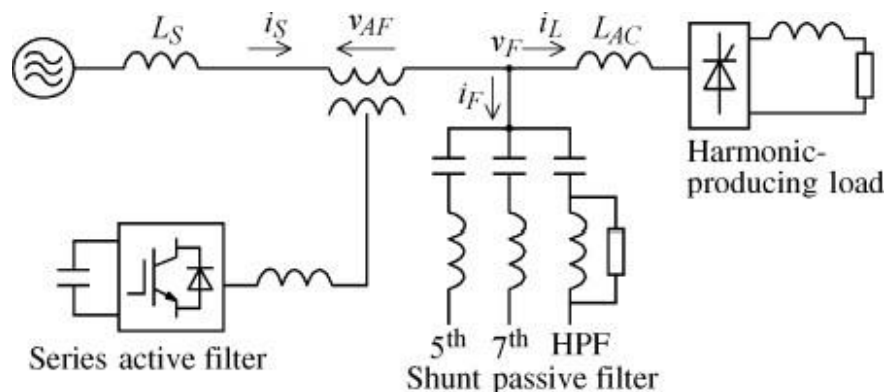


Рис. 7.7. Схемотехнічна топологія, що поєднує послідовно включений електронний компенсатор із класичним шунтувальним LC-фільтром.

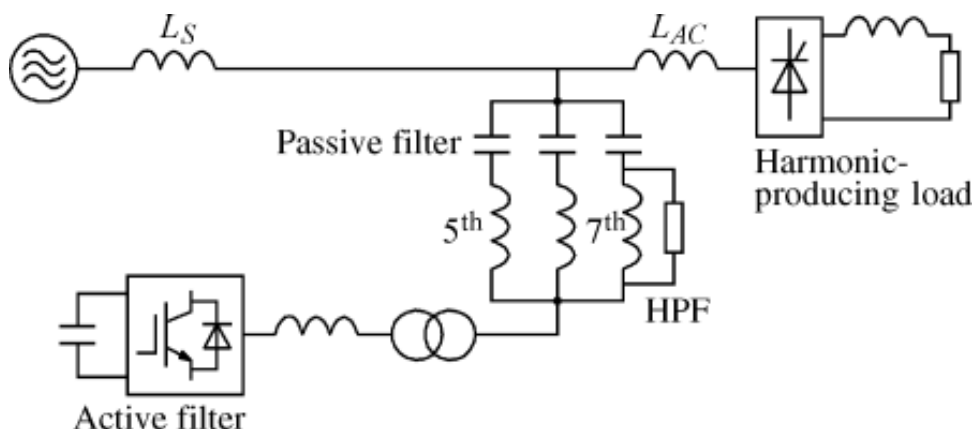


Рис. 7.8. Архітектура послідовного каскадного з'єднання активного транзисторного інвертора та пасивної резонансної ланки.

Візуалізація динамічних процесів, що відображена на графічних ілюстраціях 7.9–7.11, репрезентує масив емпіричних осцилограм, знятих у процесі лабораторної апробації комбінованої фільтрокомпенсуючої установки. Структурна топологія тестового стенда повністю відповідала архітектурі, наведеній раніше. У ролі еталонного генератора нелінійних завад використовувався класичний шеститактний вентильний перетворювач на базі керованих тиристорів, до якого на стороні випрямленого струму підключався масивний індуктивний реактор (для згладжування пульсацій струму навантаження). Згідно з паспортними даними обладнання, номінальна лінійна напруга живлення становила 200 В, повна розрахункова потужність комплексу досягала 20 кВА, а базова частота мережі дорівнювала стандартним 50 Гц.

З теоретичної точки зору, такий тип перетворювача генерує в мережу канонічний спектр гармонік, порядковий номер яких h підпорядковується закономірності $h = 6k \pm 1$ (де k – натуральне число). Відповідно, амплітуда кожної гармонійної складової струму I_h обернено пропорційна її номеру:

$$I_h \approx \frac{I_1}{h}$$

П'ятиканальний осцилографічний запис одночасно фіксував ключові енергетичні параметри системи:

- u_F – миттєве падіння напруги на входних терміналах паралельного LC-контуру;
- i_S – крива струму, що безпосередньо споживається від живильного трансформатора;
- i_F – струм, який протікає через пасивні шунтувальні ланцюги;
- i_L – загальний нелінійний струм, що споживається тиристорним мостом;
- u_{AF} – напруга, яку генерує послідовний напівпровідниковий інвертор (вимірювання проводилося на первинній обмотці вольтододаatkового трансформатора).

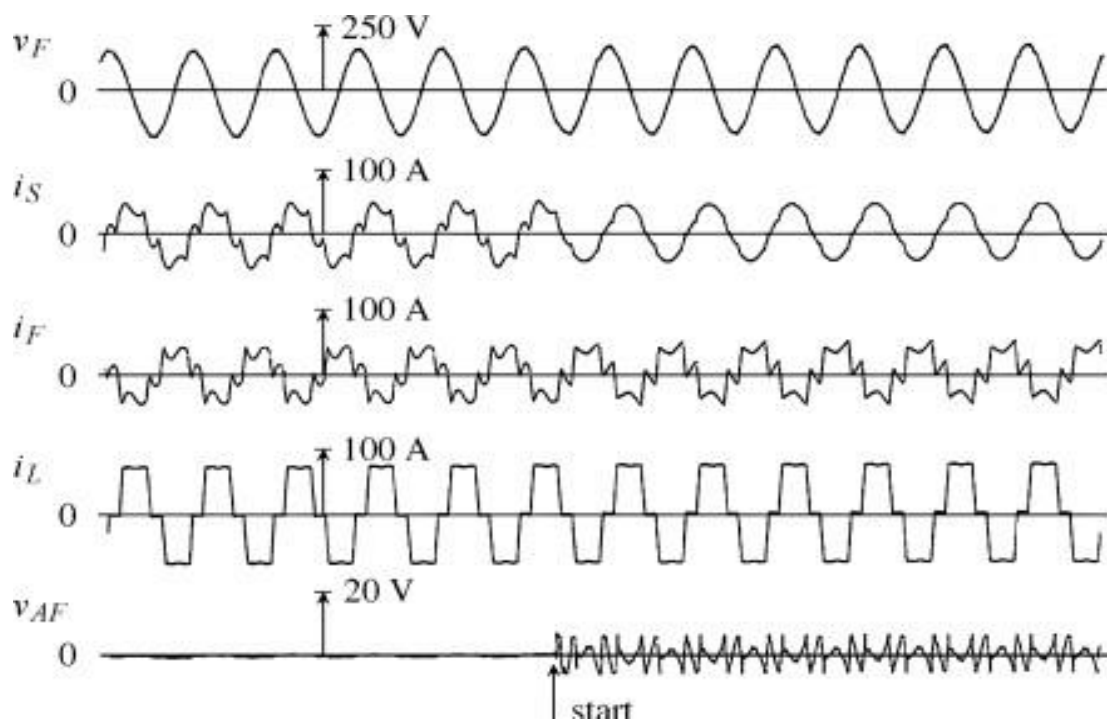


Рис. 7.9. Емпіричні часові діаграми електромагнітних перехідних процесів у момент запуску транзисторного модуля послідовної компенсації (для еквівалентного опору магістралі $L_S = 2,1\%$).

Аналіз рисунка 7.9 дає змогу оцінити ефективність роботи обладнання при відносно «жорсткій» мережі, де відносний індуктивний опір живильної магістралі становив $L_S = 2,1\%$. На початковому етапі експерименту (до подачі керуючих імпульсів на активний модуль) пасивний контур працював самостійно. З осцилограм чітко видно, що вхідний струм i_S залишався суттєво викривленим. Це пояснюється фізичним законом ділення струмів: завади розподіляються між живильною мережею та фільтром обернено пропорційно їхнім комплексним опорам. Оскільки опір магістралі Z_S був малим, значна частина вищих гармонік проникала у джерело живлення:

$$I_{sh} = I_{Lh} \frac{\underline{Z}_F}{\underline{Z}_F + \underline{Z}_S}$$

У момент програмної активації активного фільтра, він почав функціонувати як керований віртуальний опір K для високочастотних складових. Завдяки введенню додаткової протиЕРС, еквівалентний опір гілки джерела різко зріс ($Z_S + K$), що примусово перенаправило весь спектр завад у пасивний контур. Як наслідок, струм живлення i_S практично миттєво набув ідеальної синусоїдальної форми.

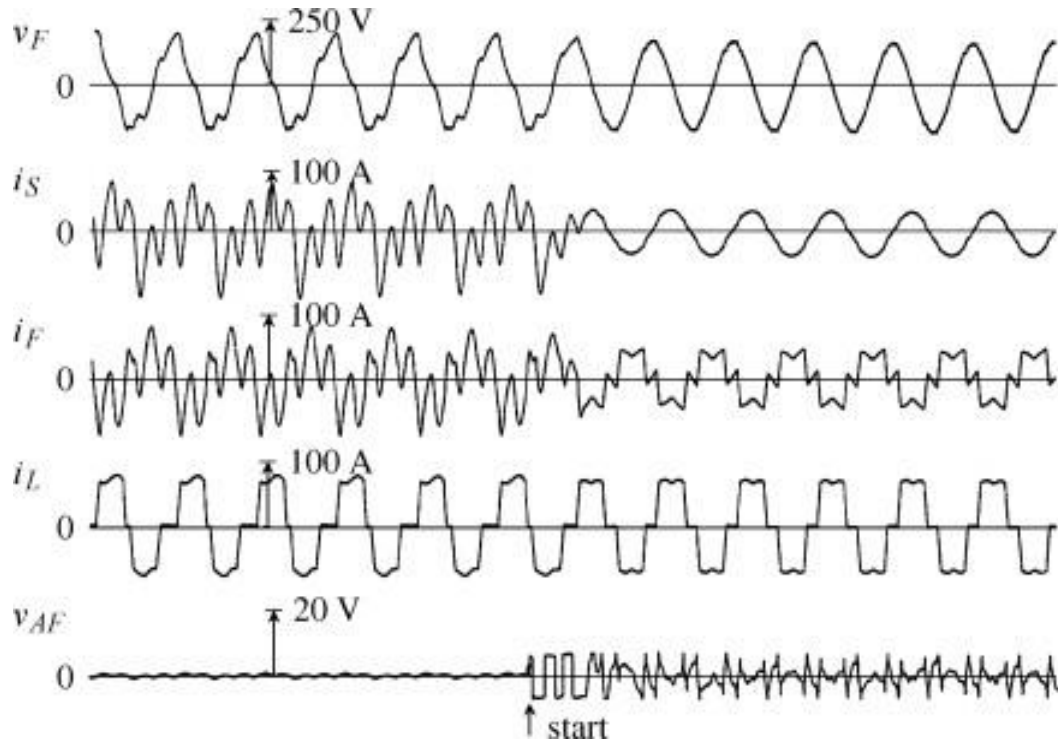


Рис. 7.10. Зафіксовані результати лабораторних випробувань для енергосистеми з підвищеною лінійною індуктивністю ($L_S = 5,8\%$).

Картина радикально змінюється на рисунку 7.10, де моделювалася ситуація «м'якої» мережі з підвищеною індуктивністю ($L_S = 5,8\%$). До включення інверторного блока спостерігалось небезпечне явище паралельного резонансу струмів. Власна резонансна частота контуру f_{res} , утвореного індуктивністю мережі та ємністю пасивного фільтра, обчислюється за формулою Томпсона:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_F}}$$

У цьому досліді точка резонансу змістилася в зону четвертої гармоніки. Хоча ця парна компонента є неканонічною для шестипульсного випрямляча (виникає

лише через незначну асиметрію фаз або кутів керування тиристорами), резонансний контур багаторазово підсилює її амплітуду. Це призвело до критичних коливань у системі. Після активації мікропроцесорного керування, активний фільтр автоматично ввів у систему віртуальне демпфування (ефект активного опору для резонансної частоти), що призвело до повного і миттєвого придушення автоколивань.

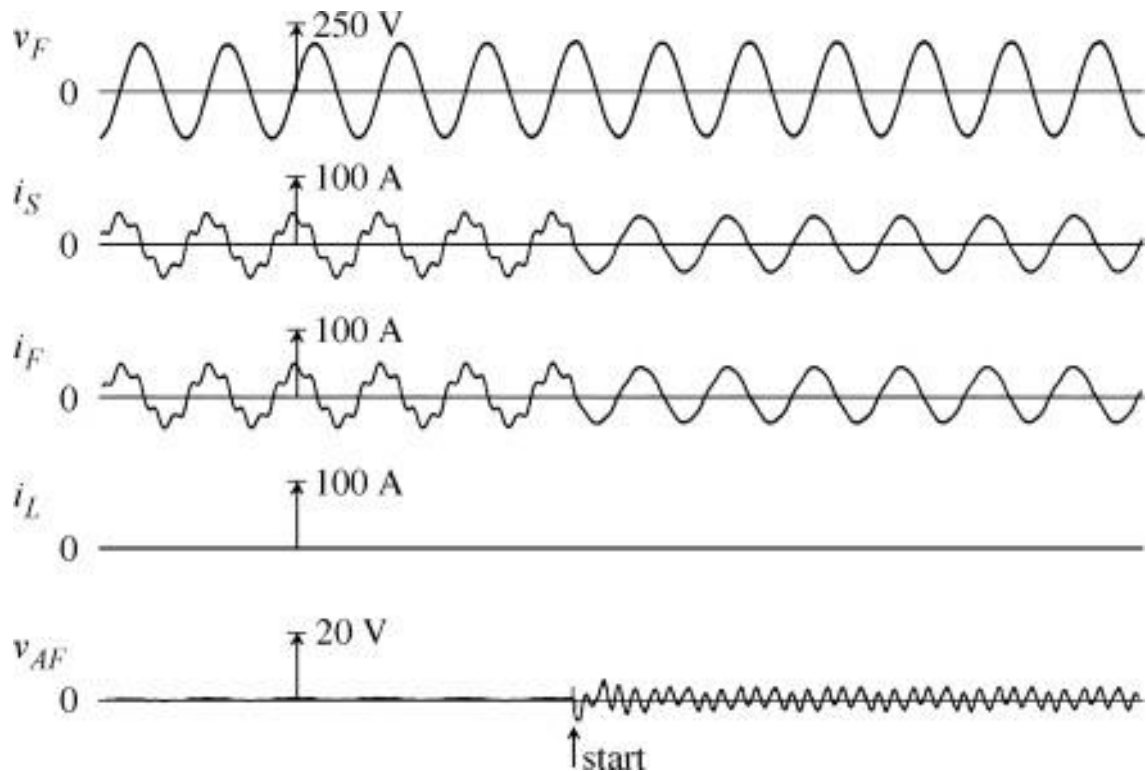


Рис. 7.11. Графіки натурних досліджень динаміки системи за відсутності корисного навантаження ($i_L = 0$ при $L_S = 2,1\%$).

Окремий науковий інтерес становить поведінка апаратного комплексу в режимі неробочого ходу (рис. 7.11), коли струм споживача дорівнював нулю. У реальних умовах промислова напруга завжди містить фонові викривлення U_{Sh} . Пасивний LC-фільтр, маючи мінімальний опір, починає працювати як "пилосос", вбираючи у себе гармонійні струми з усієї зовнішньої магістралі, що часто призводить до його теплового перевантаження та руйнування конденсаторів. Проте, одразу після включення послідовного активного модуля, генерація зустрічної компенсуючої напруги u_{AF} створила нездоланий бар'єр. Перетікання

високочастотних струмів через LC-ланцюги повністю зупинилося, а напруга u_F очистилася від спотворень.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що гібридна топологія демонструє виняткову технологічну гнучкість та ефективність. Тим не менш, її широке ринкове впровадження наразі гальмується низкою вагомих факторів. Відмова від використання розділювального магнітопровода (трансформатора) вимагає впровадження надзвичайно складних алгоритмів захисту силових IGBT-модулів від наскрізних струмів короткого замикання. Додатковою перепорою є громіздка конструкція самої пасивної складової, параметри якої схильні до температурного дрейфу та старіння діелектрика, що вимагає регулярного технічного обслуговування.

7.5. Низьковольтні гібридні фільтрувальні комплекси без використання розділювальних трансформаторів

Сучасні електромеханічні системи з гнучким регулюванням частоти обертання, які проектуються на базі широтно-імпульсних перетворювачів напруги з використанням потужних IGBT-модулів, сьогодні стали стандартом де-факто у промисловому секторі, побутовій техніці та на електрифікованому транспорті. Зважаючи на той факт, що лєвова частка інверторних електроприводів не вимагає надвисокої динаміки реагування на зміну швидкості або здатності повертати кінетичну енергію назад у мережу (режиму рекуперативного гальмування), застосування дорогих транзисторних ШІМ-випрямлячів на вході є економічно та технічно недоцільним. Саме тому найчастіше в ролі первинного вхідного каскаду для інвертора застосовують класичний трифазний некерований діодний міст.

Цей силовий вузол відзначається максимальною надійністю, гранично низькими експлуатаційними витратами та суттєво вищим коефіцієнтом корисної дії порівняно з керованими аналогами під час роботи в електромережах низької та середньої напруги. Втім, зворотним боком медалі є масивна емісія вищих гармонік струму, які генеруються вентилями в процесі комутації. Спектральний склад цих

						Ар.
						69

спотворень грубо порушує жорсткі вимоги діючих міжнародних стандартів щодо електромагнітної сумісності та якості живлення.

У даному підрозділі здійснюється глибокий аналіз економічно вигідної гібридної активної фільтрувальної установки, яка приєднується безпосередньо (за безтрансформаторною топологією), а також наводиться зіставлення її ключових робочих показників із характеристиками суто електронних (чистих) нормалізаторів струму.

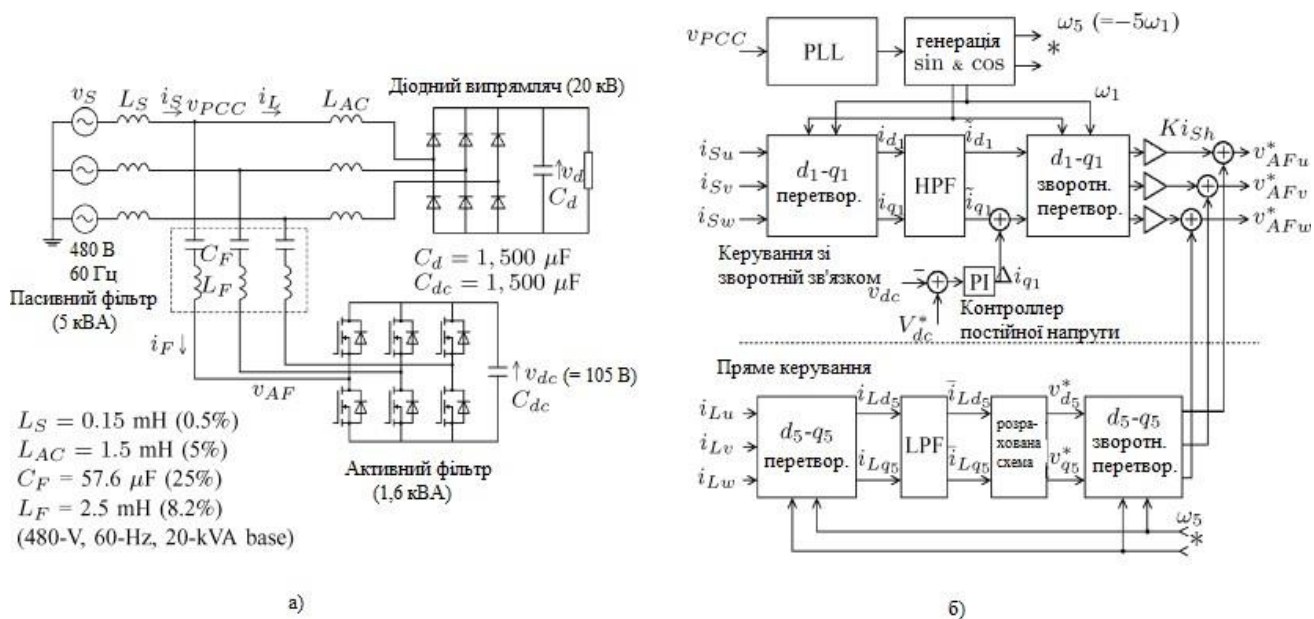


Рис. 7.12. Архітектура та алгоритмічна структура комбінованого фільтра для мереж 480 В.

(а) Принципова електрична схема силової частини. (б) Блок-схема мікропроцесорної системи регулювання.

Електрична схема, проілюстрована на рисунку 7.12(а), розкриває топологічну конфігурацію гібридного компенсатора, що паралельно шунтує трифазний діодний випрямний блок. Номінальна робоча напруга живильного фідера дорівнює 480 В, тоді як споживана активна потужність нелінійного навантаження досягає 20 кВт. Ключова технологічна особливість даного інженерного рішення полягає у прямому підключенні обладнання до шин

розподільного пристрою промислового підприємства, оминаючи необхідність встановлення дорогого узгоджувального трансформатора.

Головна функціональна мета цієї установки зводиться до радикального зменшення загального коефіцієнта гармонійних викривлень струму джерела живлення (THD_I) до нормативних значень (нижче 5 %). Апаратна реалізація гібрида передбачає наявність транзисторного ШІМ-інвертора напруги з номінальною потужністю 1,60 кВА, котрий функціонує з частотою комутації носійного сигналу 10 кГц, та масивного пасивного резонансного контуру з розрахунковою потужністю 5 кВА. Ця пасивна ланка сконструйована як класичний одноконтурний фільтр, що прецизійно налаштований на захоплення сьомої гармоніки. Її якісний показник (добротність контуру Q) математично описується співвідношенням хвильового опору до активних втрат R_F , і в даній системі становить:

$$Q = \frac{1}{R_F} \sqrt{\frac{L_F}{C_F}} \approx 27,2$$

Слід зауважити, що ізольований пасивний модуль демонструє надзвичайно низьку результативність очищення мережі в діапазоні інших низькочастотних гармонік спектру, окрім своєї власної резонансної частоти (відповідно, сьомої складової струму).

Активний напівпровідниковий інвертор та пасивна LC-ланка об'єднані між собою у суворій послідовній конфігурації. Подібна інноваційна архітектура дозволяє кардинально знизити необхідну напругу на конденсаторі ланки постійного струму (DC-шині) всього лише до 105 В. Це стає можливим завдяки тому, що пасивні ємності беруть на себе майже все падіння напруги фундаментальної частоти 50 Гц. На частку транзисторів залишається виключно динамічна компенсація високочастотних флуктуацій. Окрім того, зазначена комплексна топологія повністю знімає потребу у монтажі додаткових високочастотних фільтрів для згладжування імпульсних пульсацій від ШІМ.

						Ар.
						71

Існуючий пасивний контур володіє величезним індуктивним опором на несучій частоті близько 10 кГц, виступаючи надійним бар'єром для цих специфічних завад.

На вході діодного випрямляча обов'язково монтується лінійний мережевий реактор змінного струму з відносним індуктивним опором $L_{AC} \approx 5,2\%$. Впровадження цього елемента є критично необхідною умовою для гарантування стабільної та коректної роботи всієї гібридної збірки, особливо з огляду на повну відсутність згладжувального дроселя на стороні постійного струму діодного моста.

Алгоритмічна структура керуючого контролера системи, подана на рисунку 7.12(б), фізично реалізує три фундаментальні програмні блоки:

- математичний апарат керування із замкнутим зворотним зв'язком;
- модуль прямого (випереджувального) компенсаційного регулювання;
- контур стабілізації потенціалу в ланці постійного струму.

Функціонування алгоритму зворотного зв'язку гарантує, що абсолютно всі вищі гармоніки, які циркулюють у струмі i_F , примусово затягуватимуться в гібридний компенсатор. Одночасно створюється перешкода для проникнення будь-яких зовнішніх фонових завад із розподільної магістралі всередину фільтра. Завдяки такому підходу суттєво зростає загальний коефіцієнт корисної дії пасивної частини та повністю унеможлиблюється ризик її теплового пробою через струмові перевантаження.

Ще однією критичною перевагою є те, що цифровий зворотний зв'язок змушує активний інвертор імітувати поведінку ідеального демпфувального резистора R_{demp} для низькочастотних паразитних струмів. Еквівалентний комплексний опір системи $\underline{Z}_{eq}$ набуває вигляду:

$$\underline{Z}_{eq} = R_{demp} + j \left(\omega L_{AC} - \frac{1}{\omega C_F} \right)$$

Це штучне алгоритмічне введення активного опору (електронне демпфування) стовідсотково ліквідує ймовірність виникнення небезпечного гармонійного резонансу між реактивністю живильної лінії L_S та ємностями

фільтрувального контуру. Внаслідок цього, інженерам-проектувальникам подібних гібридних конфігурацій більше не потрібно виконувати громіздкі комп'ютерні симуляції для дослідження резонансної стійкості мережі на етапі введення комплексу в промислову експлуатацію.

Зі свого боку, контур випереджувального зв'язку надзвичайно швидко і точно перехоплює струм найбільш потужної п'ятої гармоніки безпосередньо з кривої навантаження i_L , направляючи його для утилізації у фільтрувальний тракт. Що стосується блоку контролю DC-напруги, то його наявність дозволяє напівпровідниковому перетворювачу автономно акумулювати енергію та стабільно підтримувати заданий потенціал на буферному конденсаторі без залучення жодних сторонніх джерел електроживлення. Виконання цього завдання традиційно доручається класичному пропорційно-інтегральному (ПІ) регулятору, математичний закон керування якого описується інтегро-диференціальним рівнянням:

$$U_{dc_reg}(t) = K_P \cdot \Delta U(t) + K_I \int_0^t \Delta U(\tau) d\tau$$

де $\Delta U(t)$ – миттєва розбіжність між еталонною та фактичною напругою постійного струму; K_P та K_I – пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення мікропроцесора, які тонко налаштовуються залежно від динамічних параметрів конкретної електроустановки.

7.6. Комплексне зіставлення та аналітична оцінка суто електронних і гібридних топологій нормалізації параметрів енергомережі

На рисунку 7.13 наочно продемонстровано базові архітектурні підходи до побудови систем ліквідації негативного впливу від споживачів із нелінійною вольт-амперною характеристикою.

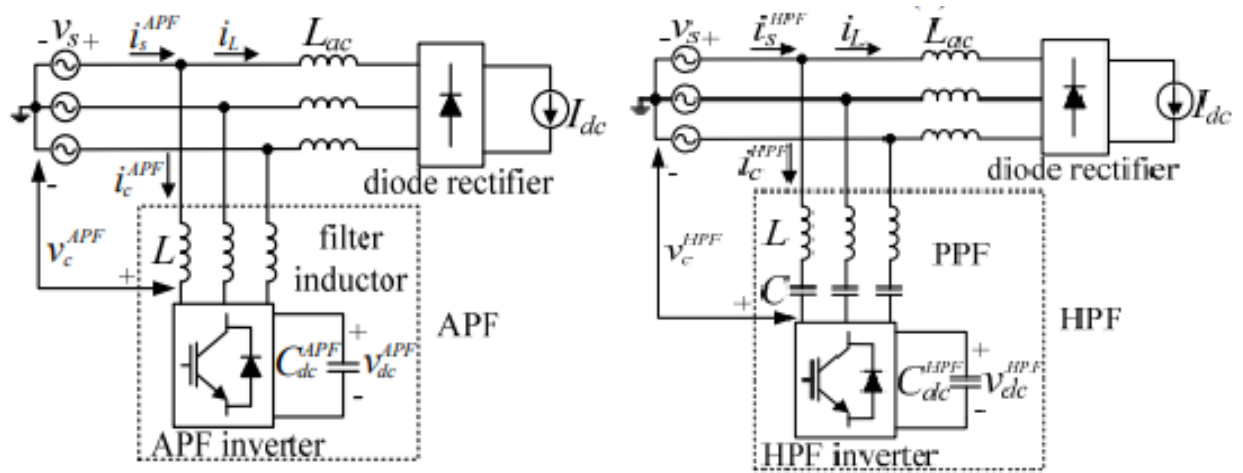


Рис. 7.13. Топологічні схеми апаратних комплексів покращення якості живлення:

- (а) Архітектура паралельного активного фільтрувального пристрою;
- (б) Структура комбінованого (гібридного) силового компенсатора.

З метою проведення максимально достовірного та науково обґрунтованого техніко-економічного зіставлення, обидва зазначені апаратні комплекси моделювалися за абсолютно однакових умов стану живильної магістралі та ідентичного профілю споживання. При цьому, для забезпечення чистоти експерименту та спрощення математичного апарату, внутрішні теплові втрати на провідність у напівпровідникових кристалах (IGBT-модулях), а також активний опір індуктивних компонентів R_L тимчасово ігнорувалися.

Надзвичайно важливим етапом дослідження є детальний розгляд фізичної природи струму, що споживається нелінійним навантаженням. Саме спектральний склад та динаміка зміни цього струму виступають головними чинниками, які диктують алгоритм функціонування транзисторних інверторів як у схемах АСФ (активних силових фільтрів), так і в структурах ГСФ (гібридних силових фільтрів). Промислове обладнання з нелінійним споживанням генерує потужний масив вищих гармонік, які безперешкодно проникають у розподільну мережу. Це спричиняє деградацію загальної якості електроенергії, перегрів кабельних ліній та збої в роботі чутливої мікропроцесорної техніки.

Графічні матеріали (рис. 7.14) детально розкривають еволюцію ключових енергетичних параметрів: миттєвої напруги живильного центру (v_s), кривої струму споживача (i_L) та результуючого мережевого струму (i_s), що формується після

впровадження систем АСФ або ГСФ. Принцип дії класичного активного пристрою ґрунтується на інжекції в лінію струмових імпульсів, які за модулем дорівнюють паразитним гармонікам навантаження, але математично зсунуті на кут π (перебувають у строгій протифазі).

Діаграма 7.14 (а) візуалізує фазовий взаємозв'язок між живильною напругою v_s та споживаним струмом i_L . Тут чітко виділено фундаментальну синусоїдальну компоненту i_{Lf} , а також позначено кут зсуву фаз φ , котрий визначає базовий коефіцієнт потужності об'єкта.

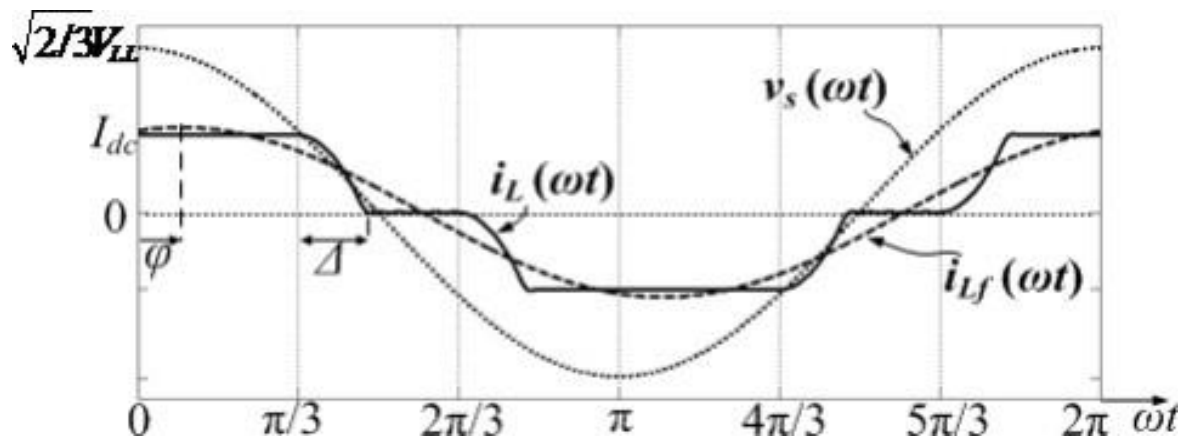


Рис. 7.14 (а). Часові діаграми фазної напруги живлення та спотвореного струму на вході некерованого діодного моста.

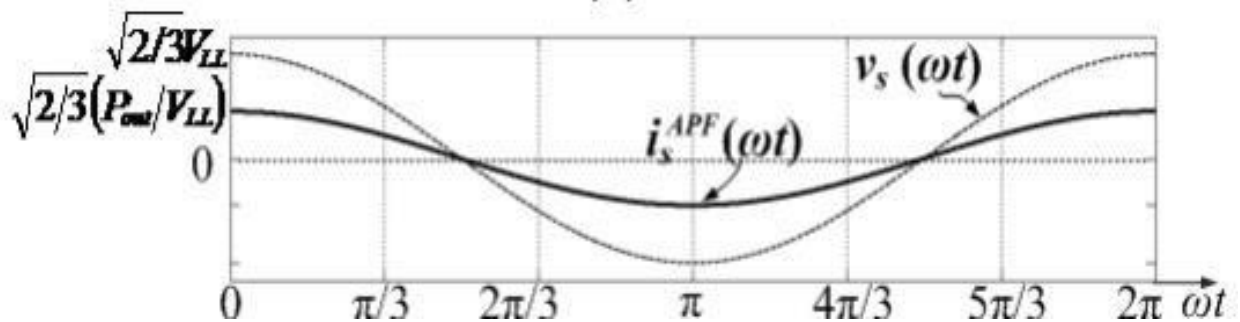


Рис. 7.14 (б). Характеристики мережевої напруги та результуючого струму магістралі при експлуатації АСФ.

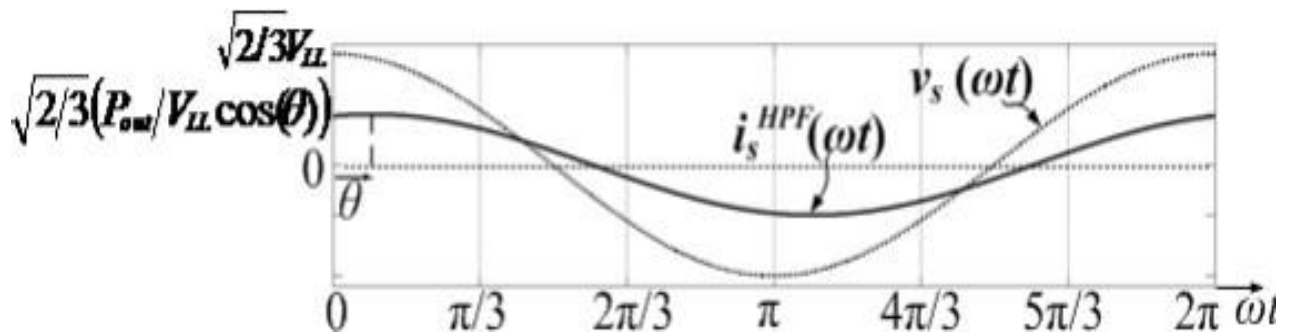


Рис. 7.14 (в). Епюри напруги та загального струму джерела за умови використання комбінованої системи ГСФ.

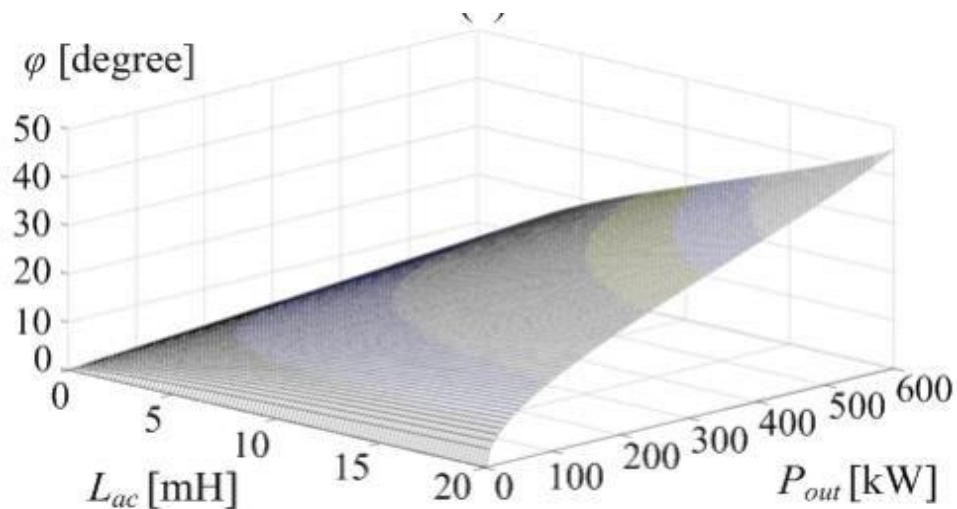


Рис. 7.14 (г). Залежність кута зсуву фундаментальної гармоніки від величини вхідного реактора L_{ac} та споживаної активної потужності P_{out} .

Крім того, наведено інтервал комутаційного перекриття вентилів Δ (який у реальних умовах зазвичай становить близько $4,8^\circ \div 5,2^\circ$ залежно від індуктивності мережі). Математично струм основної частоти можна наближено описати залежністю:

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \cos\left(\frac{\Delta}{2}\right)$$

Розглядаючи осцилограму 7.14 (б), можна впевнено констатувати, що мережевий струм i_s у режимі повноцінної компенсації (при використанні АСФ) збігається за фазою з напругою. Це означає досягнення ідеального (одиничного)

коефіцієнта потужності $\cos \varphi = 1,0$. Такий феномен пояснюється тим, що мікропроцесорна система активного фільтра розраховує еталонний сигнал не лише для ліквідації вищих гармонік, але й для повної компенсації реактивної енергії фундаментальної частоти.

Натомість ситуація з гібридною топологією, проілюстрована на рис. 7.14 (в), демонструє появу залишкового кутового зміщення θ між струмом джерела i_s та напругою v_s . Справа в тому, що у складі ГСФ за компенсацію базової реактивної потужності відповідає виключно масивна пасивна LC-ланка. Вона генерує жорстко фіксований обсяг ємнісного струму (наприклад, проектується із запасом $Q_C \approx 1,048 \cdot Q_{L(nom)}$). Якщо фактичне реактивне навантаження підприємства відхиляється від цього розрахункового значення, гібридний комплекс не здатен гнучко усунути цю різницю, що і призводить до відхилення загального $\cos \theta$ від одиниці.

Слід також зазначити, що явища комутації вентилів випрямляча, показані на графіку 7.14 (а), супроводжуються характерними провалами напруги (так званими комутаційними зубцями). Це об'єктивний наслідок наявності кінцевого індуктивного опору L_{ac} на ділянці між джерелом та споживачем.

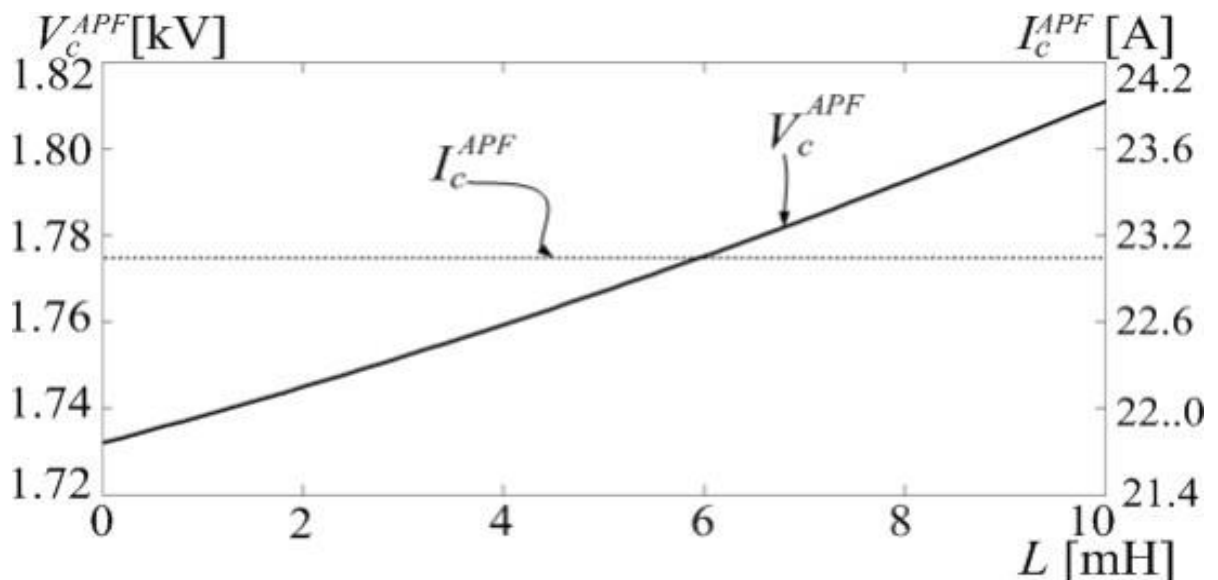
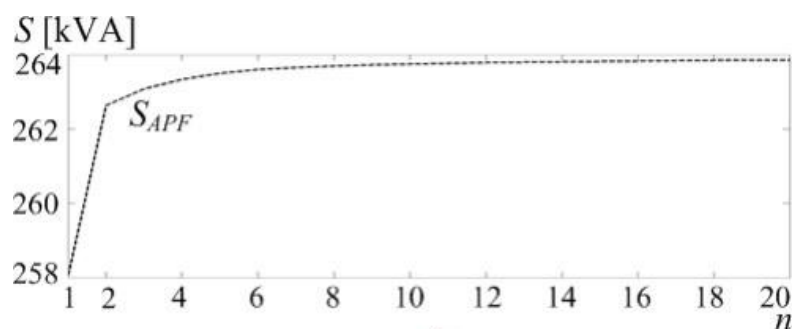
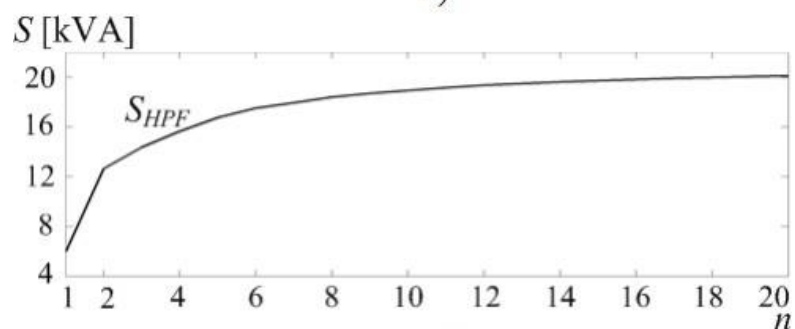


Рис. 7.15. Динаміка зміни діючих значень струмів і напруг силового інвертора АСФ залежно від параметрів узгоджувального дроселя L .

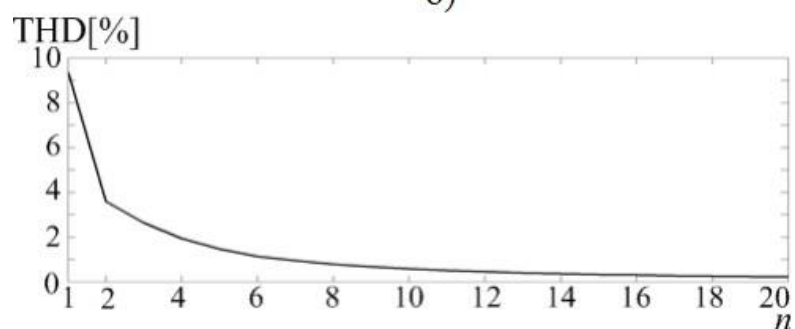
У поточній секції виконується глибокий порівняльний аудит встановлених потужностей та номіналів електронних компонентів для обох топологій. Аналіз спирається на такі змінні: порядок придушеної гармоніки n , значення лінійної індуктивності дроселя випрямляча L_{ac} , рівень споживаної потужності P_{out} та параметри вихідного реактора фільтра L . Як вже зазначалося, оскільки комерційні моделі ГСФ оснащуються пасивними конденсаторними батареями незмінної ємності, динамічно підтримувати одиничний $\cos\theta$ у всьому діапазоні зміни навантажень фізично неможливо. Тоді як сучасний повністю транзисторний АСФ здатний гарантувати ідеальну компенсацію ($PF = 1$) безперервно, адаптуючись до будь-яких стрибків струму за мікросекунди.



а)

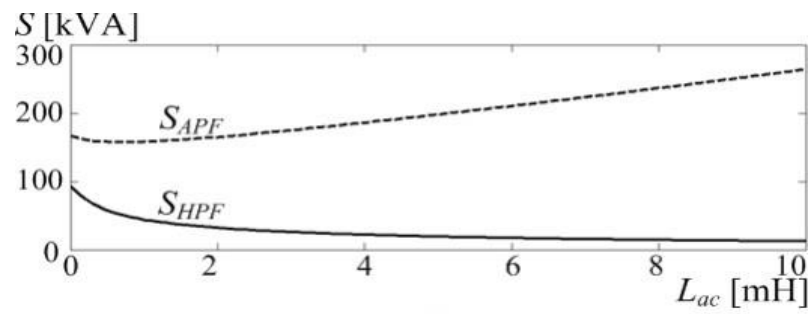


б)

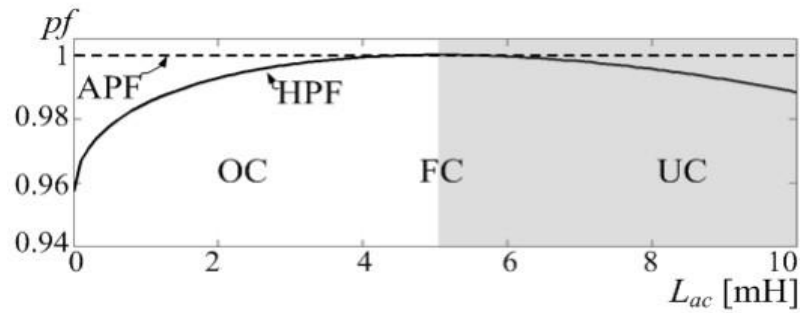


в)

Рис. 7.16. Оціночні масогабаритні показники інверторних модулів (а, б) та графіки зміни сумарного коефіцієнта гармонік THD залежно від частоти налаштування n (в).

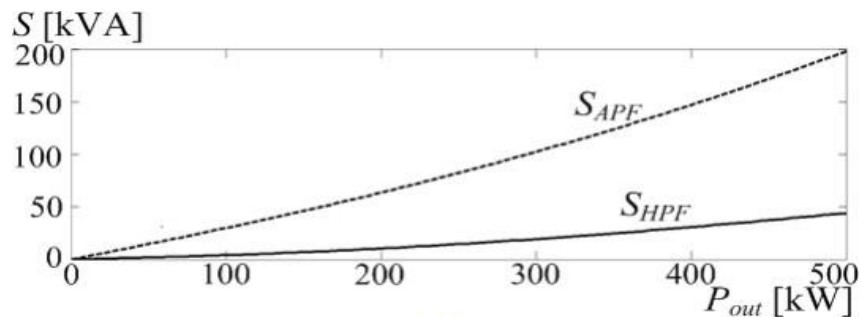


a)

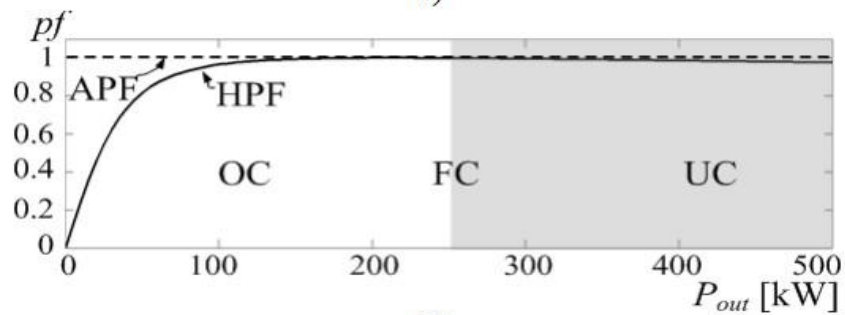


б)

Рис. 7.17. Аналіз розрахункових значень напівпровідникового перетворювача (а) та поведінка сумарного коефіцієнта потужності залежно від вхідної реактивності L_{ac} (б).



a)



б)

Рис. 7.18. Теоретичні параметри інверторних стійок (а) та зміна загального коефіцієнта потужності відносно індуктивності зв'язку L (б).

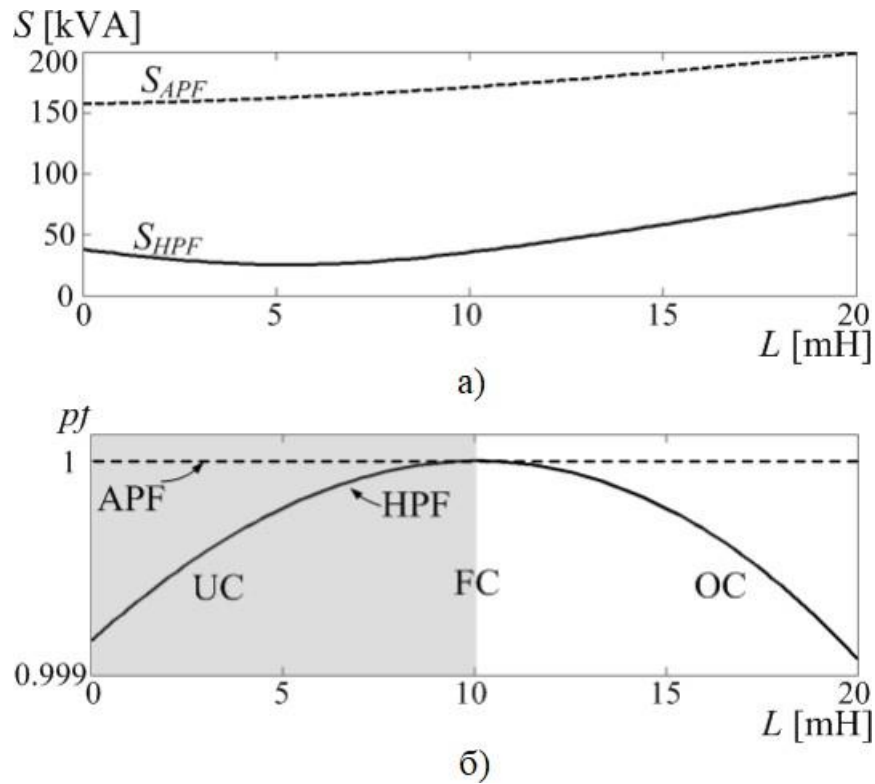


Рис. 7.19. Зведені енергетичні характеристики перетворювачів (а) та флуктуації коефіцієнта потужності як функція від параметра L (б).

Важливим інженерним нюансом є те, що величина вихідного узгоджувального реактора L практично не погіршує результуючий коефіцієнт потужності на входних клеммах підприємства у випадку впровадження комбінованої топології ГСФ. Однак, на етапі проектування фізичних установок, індуктивність L повинна бути жорстко лімітована. Її завищення становить загрозу для динамічної стійкості цифрової системи керування.

З точки зору електротехніки, швидкість наростання компенсаційного струму $\frac{di_c}{dt}$ лімітується саме цим дроселем:

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{V_{dc} - v_s}{L}$$

Якщо індуктивність L буде занадто великою, мікроконтролер не встигатиме відслідковувати високочастотні гармоніки. Щоб подолати цей бар'єр, доведеться штучно завищувати рівень напруги на DC-шині V_{dc} (що суттєво здорожчує

конденсатори та транзистори) або ж миритися з критичним падінням частоти комутації ключів. Обидва компроміси неминуче призводять до різкого погіршення кінцевого коефіцієнта нелінійних викривлень (THD) та зниження ефективності очищення мережі.

						Ар.
						81

ВИСНОВКИ

Представлений науково-практичний проєкт фокусується на розробці інтегрованої схеми енергозабезпечення заводу, який випускає силові перетворювальні апарати.

Під час реалізації завдань було здійснено глибоку оцінку експлуатаційних потреб об'єкта. Вона охоплювала обчислення сумарних номіналів для різноманітних груп струмоприймачів. Значний акцент робився на моделюванні добових кривих попиту на електрику, особливо враховуючи специфіку змінної роботи персоналу та години максимальної інтенсивності технологічних процесів у цехах.

Ключовим етапом виявилось вивчення методів нівелювання неактивної складової струму. Промислові гіганти такого профілю традиційно споживають величезні обсяги "некорисної" енергії. Це зумовлено масовою експлуатацією важких приводних механізмів, а також спеціальних високотемпературних агрегатів, необхідних для термічної підготовки металевих деталей магнітопроводів.

Окрім штатного режиму, ретельно змодельовано потенційні аварійні ситуації всередині локальної мережі. Завдяки точному обчисленню струмів КЗ (короткого замикання) на всіх ступенях трансформації, вдалося безпомилково підібрати сучасні пристрої мікропроцесорної автоматики та відповідні захисні вузли.

Запропонована архітектура повністю задовольняє актуальні нормативи щодо раціонального використання ресурсів та збереження довкілля. Цей аспект є надзвичайно критичним для представників сектору важкої індустрії. Додатково проєктом передбачається глибока інтеграція цехових підстанцій у централізовану систему диспетчерського управління (SCADA), що дозволяє мінімізувати технологічні втрати.

						Ар.
						82

Водночас застосування розподільчих пристроїв нового покоління та сухих трансформаторів для власних потреб підприємства гарантує найвищий рівень пожежної безпеки, а також суттєво зменшує загальний вуглецевий слід від діяльності майданчика.

						Ар.
						83

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.