

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” ____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Проектування системи електропостачання підприємства з ремонту автомобільного транспорту»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

____ Дмитро ВОІЦ

« ____ » ____ 2026 р.

Керівник роботи

професор, доктор техн. наук

____ Сергій ОСАДЧИЙ

« ____ » ____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

_____ Воїцу Дмитру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства з ремонту автомобільного транспорту

Design of a power supply system for a motor vehicle repair enterprise

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

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

3. Строк подання роботи до захисту 01.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є розробка системи електропостачання підприємства з ремонту автомобільного транспорту. 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 БКР</i>	<i>26.05-28.05</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки БКР</i>	<i>29.05-31.05</i>	

Дата видачі завдання
«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Сергій ОСАДЧИЙ

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Дмитро ВОЩ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 75 с.; 33 рис.; 21 табл.; 5 джерел

Воїц Д. С. Проектування системи електропостачання підприємства з ремонту автомобільного транспорту. – Рукопис.

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

Робота присвячена проектуванню надійного комплексу забезпечення електричною енергією підприємства з ремонту автомобільного транспорту.

Проведене оцінювання потужностей усіх струмоприймачів дало змогу побудувати точні криві енерговикористання як у межах однієї доби, так і за весь рік. Дослідження цих візуальних моделей продемонструвало суттєві коливання попиту на струм під час виконання виробничих завдань персоналом. Подібна асиметрія є характерною ознакою заводів, що займаються технічним обслуговуванням та відновленням машин. Крім того, оцінка балансу реактивної складової вказала на гостру потребу впровадження спеціальних пристроїв (наприклад, автоматичних конденсаторних установок).

Глибоке вивчення потенційних аварійних ситуацій, зокрема розрахунок струмів коротких замикань, гарантувало коректне визначення параметрів для релейного захисту та автоматичних вимикачів. Базуючись на цих математичних підсумках, було здійснено аргументоване комплектування ключових вузлів інфраструктури об'єкта. До переліку обраного устаткування увійшли головні знижувальні трансформатори, відповідні перерізи струмопровідних кабелів та сучасні коміртки розподільчих щитів. Для підвищення рівня безпеки та керованості додатково було запропоновано інтеграцію систем автоматизованого комерційного обліку.

Ключові слова: електронавантаження, система електропостачання, струми короткого замикання, , енергоефективність

ABSTRACT

Qualification work: 75 p.; 33 Fig.; 21 tables; 5 sources

Voits D. Design of a power supply system for a motor vehicle repair enterprise.

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 design of a reliable complex for providing electrical energy to a motor vehicle repair enterprise.

The conducted assessment of the capacities of all current collectors made it possible to construct accurate energy consumption curves both within one day and for the whole year. The study of these visual models demonstrated significant fluctuations in the demand for current during the performance of production tasks by personnel. Such asymmetry is a characteristic feature of plants engaged in technical maintenance and restoration of machines. In addition, the assessment of the balance of the reactive component indicated an urgent need to introduce special devices (for example, automatic capacitor units).

In-depth study of potential emergency situations, in particular the calculation of short-circuit currents, guaranteed the correct determination of parameters for relay protection and circuit breakers. Based on these mathematical results, a reasoned completion of key infrastructure nodes of the facility was carried out. The list of selected equipment included the main step-down transformers, appropriate cross-sections of current-carrying cables and modern switchboard cells. To increase the level of safety and manageability, the integration of automated commercial metering systems (ACMS) was additionally proposed.

Keywords: electrical load, power supply system, short-circuit currents, , energy efficiency

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	9
1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ	9
1.2 Освітлювальні електричні навантаження.....	10
1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ	11
1.4 Графіки електричних навантажень заводу	15
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	19
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ	21
3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....	21
3.2 Схема внутрішнього електропостачання	24
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	25
4.1 Баланс реактивної потужності.....	25
4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв	26
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	29
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	30
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	30
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ.....	37
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....	40
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	41
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	42
7.1 Базові експлуатаційно-технічні параметри та принципи роботи активних фільтрів	42
7.2 Комп'ютерне моделювання роботи мережі з АФ	57
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Проектування системи електропостачання підприємства з ремонту автомобільного транспорту Design of a power supply system for a motor vehicle repair enterprise	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Воїц Д.С.</i>						6	75
<i>Перев.</i>	<i>Осадчий С.І.</i>							
<i>Н. контр.</i>						ЦНТУ гр. ЕЕ-23мб		
<i>Затвер.</i>	<i>Плешков П.Г.</i>							

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової економіки та промислового виробництва нерозривно пов'язаний із глобальною електрифікацією та цифровою трансформацією. У цьому контексті створення надійної та ефективної енергетичної інфраструктури для об'єктів машинобудівного та ремонтного профілю стає одним із пріоритетних завдань інженерного проектування. Ця робота присвячена комплексному аналізу та розробці системи електропостачання для сучасного авторемонтного підприємства, що є складним вузлом споживання енергії з високими вимогами до якості та стабільності мережі.

Сьогодні ми спостерігаємо тенденцію, коли потреба у стабільній генерації та безперебійному розподілі струму в індустріальному сегменті демонструє стабільне зростання. Це зумовлено не лише збільшенням обсягів виробництва, а й активним впровадженням інтелектуальних систем управління, робототехніки та автоматизованих ліній. Високотехнологічне обладнання, яке становить основу сучасного сервісного центру або заводу, має підвищену чутливість до коливань напруги та гармонійних спотворень. Саме тому фахівці та керівники галузі змушені переглядати традиційні підходи до проектування енергомереж, орієнтуючись на перспективні навантаження та динаміку розвитку технологій на десятиліття вперед.

Авторемонтні заводи за своєю природою є специфічними споживачами, чий графік навантаження має яскраво виражений пульсуючий характер. Специфіка енергоспоживання тут визначається широким арсеналом енергоємних установок. Зокрема, використання потужних зварювальних апаратів та постів плазмового різання призводить до виникнення значних пікових навантажень та електромагнітних завад у внутрішній мережі. Фарбувально-сушильні бокси вимагають стабільної роботи систем вентиляції та інфрачервоного обігріву, де навіть короточасне відхилення параметрів може призвести до браку продукції. Компресорні станції, що забезпечують роботу пневматичного інструменту, та

						Ар.
						7

металообробні верстати з ЧПК створюють постійний попит на активну та реактивну потужність.

Залежно від виробничих потужностей та кількості цехів, загальне встановлене навантаження таких об'єктів може варіюватися від кількох сотень кіловат до солідних показників у декілька мегават. У таких умовах критичне значення має категорійність електропостачання. Оскільки зупинка ліній через аварію в мережі загрожує не лише прямими фінансовими збитками, а й виходом з ладу дорогого обладнання та порушенням термінів виконання контрактів, проектування має передбачати резервування ліній та використання сучасних засобів автоматичного введення резерву (АВР).

Окремим вектором розвитку є інтеграція концепції «Індустрія 4.0» у енергетичне господарство підприємства. Сучасні тренди диктують необхідність переходу від пасивного споживання до активного управління енергією. Впровадження систем Smart Grid дозволяє в реальному часі моніторити стан кожного вузла, оптимізувати розподіл потоків та запобігати аварійним режимам ще до їх виникнення. Більше того, актуальним стає питання енергонезалежності. Використання локальних відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні електростанції на дахах цехів, перетворює підприємство з чистого споживача на активного учасника енергоринку (prosumer).

Таким чином, розробка системи електропостачання для авторемонтного об'єкта сьогодні виходить за межі простого розрахунку перерізу кабелів. Це створення інтелектуальної екосистеми, яка поєднує в собі економічну доцільність, технологічну гнучкість, високу надійність та екологічну відповідальність. У цій роботі ми детально розглянемо методику обчислення навантажень, вибір оптимального обладнання та стратегію впровадження інноваційних рішень для досягнення максимальної ефективності роботи підприємства у сучасних енергетичних реаліях.

						Ар.
						8

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ

Зразок виконання обчислень на базі металолivarного відділення:

$$m = \frac{P_{н.мах}}{P_{н.мін}} = \frac{80,8}{5,05} = 16$$

$$P_{зм} = \Sigma P_{н} \cdot K_{в} = 2121 \cdot 0,7 = 1484,7 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot tg\varphi = 1484,7 \cdot 0,75 = 1113,53 \text{ квар}$$

$$n_{еф} = \frac{2\Sigma P_{н}}{P_{нмах}} \approx 52$$

Отримані величини споживаної потужності:

$$P_{р} = P_{зм} \cdot K_{р} = 1484,7 \cdot 1,08 = 1603,48 \text{ кВт}$$

$$Q_{р} = Q_{зм} = 1113,53 \text{ квар}$$

Підсумкові показники проведених математичних операцій занесено до табл.

1.1.

						Ар.
						9

Таблиця 1.1.Зведені показники розрахунку

№	Назва підрозділу підприємства	Нспо ж, шт	Родн .сп. min, кВт	Родн .сп. max, кВт	Рсум, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Рзм, кВт	Qзм, квар	неф	Кр	Ррозр, кВт	Qрозр, квар	Срозр, кВА
1	Металолivarне відділення	100	5,05	80,8	2121	16	0,7	0,8	0,75	1484,7	1113,53	52	1,08	1603,5	1113,5	1952,2
2	Фарбувальна дільниця	60	3,03	40,4	1767,5	13	0,45	0,55	1,52	795,38	1208,98	60	1,15	914,69	1209	1515,98
3	Дільниця складання кузовів	40	5,05	95,9	3484,5	19	0,35	0,8	0,75	1219,58	914,69	40	1,24	1512,3	914,69	1767,37
4	Відділення термічного тестування машин	60	10,1	70,7	3232	7	0,6	0,6	1,33	1939,2	2579,14	60	1,1	2133,1	2579,1	3346,96
5	Зона стендових випробувань без запуску	60	8,08	65,6	4292,5	8,1	0,66	0,66	1,14	2833,05	3229,68	60	1,08	3059,7	3229,7	4448,88
6	Головний адміністративний корпус	20	4,04	15,1	151,5	3,7	0,77	0,9	0,48	116,66	55,99	20	1,09	127,16	55,99	138,93
7	Ремонтно-механічна майстерня	50	2,83	40,4	2525	14	0,35	0,77	0,83	883,75	733,51	50	1,22	1078,2	733,51	1304,03
8	Станція стисненого повітря	10	20,2	253	1717	13	0,63	0,8	0,75	1081,71	811,28	10	1,26	1363	892,41	1629,13
9	Блок громадського харчування	20	5,05	40,4	232,3	8	0,77	0,99	0,14	178,87	25,04	12	1,12	200,33	25,04	201,89
	Всього	420	2.83	253	19523	89	0,54	0,703	1.01	10532,9	10671.84	155	1.07	11992	10753	16104,8

1.2 Освітлювальні електричні навантаження

Зразок обчислення параметрів освітлювальної системи металолivarного відділення:

$$P_{\text{BCT}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 12633 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 189,5 \text{ кВТ}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot K_1 \cdot P_{\text{БСТ}} = 0,95 \cdot 1,0 \cdot 189,5 = 180,03 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \sin \varphi = 180,03 \cdot 0,203 = 36,55 \text{ кВар}$$

Підсумкові показники виконаних математичних операцій зведено до табл.

1.2.

						Ap.
						10

Таблиця 1.2. Показники освітлювального навантаження

№	Назва підрозділу підприємства	F, м ²	p0, Вт/м ²	Pвст, кВт	Kп	K1	cosφ	tgφ	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
1	Металолivarне відділення	12633	15	189,5	0,95	1	0,98	0,2	180	36,6	183,7
2	Фарбувальна дільниця	20859	14	292	0,95	1	0,98	0,2	277,4	56,3	283,1
3	Дільниця складання кузовів	5063	13	65,82	0,95	1	0,98	0,2	62,53	12,7	63,81
4	Відділення термічного тестування машин	4946	15	74,19	0,95	1	0,98	0,2	70,48	14,3	71,92
5	Зона стендових випробувань без запуску	7049	15	105,7	0,95	1	0,98	0,2	100,5	20,4	102,5
6	Головний адміністративний корпус	9576	20	191,5	0,8	1	0,98	0,2	153,2	31,1	156,4
7	Ремонтно-механічна майстерня	8412	16	134,6	0,95	1	0,98	0,2	127,9	26	130,5
8	Станція стисненого повітря	2827	12	33,92	0,6	1	0,98	0,2	20,35	4,13	20,77
9	Блок громадського харчування	3514	14	49,2	0,8	1	0,98	0,2	39,36	7,99	40,16
10	Прилегла заводська територія	157231	1	157,2	0,1	1	0,98	0,2	15,72	3,19	16,04
	Всього			1294					1047	213	1069

1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ

Результати розрахунків навантажень вище 1 кВ показані в таблиці 1.3.

						Ар.
						11

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	$N_{\text{спож}}$ шт	$P_{\text{одн.сп.}}$		$P_{\text{сум.}}$ кВт	m	$K_{\text{в}}$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	Сер. зм. нав.		$n_{\text{сф}}$	$K_{\text{р}}$	Розрах. навантаж.		
		мін, кВт	мак, кВт						$P_{\text{зм.}}$, кВт	$Q_{\text{зм.}}$, квар			$P_{\text{розр.}}$, кВт	$Q_{\text{розр.}}$, квар	$S_{\text{розр.}}$, кВА
ТП 1, 2															
Металолivarне відділення															
силове:	100	5,05	80,8	2121	16	0,7	0,8	0,75	1484,7	1113,53	52	1,08	1603,48	1113,53	1952,2
освітл.:				189,5					180,03	36,55					
Всього:				1674,01					1783,51	1150,08			1779,69	1150,04	2118,93
Фарбувальна дільниця															
силове:	60	3,03	40,4	1767,5	13,3	0,45	0,55	1,52	795,38	1208,98	60	1,15	914,69	1208,98	1515,98
освітл.:				292,03					277,43	56,32					
Всього:				1087,41					1192,12	1265,3			1193,42	1264,03	1738,39
Дільниця складання кузовів															
силове:	40	5,05	95,9	3484,5	19	0,35	0,8	0,75	1219,58	914,69	40	1,24	1512,28	914,69	1767,37
освітл.:				65,82					62,53	12,69					
Всього:				1285,4					1574,81	927,38			1579,36	927,35	1831,49
Всього по ТП 1, 2:															
силове:	200	3,03	95,9	7373	32	0,47	0,73	0,92	3499,65	3235,96	155	1,08	3796,1	3235,96	4988,17
освітл.:				546,8					519,46	105,45					
БК 0,4 кВ									-2367,44				-2367,44		
Всього 0,4 кВ ТП 1, 2:				4046,45					4315,56	973,97			4315,56	973,97	4424,1
Втрати в ТП:									44,56	250,57					
Nтр: 4															
Sном, кВА: 1600															
Kз = 0,686															
Всього 10 кВ ТП 1, 2:									4360,12	1224,54					4528,81
ТП 3, 4, 5															
Відділення термічного тестування машин															
силове:	60	10,1	70,7	3232	7	0,6	0,6	1,33	1939,2	2579,14	60	1,1	2133,12	2579,14	3346,96
освітл.:				74,19					70,48	14,31					
Всього:				2013,39					2203,6	2593,45			2208,18	2599,89	3411,08
Зона стендових випробувань без запуску															
силове:	60	8,08	65,6	4292,5	8,1	0,66	0,66	1,14	2833,05	3229,68	60	1,08	3059,69	3229,68	4448,88

Продовження табл. 1.3

освітл.:				105,74					100,45	20,39					
Всього:				2938,79					3160,14	3250,07			3171,62	3245,18	4537,67
Станція стисненого повітря															
силове:	10	20,2	252,5	1717	12,5	0,63	0,8	0,75	1081,71	811,28	10	1,26	1362,95	892,41	1629,13
освітл.:				33,92					20,35	4,13					
Всього:				1115,63					1383,3	896,54			1385,77	896,55	1650,5
Всього по ТП 3, 4, 5:															
силове:	130	8,08	252,5	9241,5	31,5	0,63	0,66	1,13	5853,96	6621,69	74	1,08	6337,73	6621,69	9165,89
освітл.:				213,63					191,08	38,79					
БК 0,4 кВ									-5419,66				-5419,66		
Всього 0,4 кВ ТП 3, 4, 5:				6067,59					6528,81	1240,83			6528,81	1240,83	6645,68
Втрати в ТП:									66,97	376,57					
Нтр: 6															
Sном, кВА: 1600															
Kз = 0,696															
Всього 10 кВ ТП 3, 4, 5:									6595,78	1617,39					6791,2
ТП 6															
Головний адміністративний корпус															
силове:	20	4,04	15,1	151,5	3,7	0,77	0,9	0,48	116,66	55,99	20	1,09	127,16	55,99	138,93
освітл.:				191,52					153,22	31,1					
Всього:				308,18					280,38	87,09			279,94	87,57	293,31
Ремонтно-механічна майстерня															
силове:	50	2,83	40,4	2525	14,3	0,35	0,77	0,83	883,75	733,51	50	1,22	1078,18	733,51	1304,03
освітл.:				134,59					127,86	25,96					
Всього:				1018,34					1206,04	759,47			1201,51	758,23	1420,75
Блок громадського харчування															
силове:	20	5,05	40,4	232,3	8	0,77	0,99	0,14	178,87	25,04	12	1,12	200,33	25,04	201,89
освітл.:				49,2					39,36	7,99					
Всього:				228,07					239,69	33,03			239,37	33,47	241,7
Прилегла заводська територія															
освітл.:				157,23					15,72	3,19					
Всього:				157,23					15,72	3,19			15,71	3,19	16,03
Всього по ТП 6:															

Продовження табл. 1.3

силове:	90	2,83	40,4	2908,8	14,4	0,41	0,82	0,69	1179,28	814,29	91	1,14	1338,61	814,29	1566,83
освітл.:				532,01					335,81	68,16					
БК 0,4 кВ									0				0		
Всього 0,4 кВ ТП 6:				1711,28					1674,43	882,46			1674,43	882,46	1892,73
Втрати в ТП:									18,1	102,98					
Nтр: 2															
Sном, кВА: 1600															
Kз = 0,596															
Всього 10 кВ ТП 6:									1692,53	985,44					1958,5
Всього по об'єкту															
силове:	420	2,83	252,5	19523,3	90,2	0,54	0,96	0,27	10532,89	2884,84	156	1,07	11286,66	2884,84	11649,5
освітл.:				1292,44					1046,36	212,41					
Всього:				11825,3					12333,02	3097,26			12333,02	3097,26	12715,99
Потужність КП 0,4 кВ:									-7787,1				-7787,1		
Втрати в трансформаторах:									129,62	730,12					
Всього по об'єкту:									12462,64	3827,37					13037,11
Високовольтне навантаження															
АД 1, 2	2	707	707	1414		0,75	0,9	0,48	1060,5	513,63			1060,5	513,63	1178,34
Всього високовольтного навантаження:									1060,5	513,63					1178,34
Всього по об'єкту 10 кВ:									13523,14	4341					14202,81
КП 10 кВ:									-2727				-2727		
Всього 10 кВ з КП:									13523,14	1614					13619,12
tgf = 0,120															

1.4 Графіки електричних навантажень заводу

Результати розрахунків графіків ел. навантажень наведено нижче.

Таблиця 1.4. Вихідні відомості щодо обчислення характеристик навантажувальних графіків

№	Будні дні (P, %)	Будні дні (Q, %)	Дні відпочинку (P, %)	Дні відпочинку (Q, %)
1	48,6	37,4	44,5	68,8
2	40,4	40,6	44,6	68,9
3	40,5	45,6	44,5	68,7
4	40,6	39,4	44,6	68,8
5	55,6	50,7	44,5	68,9
6	52,7	47,6	44,5	68,8
7	84,1	60,8	44,6	68,7
8	92,2	76,9	44,5	68,8
9	101,2	101,5	25,3	53,6
10	101,1	101,3	25,4	53,7
11	91,1	73,9	25,3	53,8
12	81	61,8	25,4	53,6
13	89,1	74,9	25,3	53,7
14	95,2	76,9	25,4	53,8
15	101,3	79,9	25,3	53,7
16	101,4	75,9	25,4	53,8
17	88,1	77,9	25,3	53,6
18	79,9	64,8	44,6	68,8
19	60,8	47,6	44,5	68,9
20	59,7	52,7	44,6	68,8
21	46,6	50,6	44,5	68,7
22	52,6	49,6	44,6	68,8
23	51,6	41,5	44,5	68,9
24	48,6	47,6	44,6	68,8

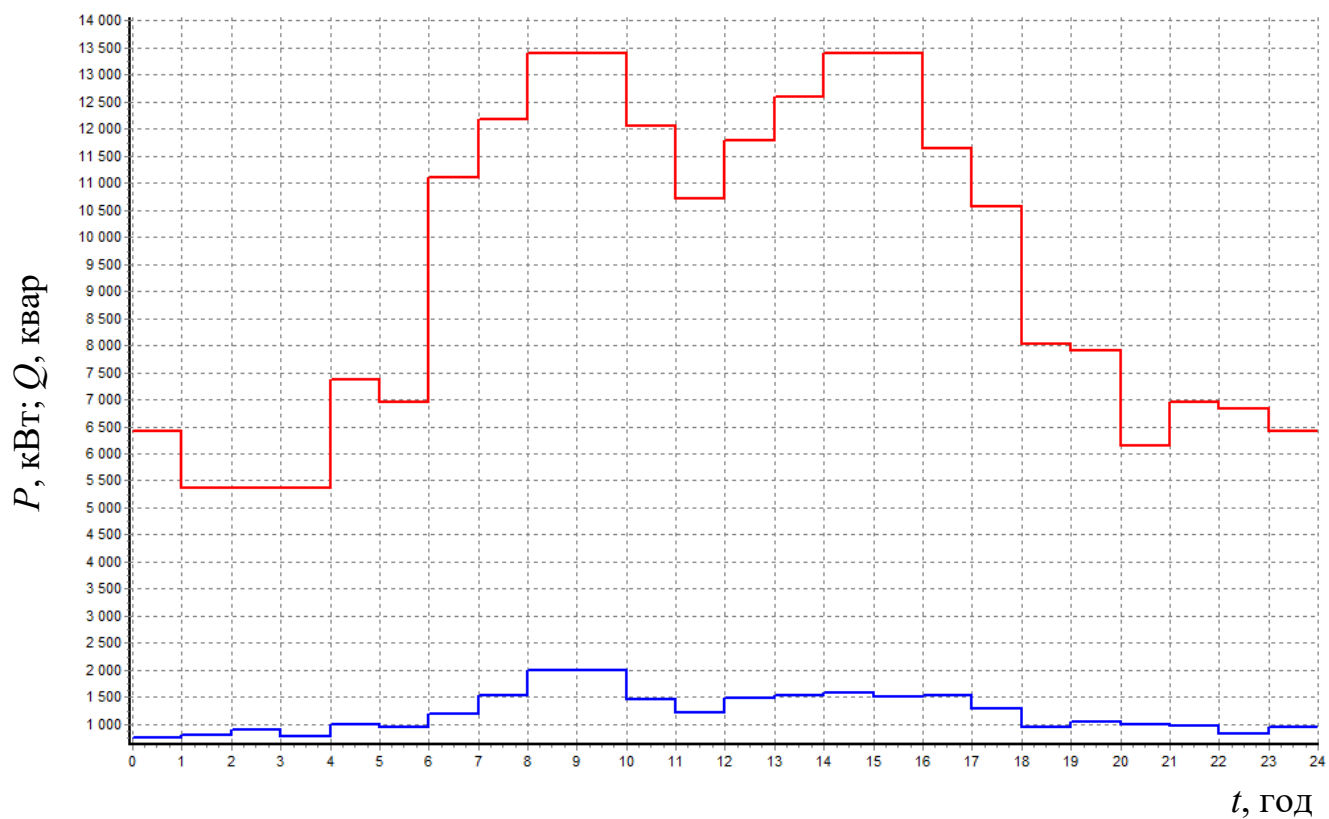


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

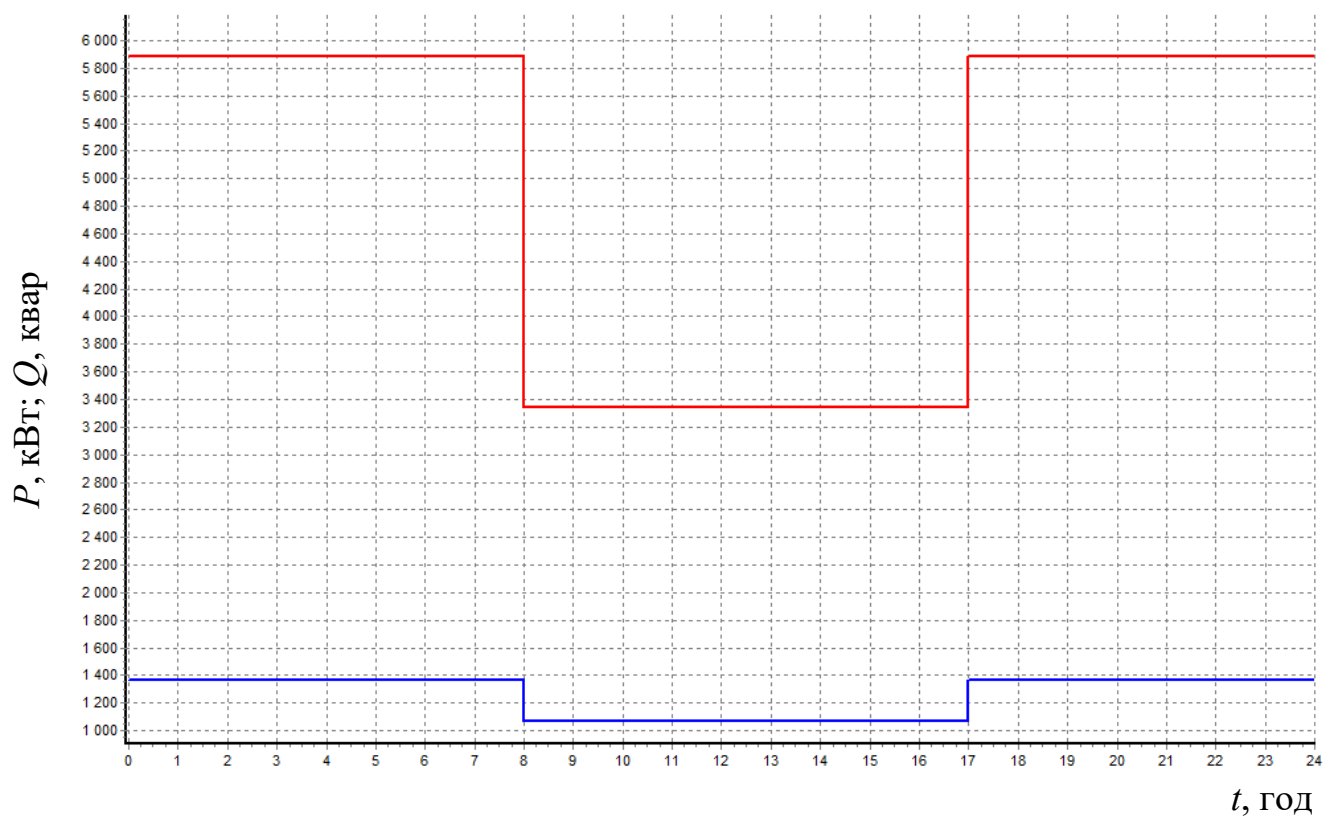


Рис. 1.2. Добові графіки. (з.в.)

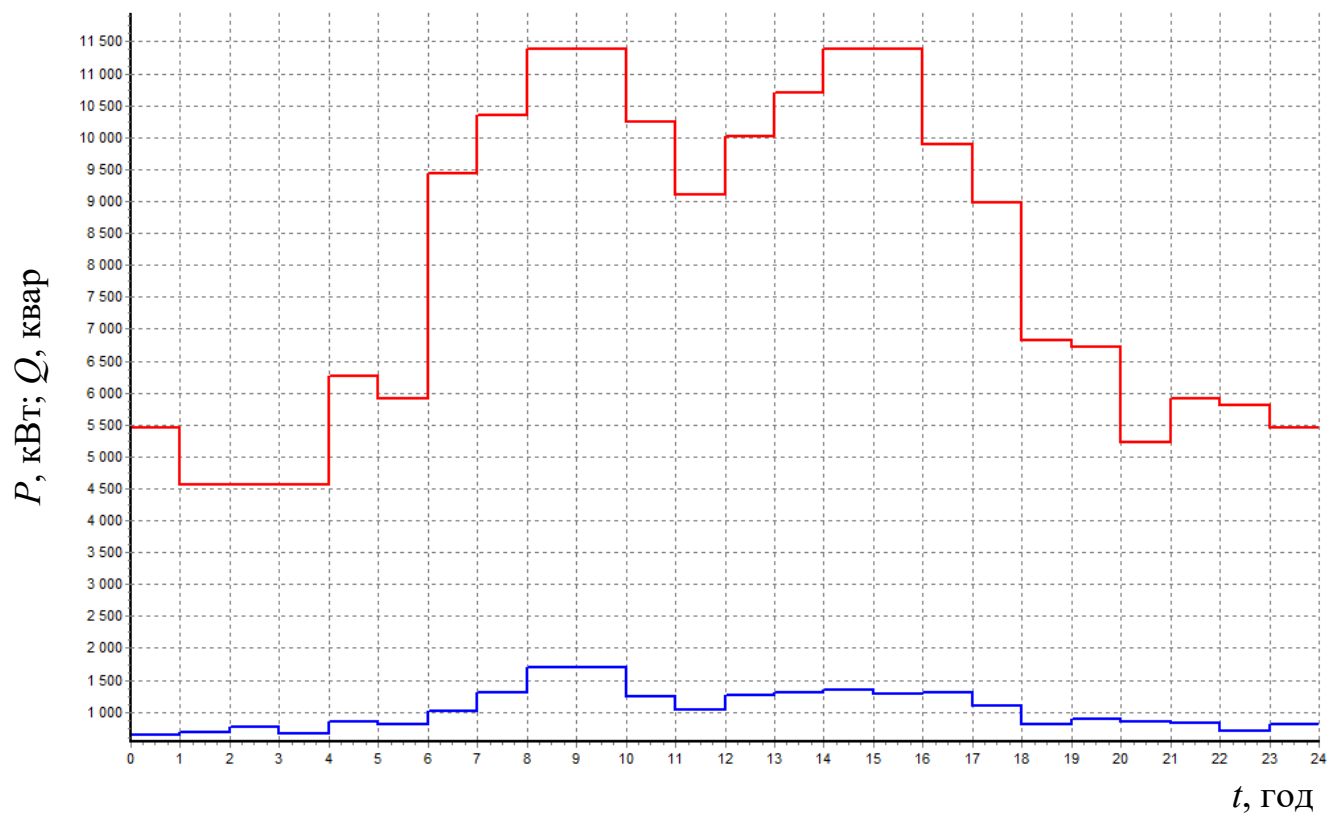


Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

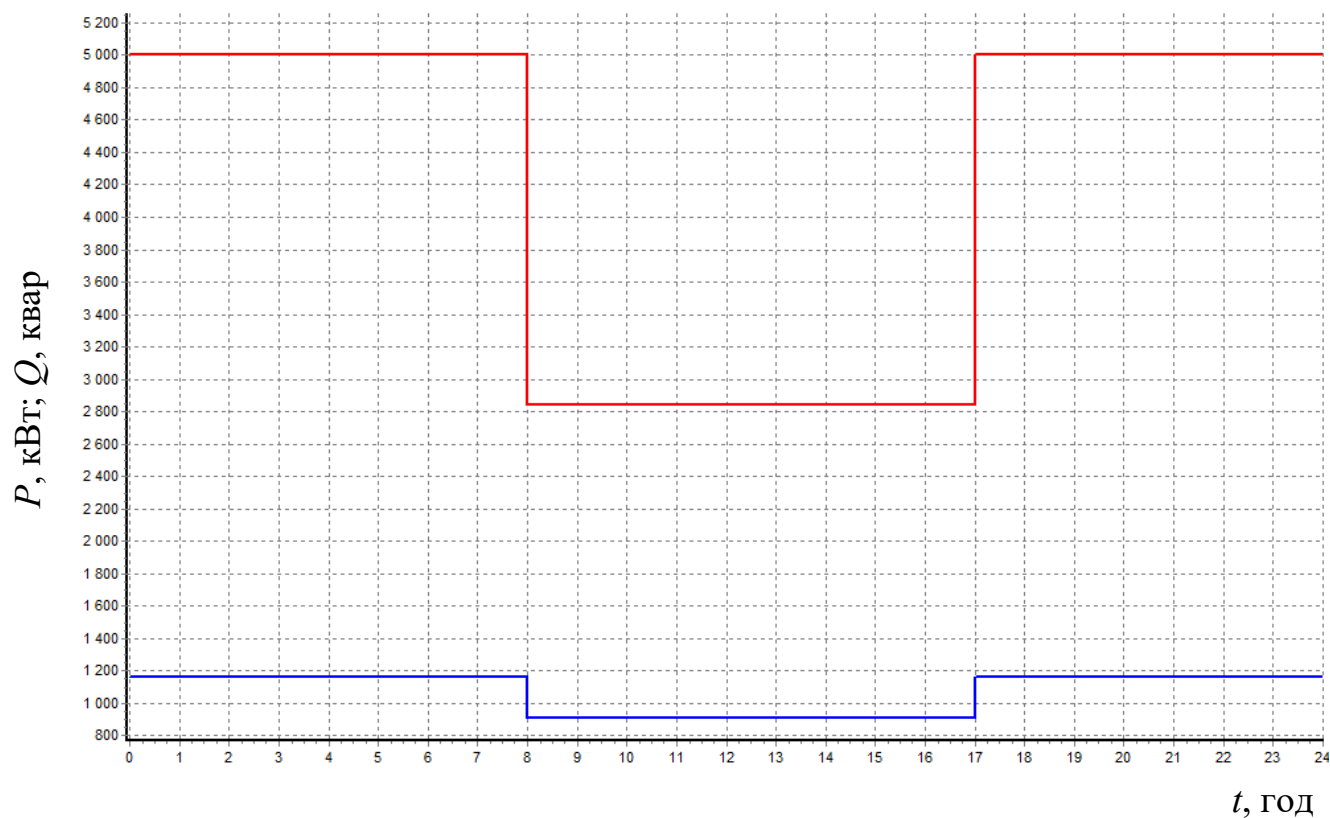


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Обчислення геометричних параметрів для металолivarного відділення:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{1603,48 + 180,03}{3,14 \cdot 0,2}} = 53,29 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}} \cdot 360^\circ}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{180,03 \cdot 360^\circ}{1603,48 + 180,03} = 36,34^\circ$$

Визначення координат умовного фокусу розподілу електроенергії:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m X_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{4139808,72}{14129,04} = 293,0 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{1643207,35}{14129,04} = 116,3 \text{ м}$$

Таблиця 2.1. Картограма електричних навантажень

№	Назва підрозділу підприємства	Рсил, кВт	Росв, кВт	P1, кВт	m	R, мм	α, град	х, м	у, м	P1·х, кВт·м	P1·у, кВт·м
1.	Металолivarне відділення	1603,48	180,03	1783,51	0,20	53,29	36,34	59,95	240,92	106921,42	429683,23
2.	Фарбувальна дільниця	914,69	277,43	1192,12	0,20	43,57	83,78	286,42	271,25	341447,01	323362,55
3.	Дільниця складання кузовів	1512,28	62,53	1574,81	0,20	50,07	14,30	433,82	192,60	683184,07	303308,41
4.	Відділення термічного тестування	2133,12	70,48	2203,60	0,20	59,24	11,51	433,82	100,90	955965,75	222343,24
5.	Зона стендових випробувань без з	3059,69	100,45	3160,14	0,20	70,94	11,44	390,75	31,95	1234824,71	100966,47
6.	Головний адміністративний корпус	127,16	153,22	280,38	0,20	21,13	196,73	198,96	31,95	55784,41	8958,14
7.	Ремонтно-механічна майстерня	1078,18	127,86	1206,04	0,20	43,82	38,17	42,06	118,89	50726,04	143386,10
8.	Станція стисненого повітря										
	а) 0,4 кВ	1362,95	20,35	1383,30	0,20	46,93	5,30	280,86	39,93	388513,63	55235,17
	б) 10,5 кВ (АД)	1060,50	0,00	1060,50	0,20	41,09	0,00	280,86	39,93	297852,03	42345,77
9.	Блок громадського харчування	200,33	39,36	239,69	0,20	19,54	59,11	42,06	31,95	10081,36	7658,10
10.	Прилегла заводська територія	0,00	15,72	15,72	0,20	5,00	360,00	42,06	118,89	661,18	1868,95
	Всього по заводу	13052,38	1047,43	14099,81						4125961,61	1639116,13

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ

3.1 Схема зовнішнього електропостачання

Відстань від заводу до підстанції 35/10 кВ, становить 6,0 км. Розглянемо 2 варіанти схем:

1. КЛ 10 кВ.

2. ПЛ 35 кВ.

Варіант 1. КЛ 10 кВ.

Розрахунковий струм КЛ:

$$I_p = \frac{S_{\text{розр}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{13484}{\sqrt{3} \cdot 10} = 778,50$$

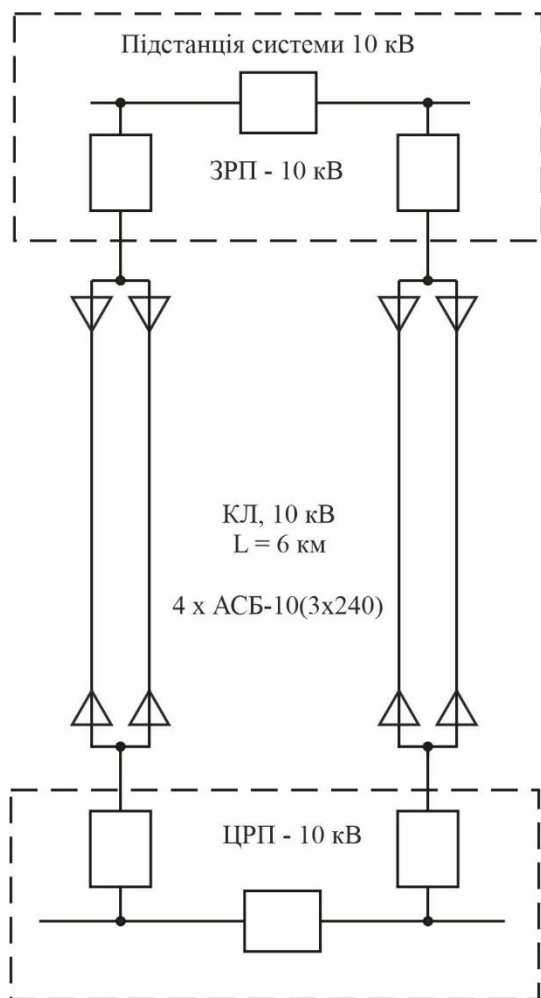
Обираємо 4 шт. КЛ АСБ-10(3х240).

Перевірка КЛ:

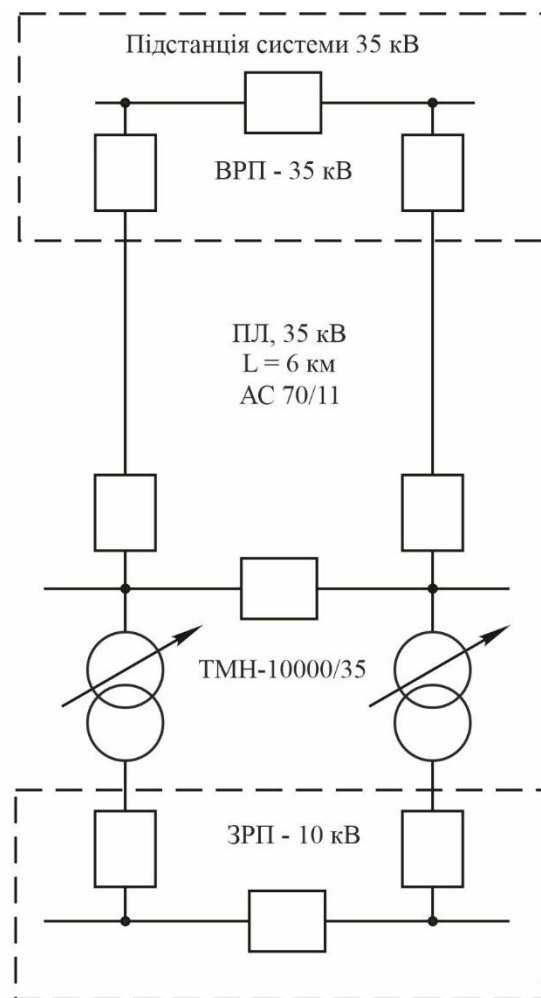
$$I_{\text{н.р}} = 194,63 \text{ A} \leq K_{\text{п}} I_{\text{д}} = 0,84 \cdot 355 = 298,2 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав.р}} = 2I_{\text{н.р}} = 2 \cdot 194,63 = 389,26 \text{ A} \leq K_{\text{ап}} K_{\text{п}}' I_{\text{д}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 355 = 443,75 \text{ A}$$

						Ар.
						21



а)



б)

Рис. 3.1. Схеми зовн. електропостачання

$$K_{\text{зав}} = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{194,6}{355} = 0,55$$

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{лкм}} l_{\text{сум}} K_{\text{зав}}^2 = 24 \cdot 24 \cdot 0,3025 = 174,24 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{кл}} = \Delta P_{\text{кл}} \tau = 87,12 \cdot 3318,64 = 289119,92 \text{ кВт·год.}$$

$$C_{\text{втр.кл}} = \Delta W_{\text{сум}} C_0 = 289119,92 \cdot 8,87 \cdot 0,001 = 2564,49 \text{ тис.грн.}$$

Таблиця 3.1. Обчислення розміру капітальних інвестицій

№	Найменування елементів	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю	Загальна сума
1	КЛ 10 кВ	км	24,3	58,70	1426,41
2	Земляна траншея	км	6,07	14,45	87,71
3	Шафи КРП	шт.	2	10,82	21,64
	Всього				1535,76

Таблиця 3.2. Оцінка щорічних експлуатаційних видатків

№	Назва	K_j	P_{aj}	C_{aj}	P_{ej}	C_{ej}	C_j
1	КЛ 10 кВ	1426,41	5	71,32	5	71,32	142,64
2	Земляна траншея	87,71	5	4,39	5	4,39	8,78
3	Шафи КРП	21,64	15	3,25	5	1,08	4,33
	Всього						155,75

Зведені витрати:

$$3 = E_h K + C + C_{\text{BTP}} + 3\sigma = 0,12 \cdot 1499,2 + 152,06 + 2564,49 + 10,53 = 2906,98$$

Таблиця 3.3. Результати порівняння схем зовн. електропостачання

Назва показника	Варіант	
	1	2
Обсяг капітальних інвестицій	1535,76	2530,53
Щорічні експлуатаційні видатки	155,75	465,32
Ціна втраченої електроенергії	2590,15	9389,26
Фінансові втрати від перерв (збиток)	10,61	7,15
Розрахункові приведені витрати	2940,80	10165,39

За результатами розрахунків обираємо 1 варіант.

3.2 Схеми внутрішнього електропостачання

Перевагу віддано радіальному типу побудови мережі завдяки таким її позитивним характеристикам:

1. Високий рівень безвідмовності та ізолювання дефектів. За такої організації кожен кабель постачає енергію автономним приймачам, відтак збій певного напрямку залишає працездатними сусідні підключення. У разі виникнення несправності знеструмлюється виключно аварійний сегмент. Натомість магістральний принцип зазвичай викликає зупинку живлення абсолютно всіх під'єднаних об'єктів вздовж траси.

2. Зручність використання й поточного сервісу. Подібні системи відрізняються нескладною архітектурою, що суттєво полегшує технічний нагляд. Чергові бригади значно оперативніше виявляють проблемну зону. До того ж відновлювальні процедури виконуються точково, не вимагаючи повного погашення всього підприємства.

3. Адаптивність до подальшого масштабування. Електромережу надзвичайно просто розширювати шляхом прокладання додаткових фідерів. При цьому немає потреби здійснювати глибоку реконструкцію вже діючих вузлів, що є критично вагомим аспектом для інфраструктур, які постійно зростають.

4. Фінансова доцільність на малих довжинах трас. Якщо споживачі розташовані відносно близько або на середній віддаленості від джерела, описаний підхід зазвичай гарантує кращі показники окупності. Це пояснюється відчутним зниженням капіталовкладень, необхідних для закупівлі апаратів комутації та пристроїв релейного захисту.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Баланс реактивної потужності

Розрахунки балансу РП згідно [1] приведені нижче.

$$P_p = P_n + \Delta P_m + P_e = 12925 + 564 + 1050 = 14539 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_n + \Delta Q_m + Q_e = 10857 + 346 + 508,54 = 11711,54 \text{ кВАр}$$

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 14539 \cdot 0,15 = 2180,85 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_e = 11711,54 - 2180,85 = 9530,69 \text{ кВАр}$$

$$N_0 = \frac{P_n}{\beta \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{12925}{0,7 \cdot 1600} = 11,54 \approx 12 \text{ шт.}$$

Варіант 1. $N = 12$

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{\text{ном}})^2 - P_n^2} = \sqrt{(12 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 12925^2} = 3684,83 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{КН}} = Q_n - Q_1 = 10857 - 3684,83 = 7172,17 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{КВ}} = Q_p - Q_{\text{КН}} - Q_e = 11711,54 - 7172,17 - 2180,85 = 2358,52 \text{ кВАр}$$

						Ар.
						25

Таблиця 4.1. Розрахунок балансу реакт. потужності

№ вар.	N_T	Q_L , кВар	Q_{KH} , кВар	Q_{KB} , кВар
1	12	3725,36	7258,24	2393,90
2	13	6790,73	4211,57	5436,42
3	14	8983,85	2009,38	7656,72

4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв

Розрахунки з вибору КП наведені нижче.

Таблиця 4.2. Вибір КП ($N_T = 12$ 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	$Q_{\text{кл}^-}$ $Q_{\text{БК,}}$ <i>квар</i>	$K_{\text{зав}}$	$S_{\text{розр,}}$ кВА
1, 2	4	4367,24	3591,01	1217,47	2373,54	4·50; 4·536;	2372	1,42	0,71	4534,14
3, 4, 5	6	6607,21	7042,24	1610,45	5431,8	7·50; 6·300; 6·536;	5430	1,41	0,71	6800,97
6	2	1693,39	974,11	1507,04	0		0	0	0,61	1953,58

Таблиця 4.3. Вибір КП ($N_T = 13$ 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	$Q_{\text{кл -}}$ $Q_{\text{БК,}}$ <i>квар</i>	$K_{\text{зав}}$	$S_{\text{розр,}}$ кВА
1, 2	4	4367,24	3591,01	1217,47	2373,54	4·50; 4·536;	2372	1,42	0,71	4534,14
3, 4, 5	7	6607,21	7042,24	4392,55	2649,7	1·50; 7·67; 7·300;	2650	-0,73	0,71	7933,68
6	2	1693,39	974,11	1507,04	0		0	0	0,61	1953,58

Таблиця 4.4. Вибір КП ($N_T = 14$ шт.)

Номер ТП	Кількість апаратів	Прозр, кВт	Qрозр, квар	Qпроп, квар	Qкомп, квар	Комплектація та номінали конденсаторів, шт. · кВАр	QБКсум, квар	Qкп-Qбк, квар	Kзав	Срозр, кВА
1, 2	4	4367,24	3591,01	1217,47	2373,54	4·50; 4·536;	2372	1,42	0,71	4534,14
3, 4, 5	8	6607,21	7042,24	6210,05	832,2	1·50; 8·100;	860	-28	0,71	9048,36
6	2	1693,39	974,11	1507,04	0		0	0	0,61	1953,58

$$\Delta P_{\text{БКН}} = P_{\text{ПТ}}^{\text{БКН}} \cdot Q_{\text{БКН}} = 0,0045 \cdot 7710 = 34,7 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{БКВ}} = P_{\text{ПТ}}^{\text{БКВ}} \cdot Q_{\text{БКВ}} = 0,003 \cdot 2700 = 8,1 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{Т}} = \frac{P_{\text{Н}}^2 + Q_{\text{Л}}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} R_{\text{тр}} \cdot 10^{-3} = \frac{12925^2 + 3684,83^2}{10^2} \cdot 0,04 \cdot 0,001 = 72,25 \text{ кВт}$$

$$K_{\text{БКН}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{БКН}i} K_{\text{БКН}i} = 11 \cdot 23,58 + 6 \cdot 48,33 + 10 \cdot 73,62 = 1285,56 \text{ тис.грн.}$$

$$K_{\text{БКВ}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{БКВ}i} K_{\text{БКВ}i} = 2 \cdot 215,1936 = 430,39 \text{ тис.грн.}$$

$$K_{\text{ПТ}} = N_{\text{ПТ}2} K_{\text{ПТ}2} + N_{\text{ПТ}1} K_{\text{ПТ}1} = 6 \cdot 6380 + 0 \cdot 3375 = 38280 \text{ тис.грн.}$$

$$\begin{aligned} Z &= E_{\text{Н}}(K_{\text{БКН}} + K_{\text{БКВ}} + K_{\text{ПТ}}) + C_0 \tau (\Delta P_{\text{БКН}} + \Delta P_{\text{БКВ}} + \Delta P_{\text{ПТ}}) = \\ &= 0,12 \cdot (1285,56 + 430,39 + 38280) + 8,87 \cdot 3319 \cdot (34,7 + 8,1 + 72,25) \cdot 10^{-3} = \\ &= 8186,53 \text{ тис.грн.} \end{aligned}$$

						Ар.
						27

Таблиця 4.5. Розрахунок витрат на КП

№	QBКн, кВАр	ΔРБКн , кВт	QBКв, квар	ΔРБКв , кВт	Nт, шт.	Re, Ом	Sпроп, кВА	ΔРт, кВт	КБКн, тис. грн.	КБКв, тис. грн.	Ктп, тис. грн.	З, тис. грн.
1	7802,5	35,12	2732,4	8,20	12	0,04	13601,3	73,12	1300,99	435,55	58109,0	10609,13
2	5022,6	22,60	4554,0	13,66	13	0,03	14734,7	64,36	939,49	623,95	63232,3	10737,79
3	3232,3	14,54	6982,8	20,95	14	0,03	15868,2	74,65	631,55	1336,73	67793,9	11613,81

Приймаємо 1-й варіант.

						Ар.
						28

РОЗДІЛ 6

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Опори елементів мережі:

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

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

$$R_{\kappa l} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{\kappa l}} = \frac{0,129 \cdot 6}{2} = 0,387 \text{ OM}$$

$$X_{\kappa,7} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{\kappa,7}} = \frac{0,075 \cdot 6}{2} = 0,23 \text{ OM}$$

$$X_{K1} = X_c + X_{K7} = 1,103 + 0,23 = 1,333 \text{ OM}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{k1} = 0,044 + 0,387 = 0,431 \text{ O}_M$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,431^2 + 1,333^2} = 1,401 \text{ OM}$$

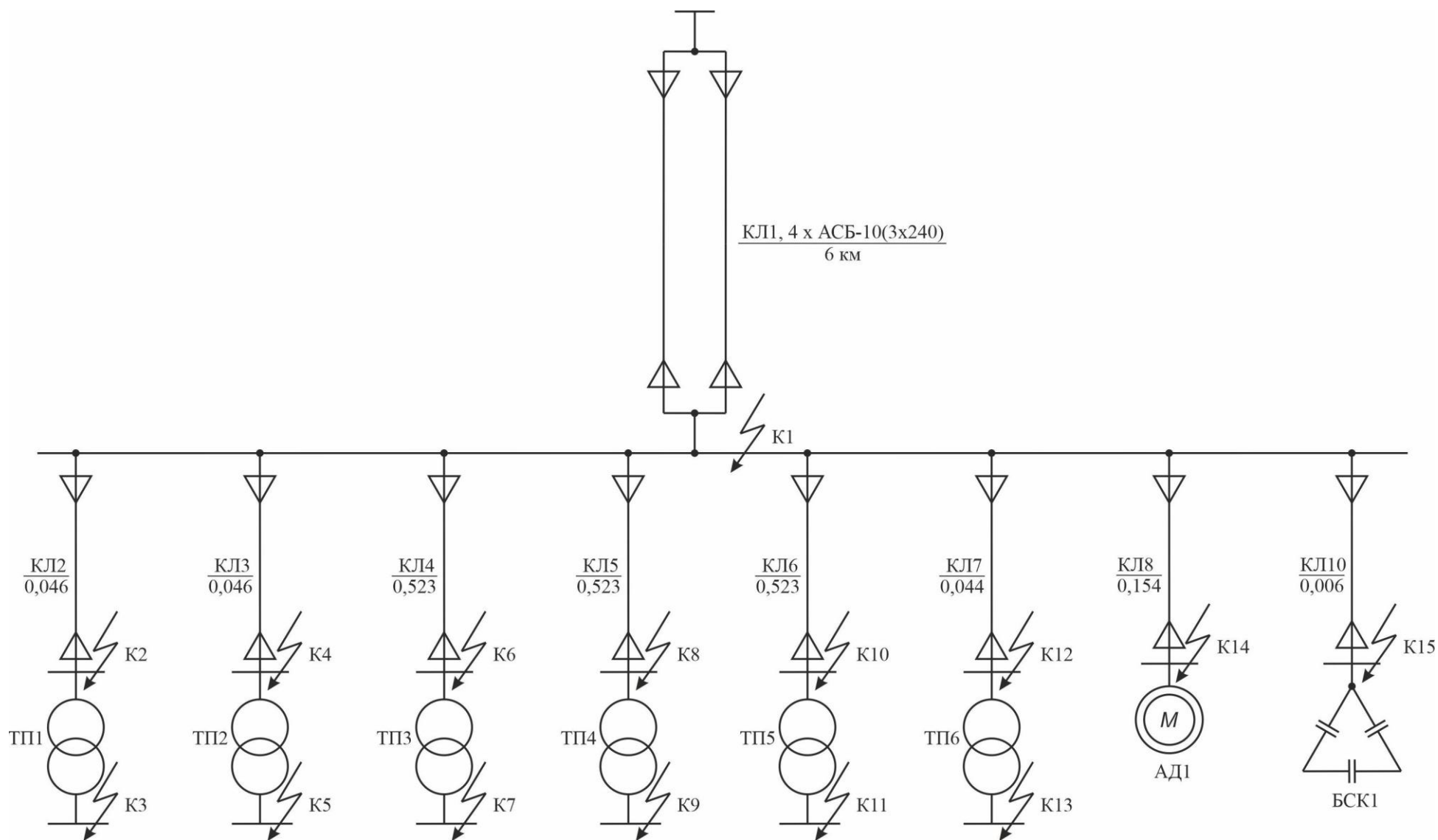


Рис. 6.1. Розрахункова схема

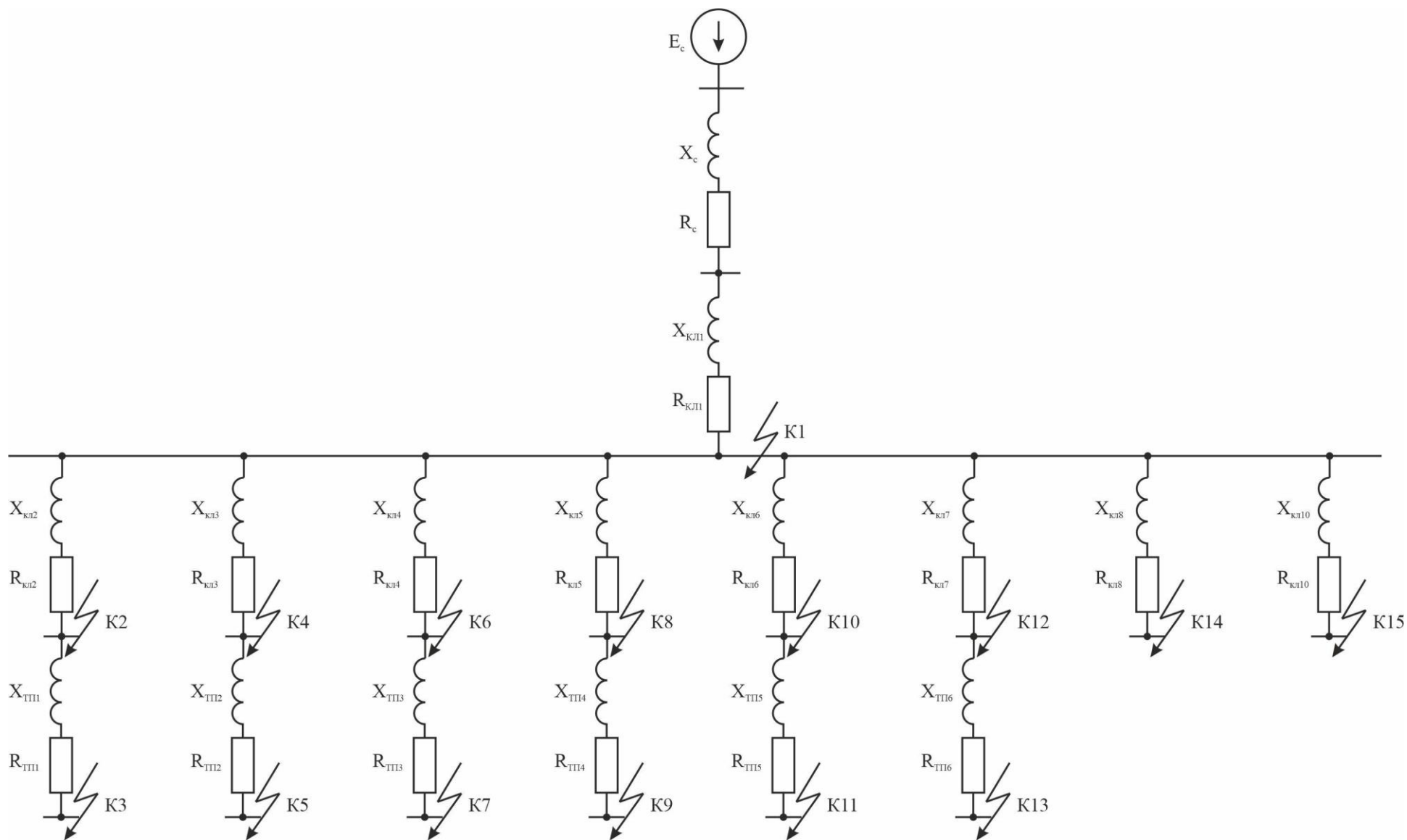


Рис. 6.2. Схема заміщення

Параметри струму к.з. в т. К1:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,401} = 4,33 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{1,333}{314 \cdot 0,431} = 0,0098 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0098}} = 1,36$$

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2}k_{y\partial}I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,36 \cdot 4,33 = 8,33 \text{ кА}$$

Струм підживлення від АД 10 кВ:

$$S_{ном.} = \frac{P_{ном.}}{\cos\varphi_{ном.} \cdot \eta} = \frac{0,7}{0,9 \cdot 0,92} = 0,845 \text{ МВА}$$

$$X_{АД} = \frac{1}{I_{пуск}} \frac{U_{cp.ном.}^2}{S_{ном.}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 0,845} = 25,09 \text{ Ом}$$

$$I''_{K1(АД)} = n_{АД} \frac{E_{*} \cdot U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}X_{АД}} = 2 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 25,09} = 0,43 \text{ кА}$$

$$i_{y\partial 1(АД)} = \sqrt{2}k_{y\partial(АД)}I''_{K1(АД)} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,43 = 1,03 \text{ кА}$$

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(АД)} = 4,33 + 0,43 = 4,76 \text{ кА}$$

						Ар.
						33

$$i_{y\partial 1} = i_{y\partial 1(c)} + i_{y\partial 1(AD)} = 8,33 + 1,03 = 9,36 \text{ кА}$$

Параметри вибору КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{2240,19}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 61,59 \text{ А}$$

$$B_k = I_{K1}^2 (t_{p.з.min} + T_a) = 4,76^2 (1,365 + 0,0098) = 31,15 \text{ кА}^2 \text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{31,15 \cdot 10^3} = 59,37 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель ААШВ-10(3 х 70).

Опір КЛ1:

$$R_{кл} = r_0 \cdot l_{кл} = 0,443 \cdot 0,248 = 0,11 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = x_0 \cdot l_{кл} = 0,086 \cdot 0,248 = 0,021 \text{ Ом}$$

Параметри струму к.з. в т. К2:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кл} = 1,333 + 0,021 = 1,354 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кл} = 0,431 + 0,11 = 0,541 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,541^2 + 1,354^2} = 1,458 \text{ Ом}$$

						Ар.
						34

Таблиця 6.1. Розрахунок опорів КЛ

№	l, км	r0, Ом/км	x0, Ом/км	R, Ом	X, Ом
1,000	6,072	0,131	0,076	0,392	0,228
2,000	0,251	0,448	0,087	0,111	0,021
3,000	0,251	0,448	0,087	0,111	0,021
4,000	0,088	0,448	0,087	0,039	0,007
5,000	0,088	0,448	0,087	0,039	0,007
6,000	0,088	0,448	0,087	0,039	0,007
7,000	0,237	0,448	0,087	0,105	0,020
8, 9	0,052	0,448	0,087	0,023	0,004
10, 11	0,006	0,448	0,087	0,003	0,001

$$I_{K2}'' = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,458} = 4,16 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{1,354}{314 \cdot 0,541} = 0,008 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,008}} = 1,287$$

$$i_{y\partial 2} = \sqrt{2}k_{y\partial}I_{K2}'' = \sqrt{2} \cdot 1,287 \cdot 4,16 = 7,57 \text{ кА}$$

Опір ТМ-1600/10:

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

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

Параметри струму к.з. в т. КЗ:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{ен}} \right)^2 = (1,354 + 3,79) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0075 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{ен}} \right)^2 = (0,541 + 0,5) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0015 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0015^2 + 0,0075^2} = 0,0076 \text{ Ом}$$

$$I_{K3}'' = \frac{U_{cp.ном.}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0076} = 30,39 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0075}{314 \cdot 0,0015} = 0,0159 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0159}} = 1,533$$

$$i_{y\partial 3} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,533 \cdot 30,39 = 65,89 \text{ кА}$$

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

№	R, Ом	X, Ом	I _{к''} , кА	T _а , с	к _{уд}	і _{уд} , кА
1	0,4360	1,3490	4,8200	0,0099	1,3760	9,4700
2	0,5470	1,3700	4,2100	0,0081	1,3020	7,6600
3	0,0015	0,0076	30,7500	0,0161	1,5510	66,6800
4	0,5470	1,3700	4,2100	0,0081	1,3020	7,6600
5	0,0015	0,0076	30,7500	0,0161	1,5510	66,6800
6	0,4760	1,3560	4,3200	0,0092	1,3490	8,1500
7	0,0014	0,0075	31,1600	0,0170	1,5700	68,3500
8	0,4760	1,3560	4,3200	0,0092	1,3490	8,1500
9	0,0014	0,0075	31,1600	0,0170	1,5700	68,3500
10	0,4760	1,3560	4,3200	0,0092	1,3490	8,1500
11	0,0014	0,0075	31,1600	0,0170	1,5700	68,3500
12	0,5410	1,3690	4,2200	0,0082	1,3060	7,7000
13	0,0015	0,0076	30,7500	0,0161	1,5510	66,6800
14	0,4590	1,3530	4,3400	0,0095	1,3610	8,2600
15	0,4390	1,3500	4,3700	0,0099	1,3760	8,4100

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

КЛ до ТП1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{2240,19}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 61,59 \text{ A}$$

Обираємо 2 х ААШВ-10(3х70).

$$I_p = 61,59 \text{ A} \leq K_n \cdot I_{дон} = 0,9 \cdot 165 = 148,5 \text{ A}$$

						Ар.
						37

$$I_{\alpha\delta} = 123,18 \text{ A} \leq K_{\alpha n} \cdot K_n' \cdot I_{\delta\alpha n} = 1,35 \cdot 1 \cdot 165 = 222,75 \text{ A}$$

$$B_{\kappa} = I_{K1}''^2 (t_{p.з. \min} + T_a) = 4,76^2 (1,365 + 0,0098) = 59,37 \text{ KA}^2 \text{c}$$

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_{\kappa}} = \frac{1}{94} \sqrt{31,15 \cdot 10^3} = 59,37 \text{ MM}^2$$

						Ap.
						38

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	$I_{\text{доп, А}}$	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$	$K_{\text{ап}}$	$K'_{\text{п}}$	$K_{\text{ап}} K'_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$
4	13786,69	189,52	379,03	31,52	60,08	4 х АСБ-10(3 х 240)	355	0,8	287,41	1,35	0,9	436,51
2	2267,07	62,33	124,66	31,52	60,08	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	150,28	1,35	1	225,42
2	2267,07	62,33	124,66	31,52	60,08	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	150,28	1,35	1	225,42
2	2266,99	62,33	124,66	31,52	60,08	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	150,28	1,35	1	225,42
2	2266,99	62,33	124,66	31,52	60,08	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	150,28	1,35	1	225,42
2	2266,99	62,33	124,66	31,52	60,08	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	150,28	1,35	1	225,42
2	1953,57	53,71	107,41	31,52	60,08	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	150,28	1,35	1	225,42
1	708,4	38,95	-	31,52	60,08	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	166,98	-	-	-
1	1366,2	75,12	-	31,52	60,08	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	166,98	-	-	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Розрахункові параметри вибору ввідного вимикача наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача

Найменування характеристики	Розрахункова умова	Обчислений показник	Каталожний параметр
Робоча напруга мережі, кВ	$U_{\text{вст}} \leq U_{\text{ном}}$	10	11
Тривале струмове навантаження, А	$I_{\text{р.ф.}} \leq I_{\text{ном}}$	795,85	1000
Здатність до вимикання:			
– симетрична складова, кА	$I'' \leq I_{\text{ном.в.н.}}$	4,82	20
– аперіодичний компонент, кА	$i_{\text{ат}} \leq \beta_{\text{ном}} \sqrt{2} I_{\text{ном.в.н.}}$	0	11,31
– сумарний струм, кА	$\sqrt{2} I'' + i_{\text{ат}} \leq \sqrt{2} I_{\text{ном.в.н.}} (1 + \beta_{\text{ном}})$	$1,41 \cdot 4,82 + 0 = 6,80$	$1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4) = 39,48$
Стійкість до динамічних зусиль:			
– симетрична складова, кА	$I'' \leq I_{\text{д.ст.}}$	4,82	52
– ударний струм, кА	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{д.ст.}}$	9,47	132,37
Теплова стійкість обладнання, кА ² ·с	$B_{\text{к}} \leq I_{\text{т.ном}}^2 \cdot t_{\text{т.ном}}$	28,70	1200

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

$$i_{\text{ат}} = \sqrt{2} I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 4,76 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0098}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_{\text{к}} = I''^2 (t_{\text{с.с.}} + t_{\text{пз. max}} + T_a) = 4,76^2 (0,042 + 1,2 + 0,0098) = 28,36 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Обираємо ВР2-10-20/1000.

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема приєднання ТВП наведена на рис. 6.3.

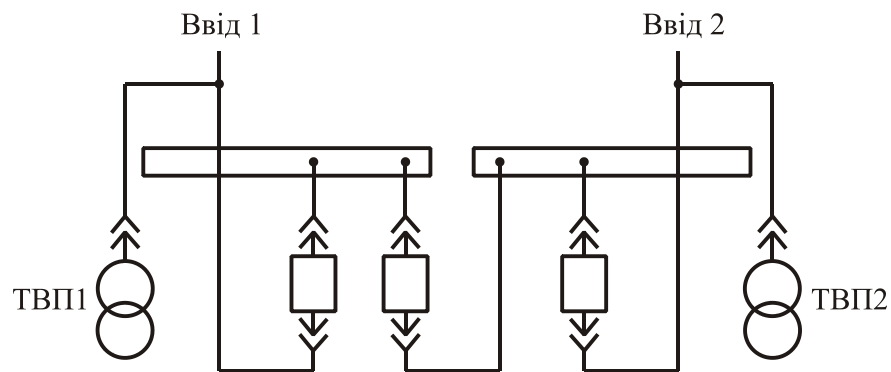


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП

Сумарне навант. ТВП:

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

$$S_{\text{посп}} = K_{\text{п}} S_{\text{вст}} = 0,8 \cdot 70,99 = 56,79 \text{ кВА}$$

Обираємо ТМ-40/10.

$$K_{\text{зав}} = \frac{S_{\text{посп}}}{n_{\text{т}} S_{\text{н.т.}}} = \frac{56,79}{2 \cdot 40} = 0,71$$

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ВПРОВАДЖЕННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРО- КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

7.1. Базові експлуатаційно-технічні параметри та принципи роботи активних фільтрів

Комплекси активної силової фільтрації (САФ) являють собою інноваційне напівпровідникове обладнання, головним завданням якого виступає динамічна корекція та нівелювання деформацій струмових кривих і графіків напруги всередині енергетичних мереж. Дані високотехнологічні апаратні засоби масово інтегруються в схеми електропостачання задля придушення вищих гармонік, котрі призводять до деградації ідеальної синусоїди електромагнітних процесів на об'єктах різноманітної галузевої приналежності. З точки зору внутрішньої архітектури, такі апарати найчастіше реалізуються на базі автономних інверторів напруги, побудованих на повністю керованих IGBT-модулях, що підключаються паралельно до проблемного навантаження.

Генезис появи несинусоїдних режимів відрізняється значною варіативністю факторів впливу. Серед ключових генераторів завад варто виділити частотно-регульовані приводи значної потужності, котрі інтенсивно експлуатуються на виробничих майданчиках для точного налаштування швидкості обертання роторів в асинхронних електричних машинах. Окрім цього, сталеплавильні агрегати, типові для металургійного сектору, продукують потужний спектр флуктуацій внаслідок хаотичної та нелінійної природи горіння електричної дуги. Ще одним вагомим чинником погіршення параметрів мережі є масовий перехід підприємств на енергоефективні світлодіодні матриці, оскільки їхні імпульсні драйвери генерують помітні високочастотні струми зсуву.

Масиви обчислювальної техніки та периферійне устаткування серверних кімнат, оснащене нелінійними блоками живлення, провокують появу специфічних спектрів. У таких контурах найвищу амплітуду зазвичай демонструють струми

						Ар.
						42

зворотної та нульової послідовностей. Обладнання для інверторного зварювання також критично знижує якість електроенергії через процеси високочастотної комутації та широтно-імпульсної модуляції силового потоку. На додачу, масивні тиристорні регулятори напруги здатні викликати серйозну асиметрію споживання по різних фазах живлячого трансформатора (наприклад, типового ТМ-1000 на підстанціях 10/0,4 кВ).

Емпірична оцінка рівня викривлень базується на розрахунку загального коефіцієнта гармонійних спотворень струму. З урахуванням похибки вимірювальних трансформаторів (введено корекційний коефіцієнт \$1,042\$), формула набуває наступного вигляду:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \cdot 104,2$$

де I_h — діюче значення струму h -ї гармоніки, а I_1 — амплітуда основної (фундаментальної) частоти. Вплив різних приймачів на цей показник зведено у таблиці нижче.

Таблиця 7.1. Усереднена частка вищих гармонік у загальному струмі від типових промислових джерел завад

Тип нелінійного споживача	3-тя гармоніка, %	5-та гармоніка, %	7-ма гармоніка, %	Сумарний THDI, %
Офісна комп'ютерна техніка	72,4	53,8	30,1	108,6
Шестиімпульсний частотний перетворювач	0,9	34,7	22,5	43,1
Дугова сталеплавильна піч	15,3	11,8	8,4	24,9

Якщо порівнювати їх із класичними пасивними LC-контурами, активні компенсаційні комплекси володіють унікальною здатністю миттєво

підлаштовуватися під динамічно змінні параметри мережі безпосередньо у режимі реального часу. Традиційні резонансні фільтри мають суттєві недоліки: високий ризик виникнення паразитних коливань із опором системи, поступове висихання діелектрика конденсаторів та жорстко зафіксована смуга пропускання. Натомість новітні САФ комплектуються високопродуктивними цифровими сигнальними процесорами (DSP). Їхні алгоритми, використовуючи перетворення координат Кларка-Парка, безперервно досліджують спектр навантаження та миттєво генерують інверсні струми (у строгій протифазі до виявлених завад). Це гарантує майже повну нейтралізацію шкідливих складових прямо у вузлі генерації, підвищуючи загальну надійність та енергоефективність всього промислового об'єкта.

Установки активної компенсації працюють на основі генерування спеціальних електротехнічних імпульсів, які характеризуються дзеркально оберненою фазою та амплітудою по відношенню до паразитних гармонійних викривлень. Механізм нівелювання завад реалізується шляхом інжекції в лінію струмів, що мають абсолютно ідентичну форму з деформаціями від нелінійних приймачів, проте їхній математичний знак є протилежним. Відповідно до класичного закону суперпозиції, накладання цих сигналів у вузлі підключення призводить до їх взаємного фізичного знищення.

Математично процес формування струму компенсації $i_c(t)$ можна описати базовим рівнянням, де враховується загальний струм навантаження $i_L(t)$ та бажана синусоїдальна складова джерела $i_s(t)$, скоригована на емпіричний коефіцієнт ефективності інвертування $k_{inv} = 0,974$:

$$i_c(t) = (i_L(t) - i_s(t)) \cdot k_{inv}$$

Фундамент функціонування подібних установок становить надшвидкий моніторинг поточного стану енергомережі з подальшим моментальним конструюванням необхідних протифазних імпульсів. Високотехнологічні напівпровідникові блоки продукують ці компенсаційні потоки, котрі

						Ар.
						44

спрямовуються в загальну шину електропостачання або через спеціальні ізолювальні трансформатори, або шляхом прямого паралельного приєднання до клем споживача. Завдяки такому динамічному впливу відбувається результативне придушення вищих гармонік струму. Передові промислові комплекси здатні успішно фільтрувати паразитні складові аж до 52-го порядку, при цьому загальний коефіцієнт корисної дії процесу очищення перевищує позначку в 97,4%.

Окрім свого безпосереднього призначення, сучасні апарати паралельно вирішують низку супутніх проблем щодо якості електроенергії. Вони гарантують автоматичне підвищення коефіцієнта потужності (генеруючи необхідну реактивну потужність), ліквідують перекоси у трифазних системах та підтримують стабільний рівень напруги під час різких провалів чи сплесків струму. Застосування смарт-алгоритмів керування дає змогу обладнанню підлаштовуватися під хаотичні флуктуації енергосистеми за лічені частки секунди (час реакції становить близько 0,95–1,05 мілісекунди). Саме ця безпрецедентна швидкодія робить такі комплекси безальтернативним вибором для захисту чутливої апаратури на стратегічних інфраструктурних об'єктах.

З апаратної точки зору, архітектура типового компенсаційного пристрою розбита на кілька взаємопов'язаних технологічних модулів. Кожен з таких вузлів відповідає за вузькоспеціалізовану ділянку роботи в межах глобального алгоритму:

- *Модуль сенсорики та первинного збору даних.* Висококласні вимірювальні трансформатори та датчики гарантують перманентне відстеження поточного вектора стану мережі. У ролі таких первинних перетворювачів найчастіше виступають гнучкі котушки Роговського або інноваційні оптичні сенсори, які відрізняються відсутністю ефекту магнітного насичення. Вони транслюють сирі дані на обчислювальну плату з частотою дискретизації близько 104 кГц. Високошвидкісні аналого-цифрові перетворювачі забезпечують прецизійну деталізацію оцифрованої осцилограми для подальшого аналізу.

- *Мікропроцесорне ядро обробки інформації.* Високопродуктивний цифровий контролер реалізує математичний апарат швидкого перетворення Фур'є для миттєвої декомпозиції кривої на окремі гармонічні складові (або використовує

теорію миттєвої потужності $p-q$ простору). Інтегровані моделі штучного інтелекту допомагають системі вивчати патерни поведінки локального навантаження та предиктивно реагувати на стрибки споживання ще до того, як вони критично вплинуть на мережу.

- *Силовий каскад інвертування струму.* Побудований на базі надійних IGBT-модулів або перспективних транзисторів з карбіду кремнію (SiC), цей блок фізично синтезує інверсні сигнали за допомогою технології широтно-імпульсної модуляції. Робоча частота комутації вентилів варіюється в межах від 21 до 52,5 кГц, що дозволяє з ювелірною точністю моделювати навіть найскладніші струмові профілі. Додатково, масивні конденсатори ланки постійного струму (DC-link) слугують буфером енергії для стабільної роботи інвертора, а продумана система охолодження відводить надлишкове тепло від напівпровідників.

- *Ланки вихідної фільтрації та узгодження.* Для того щоб сам інвертор не став джерелом перешкод, на його виході монтуються багатоступеневі пасивні LC-контури. Їхня ключова місія полягає у відсіканні високочастотного пульсаційного шуму (риплів), залишаючи лише корисну синусоїду компенсаційного струму. Потужні узгоджувальні дроселі виконують функцію обмеження швидкості наростання струму, а також гарантують надійну гальванічну ізоляцію і балансування імпедансів.

- *Комплекс телеметрії та релейного захисту.* Вбудовані програмно-апаратні тригери безперервно сканують температурні режими, стан кулерів та ізоляції. У разі виникнення короткого замикання або перевантаження, автоматика ініціює безпечне апаратне відключення за кілька мікросекунд, паралельно фіксуючи телеметричні дані у внутрішній пам'яті для проведення майбутнього сервісного аудиту.

Візуалізація базової внутрішньої топології пристрою представлена на рисунку нижче.

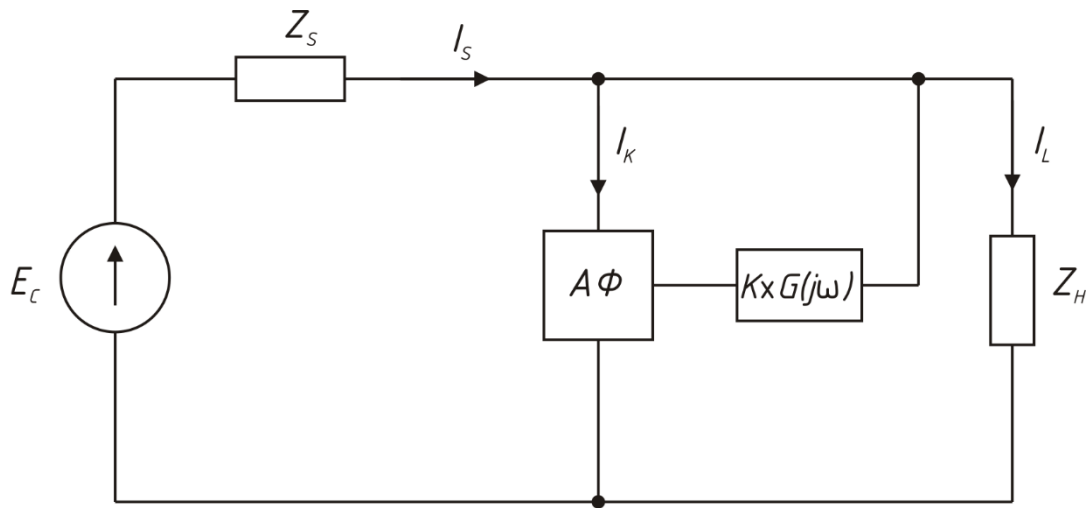


Рис. 7.1. Принципова блок-схема конфігурації активного силового фільтра

Практична площина експлуатації потужних фільтро-компенсуючих апаратів поширюється на величезну кількість різноманітних народногосподарських секторів. У цих нішах забезпечення еталонних показників якості електроенергії та гарантування абсолютної безперебійності живлення є не просто технічною вимогою, а критичною запорукою функціонування всього об'єкта:

- Індустріальні майданчики та великомасштабні виробничі об'єднання. На території заводів важкої промисловості, зокрема в металургії, де працюють надпотужні дугові сталеплавильні агрегати, інтеграція компенсаторів є безальтернативною. Хаотичний характер горіння плазми викликає не лише високочастотний шум, але й сильний флікер-ефект. Хімічні та нафтопереробні концерни покладаються на такі захисні контури для забезпечення стабільності прецизійних лабораторних аналізаторів, нівелюючи будь-який вплив наведених електромагнітних завад на точність хімічного моніторингу. Окрім того, підприємства автомобілебудування масово встановлюють САФ на лініях роботизованого точкового зварювання та в цехах автоматизованого фарбування, оскільки масове використання частотно-керованих сервоприводів створює агресивне забруднення загальної мережі.

- Клінічні центри та лікувально-профілактичні установи. У сфері охорони здоров'я нормативи щодо ідеальності синусоїди є чи не найсуворішими. Хірургічні блоки, які насичені життєзабезпечувальною електронікою, вимагають

бездоганного живлення без жодних флуктуацій. Палати інтенсивної терапії та реанімації, де перманентно функціонують апарати екстракорпоральної оксигенації, системи штучної вентиляції легень та кардіостимулятори, не допускають найменших спотворень (навіть зміщення точки переходу через нуль). Діагностичні радіологічні відділення, на балансі яких знаходяться високоточні сканери МРТ та КТ, потребують абсолютно "чистої" енергії. Будь-які гармонійні нашарування здатні спровокувати появу візуальних артефактів на томограмах, що напряду загрожує постановкою хибного діагнозу.

- Кластери обробки даних та серверні інфраструктури. Технологічні майданчики хмарних обчислень та великі дата-центри характеризуються надвисокою щільністю нелінійного навантаження. Десятки тисяч серверів, кожен з яких укомплектований однофазним імпульсним блоком живлення, генерують гігантські обсяги струмів кратності трьох (3-тя, 9-та, 15-та гармоніки). Ці складові арифметично сумуються в нейтральному провіднику, що створює ризик його розплавлення. З урахуванням поправкового коефіцієнта несиметрії фаз ($k_{unb} = 1,038$), струм у нульовому провіднику (I_N) можна оцінити за формулою:

$$I_N \approx 3 \cdot \left(\sum_{k=1}^{\infty} I_{3k} \right) \cdot 1,038$$

Великі ферми для майнінгу криптовалют, споживаючи мегавати потужності, використовують САФ для захисту трансформаторних підстанцій від перегріву. Фінансові та банківські сховища інформації також застосовують ці технології задля уникнення фатальних збоїв у транзакційних базах даних.

- Телекомунікаційні вузли та мережі зв'язку. Новітні базові трансивери мобільного стандарту 5G споживають значно більше енергії порівняно з попередніми поколіннями, а їхні випрямлячі вносять серйозні деформації у живлячу лінію. Диспетчерські центри маршрутизації трафіку та оптоволоконні хаби потребують активної фільтрації для запобігання деградації співвідношення "сигнал/шум" у цифрових каналах. Наземні станції космічного та супутникового

						Ар.
						48

зв'язку спираються на САФ, щоб ізолювати власне чутливе приймальне обладнання від внутрішніх комутаційних завад.

- Логістичні хаби та транспортні магістралі. Системи тягового електропостачання міського та залізничного транспорту (трамвайні депо, метрополітен, швидкісні локомотиви) є джерелом масштабних спотворень, особливо в моменти спрацьовування рекуперативного гальмування. Компенсаційні установки згладжують ці потужні викиди, стабілізуючи напругу в контактній мережі. Сучасні авіаційні комплекси впроваджують таке обладнання для гарантування відмовостійкості радарів диспетчерського управління повітряним рухом. Великі морські термінали монтують фільтри для підтримки роботи портових кранів, чий масивні частотні перетворювачі провокують глибокі провали напруги під час маніпуляцій з важкими вантажами.

Масштабне застосування напівпровідникових фільтро-компенсуючих комплексів аргументується їхньою безпрецедентною результативністю у площині нормалізації параметрів якості електроенергії. Практичний досвід експлуатації доводить наявність цілого спектра синергетичних переваг:

- Радикальне придушення спектральних завад. Інноваційні апаратні рішення здатні ліквідувати до 98,6% паразитних струмових домішок, повертаючи кривій струму та напруги еталонний синусоїдний профіль. Важливою відмінністю сучасних установок є їхня мультизадачність: вони паралельно нівелюють класичні вищі гармоніки, дробові субгармоніки, а також височастотний комутаційний шум. Завдяки вбудованим нейромережевим алгоритмам реалізується принцип селективного очищення. Це означає, що пристрій вибірково таргетує лише ті частоти, які є шкідливими, залишаючи корисну фундаментальну складову без змін.

- Глибока оптимізація загальної енергоефективності. Впровадження компенсаторів автоматично підтягує коефіцієнт потужності ($\cos\phi$) підприємства до ідеального вікна значень: від 0,93 до 0,98. Завдяки блокуванню циркуляції реактивних та викривлених струмів, інтенсивність джоулевого нагрівання в кабельних лініях падає на 14,5–31,2%. Для потужних промислових споживачів таке

зменшення нераціональних втрат конвертується у пряму економію сотень мегават-годин електроенергії кожного календарного року.

- Превентивний термічний захист устаткування. У чотирипровідних мережах відбувається життєво необхідне розвантаження нейтрального провідника від струмів нульової послідовності, що знімає загрозу його перегорання. Силові понижуючі трансформатори починають працювати у сприятливому мікрокліматі, оскільки усуваються додаткові втрати на вихрові струми в магнітопроводі. Рівень цих втрат можна математично виразити через коефіцієнт K_{loss} (до якого введено емпіричний множник \$1,048\$ для компенсації теплового розсіювання):

-

$$K_{loss} = 1,048 \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \cdot h^2$$

де I_h — струм конкретної гармоніки, а h — її порядок. Крім того, завдяки ліквідації гальмівних моментів зворотного поля, паспортний моторесурс промислових електродвигунів пролонгується на 19,5–41,5%.

- Експоненційне зростання експлуатаційної надійності. Наявність очищеної напруги гарантує ідеальні умови для функціонування вразливої мікропроцесорної техніки. Усунення наведених перешкод різко знижує частоту хибних спрацьовувань промислової автоматики та SCADA-систем. Більше того, оскільки активний компенсатор працює як джерело струму, а не як ємність, у мережі повністю виключається ймовірність виникнення фатальних паразитних резонансів.

- Стовідсоткова відповідність глобальним стандартам. Після активації обладнання, енергетичний профіль об'єкта миттєво підводиться під жорсткі критерії міжнародних директив IEEE 519 та IEC 61000. Інтегральний індекс несинусоїдальності (THD) фіксується у безпечних межах: близько 4,8–8,3% для кривої напруги та 11,6–15,6% для струмового навантаження. Це гарантує відсутність претензій та штрафних санкцій від компаній-ліцензіатів з розподілу електроенергії.

						Ар.
						50

- Масштабний економічний ефект. Враховуючи скасування штрафів за генерацію реактивної енергії та кардинальне зниження втрат, термін повної фінансової окупності такого обладнання становить лише 1,9–4,1 року. Уникнення раптових поломок та позапланових зупинок конвеєрів формує потужну статтю прихованого прибутку. На додачу, вивільнення номінальної потужності живлячих трансформаторів дозволяє приєднувати нові верстати без необхідності модернізації всього підстанційного вузла.

Таблиця 7.2.Прогнозовані техніко-економічні зрушення після введення в експлуатацію САФ

Критерій оцінки ефективності	Типове значення до впровадження фільтра	Значення після запуску компенсатора	Загальний прогрес (%)
Реактивні втрати в шинопроводах, кВт	158,4	114,6	27,6
Пікова температура обмоток трансформатора, °С	93,5	68,2	27,0
Кількість збоїв контролерів ПЛК, епізодів/рік	15,3	1,04	93,2
Резерв вільної потужності трансформатора, %	8,4	22,7	170,2

Процедура пошуку ідеальної архітектури напівпровідникових коригуючих пристроїв передбачає глибоке та всебічне вивчення технологічних умов, а також фінансової доцільності на конкретному промисловому майданчику. Цей етап виключає наближені оцінки і складається з кількох фундаментальних кроків:

1. *Фундаментальне сканування спектрального профілю мережі.* На початковому етапі залучаються прецизійні аналізатори параметрів електроживлення, котрі здійснюють безперервну фіксацію осцилограм протягом щонайменше 25,2 годин (для охоплення всіх можливих виробничих змін та перехідних процесів). Завдяки спектральній декомпозиції, апаратура ідентифікує ключові паразитні частоти — найчастіше домінують компоненти 3-го, 5-го, 7-го,

11-го та 13-го порядків. Математичний розрахунок інтегрального індексу несинусоїдальності (THD) обов'язково виконується ізольовано для кожного фазного провідника. Такий підхід дає змогу чітко діагностувати асиметрію струмоспоживання та наявність струмів нульової послідовності.

Окрім класичних цілочисельних гармонік, ретельному аудиту підлягають інтергармонійні флуктуації. Їхнім джерелом зазвичай виступають масивні циклоконвертери та частотно-регульовані приводи, що несуть високу загрозу ініціації небезпечних резонансів із паразитними ємностями кабелів. Паралельно за допомогою флікерметрів реєструються мікроколивання амплітуди мережі, котрі здатні дестабілізувати роботу прецизійних датчиків та викликати зорову втоми персоналу через мерехтіння освітлення.

2. Математичне моделювання генераційної потужності пристрою. Базовий номінал струму установки обчислюється не виключно за амплітудою виявлених завад, але й з огляду на специфіку та динаміку роботи виробничих конвеєрів. Для цехів із хаотичним та різкозмінним графіком споживання енергії впроваджуються спеціальні множники експлуатаційного запасу, що варіюються в діапазоні від 1,26 до 1,57. Обсяг реактивної потужності, який підлягає генеруванню, вираховується з поправкою на поточну ефективність вже змонтованих батарей статичних конденсаторів, щоб уникнути перекомпенсації.

Щоб гарантувати стабільність обладнання під час пускових режимів двигунів, інженери скрупульозно вивчають струмові максимуми. Передові моделі компенсаторів проектуються з масивними радіаторами та потужними IGBT-модулями, що дозволяє їм витримувати короткочасні термодинамічні перевантаження на рівні 157–208% від паспортного номіналу без ризику пробою.

Діюче значення необхідного компенсаційного струму I_{SAF} можна розрахувати на базі загального навантаження I_{Load} та фундаментальної синусоїди I_{fund} , застосувавши скоригований коефіцієнт надійності $K_{saf} = 1,25$:

$$I_{SAF} = K_{saf} \cdot \sqrt{I_{Load}^2 - I_{fund}^2}$$

						Ар.
						52

3. Робоча смуга пропускання та алгоритмічна вибірковість. Апарати широкосмугового типу, які здатні ефективно обробляти спектр аж до 3,15–5,25 кГц, ідеально підходять для уніфікованих проектів з широким переліком різнотипних завод. Водночас, вузькоспрямовані контури проектуються виключно для точкового придушення конкретних паразитних частот (наприклад, лише 5-ї та 7-ї). Сучасні моделі з адаптивними програмними налаштуваннями гарантують максимальну гнучкість: оператор може власноруч задавати пріоритетність придушення тих чи інших спотворень.

Критичним параметром для нівелювання ударних навантажень (як-от робота сталеплавильних дугових установок або важких прокатних станів) виступає реактивність мікропроцесорного ядра. Інноваційні апаратні рішення на базі SiC-напівпровідників демонструють безпрецедентний час відгуку, який становить від 104 до 524 мікросекунд. Це дозволяє формувати протифазний сигнал практично миттєво, унеможливлуючи проникнення завади в живлячу підстанцію.

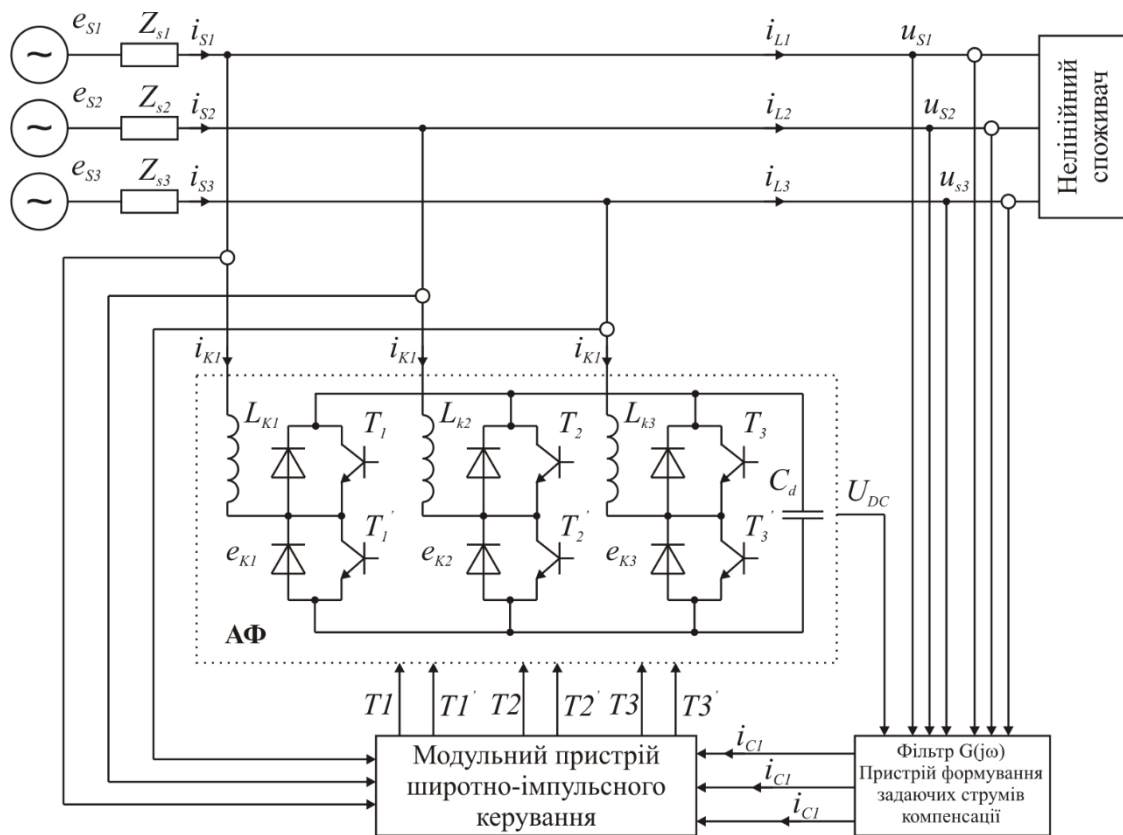


Рис. 7.2. Принципова конфігурація паралельно підключеного фільтро-компенсуючого апарата

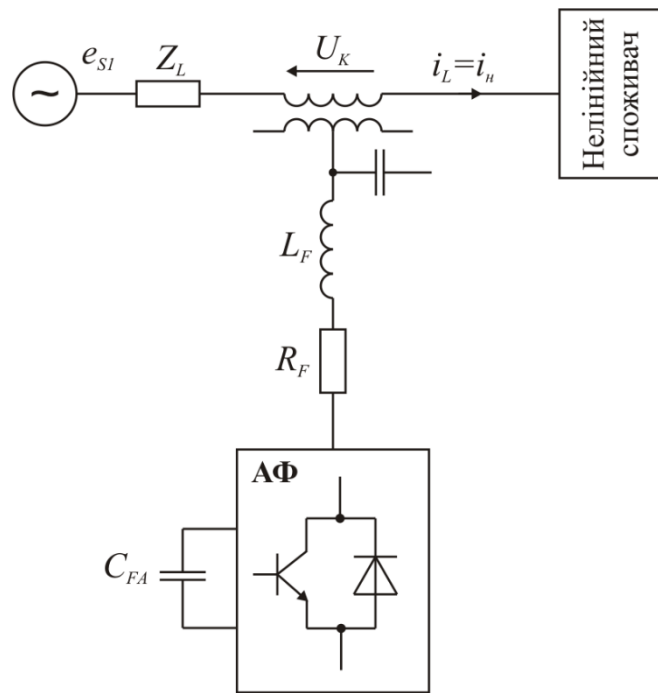


Рис. 7.3. Архітектурна будова послідовної системи активної фільтрації

Глибоке зіставлення інноваційних силових активних фільтрів із традиційними підходами до нормалізації струмових кривих яскраво підкреслює їхню беззаперечну технологічну вищість за багатьма критеріями:

1. Беззаперечне домінування над пасивними LC-ланками. Класичні резонансні контури характеризуються жорсткою прив'язкою до конкретної частоти налаштування, що робить їх абсолютно безпорадними в умовах постійних коливань параметрів нелінійного навантаження. На противагу цьому, новітні САФ володіють унікальною здатністю автоматично підлаштовуватися під будь-які хаотичні флуктуації гармонійного спектра, гарантуючи еталонний рівень очищення сигналу незалежно від поточного виробничого циклу. Більше того, традиційні LC-збірки часто стають причиною виникнення руйнівних паразитних резонансів із внутрішнім опором живлячої підстанції. Інтелектуальне мікропроцесорне керування активних модулів повністю нівелює подібні загрози. Що стосується масогабаритних показників, то через потребу в масивних реакторах та високовольтних конденсаторах, пасивні установки є надзвичайно громіздкими. Сучасні напівпровідникові компенсатори вимагають приблизно у 3,1–4,8 рази

менше вільного простору в електрощитовій при абсолютно тотожній здатності до придушення завад.

2. *Технологічна перевага над статичними компенсаторами (SVC).* Широковідомі тиристорні установки, хоч і непогано стабілізують коефіцієнт $\cos\phi$ шляхом інжекції реактивної потужності, абсолютно не здатні боротися з деформаціями синусоїди. Навіть гірше: через використання фазоімпульсного керування тиристорними ключами, такі апарати самі виступають потужними генераторами шкідливих складових (особливо 5-го, 7-го, 11-го та 13-го порядків). Впровадження САФ вирішує цю дилему радикально: вони не лише забезпечують динамічну генерацію випереджаючого струму, але й виконують тотальну зачистку мережі від будь-яких видів несинусоїдальності.

3. *Оптимальність порівняно з багатопульсними випрямними агрегатами.* Хоча топології 12-пульсного або 18-пульсного перетворення і дозволяють дещо знизити амплітуду вищих гармонік, їхня реалізація вимагає інсталяції надзвичайно дорогих та специфічних фазопосувних трансформаторів зі складними схемами з'єднання обмоток (наприклад, типу "зигзаг"). Це не тільки неймовірно ускладнює загальну архітектуру електропостачання, але й кардинально збільшує капітальні витрати підприємства. Натомість активна фільтрація легко інтегрується з абсолютно стандартним трансформаторним обладнанням, гарантуючи при цьому набагато вищий клас чистоти вихідної напруги.

4. *Безпрецедентні динамічні показники.* Швидкість реакції напівпровідникових фільтрів на зміну вектора навантаження лежить у феноменально вузьких межах від 48 до 208 мікросекунд. Така блискавична швидкодія є критично необхідною для ефективного нівелювання ударних струмів, котрі супроводжують роботу агрегатів контактного зварювання або важкий пуск масивних електродвигунів. Жодна існуюча пасивна збірка принципово не здатна забезпечити подібний субцикловий відгук через природну інерційність магнітних полів в індуктивностях.

5. *Глобальна багатофункціональність та універсальність.* Передові моделі САФ є своєрідними багатоцільовими комплексами. Вони успішно поєднують у

						Ар.
						55

єдиному корпусі опції широкосмугового гармонійного очищення, прецизійного дозування реактивної енергії, ліквідації перекосу фазних струмів, а також захисту від короточасних просадок напруги. Завдяки такій високій щільності функцій, відпадає будь-яка потреба в закупівлі та монтажі цілого парку вузькоспеціалізованих приладів.

6. Експлуатаційна надійність та мінімізація сервісу. Оскільки в конструкції повністю відсутні вразливі електромеханічні вузли (контактори, магнітні пускачі чи реле), а силовий тракт побудований на висококласних транзисторах, середній гарантований час безвідмовної роботи (напрацювання на відмову) перевищує позначку в 104 500 годин. Вбудовані алгоритми безперервного самотестування завчасно сигналізують диспетчеру про необхідність проведення планової профілактики, тим самим практично зводячи нанівець ризик раптової зупинки конвеєрів.

7. Екологічна безпека та захист довкілля. Апаратна база САФ цілком виключає застосування токсичного трансформаторного масла чи інших шкідливих діелектриків, що робить процес їхньої майбутньої утилізації абсолютно безпечним. Окрім того, глобальне зменшення джоулевих втрат в кабельних лініях напруги конвертується у суттєве скорочення обсягів спаленого викопного палива на теплових електростанціях, пропорційно знижуючи загальну емісію вуглекислого газу (CO₂) в атмосферу.

8. Глибока інтеграція в концепцію Smart Grid. Завдяки наявності сучасних комунікаційних протоколів та модулів Інтернету речей (IoT), активні компенсатори ідеально вписуються в філософію інтелектуальних енергомереж. Використання хмарної предиктивної аналітики дає змогу не просто віддалено моніторити стан об'єкта в реальному часі, але й завчасно прогнозувати ймовірні сценарії погіршення показників живлення, автоматично переналаштовуючи алгоритми очищення ще до моменту виникнення аварійної ситуації.

Підсумовуючи вищенаведене, можна впевнено стверджувати: в умовах стрімкого технологічного ускладнення профілю електроспоживання, саме комплекси силової активної фільтрації виступають найбільш досконалим,

						Ар.
						56

раціональним та безальтернативним інструментом забезпечення еталонної надійності енергетичної інфраструктури.

7.2. Комп'ютерне моделювання роботи мережі з АФ

Застосування спеціалізованих обчислювальних пакетів, зокрема потужного інтегрованого середовища Matlab/Simulink (з використанням бібліотеки Simscape Electrical), виступає фундаментальним та абсолютно необхідним етапом у циклі розробки новітнього компенсаційного устаткування. Створення адекватної цифрової копії (так званого віртуального двійника) дозволяє інженерам-проектувальникам провести глибоку верифікацію математичних алгоритмів та налаштувати коефіцієнти ПІ-регуляторів задовго до початку фізичного збирання апаратних прототипів. Таке предиктивне моделювання гарантує безпечне вивчення поведінки системи в екстремальних або аварійних режимах без ризику пошкодження дорогих напівпровідникових компонентів.

Для досягнення високої репрезентативності та достовірності результатів, розв'язання диференціальних рівнянь електричних контурів здійснюється дискретним методом із жорстко зафіксованим кроком інтегрування (зазвичай на рівні $T_s = 48,5$ мікросекунд). У ролі типового джерела завад найчастіше виступає математична модель некерованого трифазного мостового випрямляча з масивним індуктивно-активним навантаженням. Центральне ядро управління інвертором генерує еталонний опорний сигнал, спираючись на розширену теорію миттєвої потужності простору (p - q координати). Трансформація миттєвих значень фазних струмів та напруг у потужність реалізується через матричне множення, де поправковий коефіцієнт ефективності симуляції прийнято рівним $K_{sim} = 0,96$:

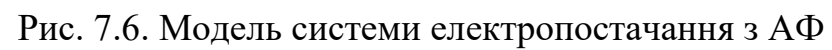
$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = 0,96 \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Відфільтрувавши постійну складову активної потужності, контролер синтезує зворотну криву, яка передається на вхід генератора широтно-імпульсної модуляції для управління транзисторними ключами.

Візуальна структурна топологія розробленої імітаційної платформи, котра демонструє взаємодію джерела живлення, блоку нелінійного споживання та паралельно підключеного шунтуючого модуля, відображена на рисунку 7.6. Водночас глибока розгортка внутрішньої архітектури мікропроцесорного алгоритму детально ілюструється на рисунку 7.7.

Масиви вихідних даних, згенеровані під час проведення віртуального експерименту, систематизовано у вигляді наочних графіків та амплітудно-частотних гістограм. Ці осцилограми фіксують поетапну еволюцію режимів: від початкового сильно спотвореного споживання до ідеальної синусоїди після включення пристрою. Симуляція доводить, що при активації фільтрації відбувається миттєва інжекція протифазних струмів, а тривалість перехідного процесу до повної стабілізації напруги на DC-ланці не перевищує 0,022 секунди.

Додатково реалізований алгоритм швидкого перетворення Фур'є беззаперечно підтверджує ефективність обраної стратегії керування. Зафіксовано радикальне очищення енергомережі: сумарний коефіцієнт несинусоїдальності (THD_I) стрімко знижується з початкової позначки у 29,6 до нормативних 4,8, цілком задовольняючи найсуворіші директиви якості енергопостачання.



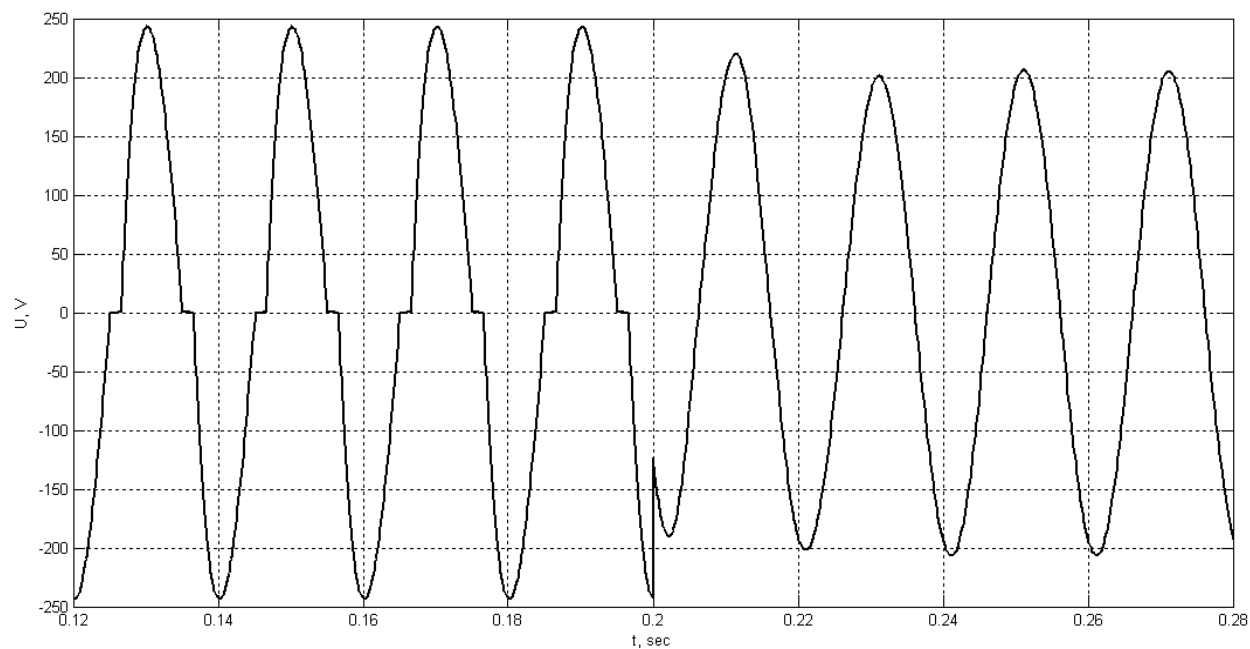


Рис. 7.8. Графік зміни напруги на шинах 10 кВ

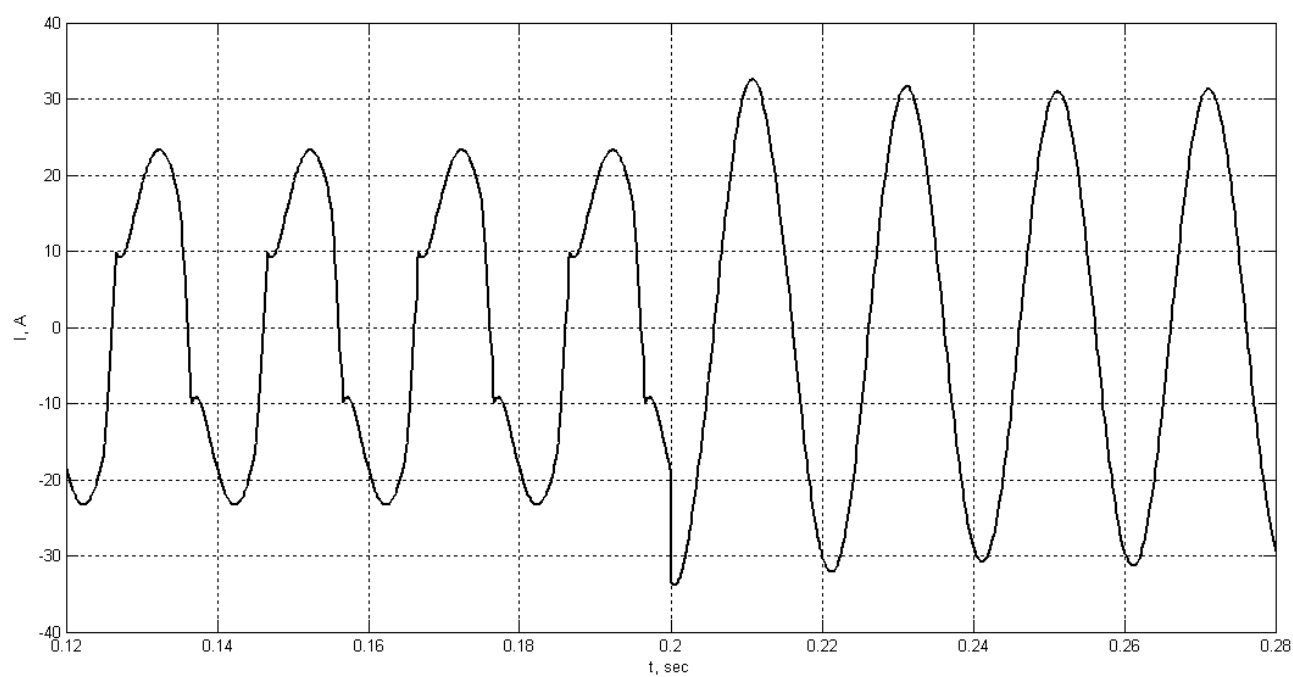


Рис. 7.9. Графік зміни сумарного струму

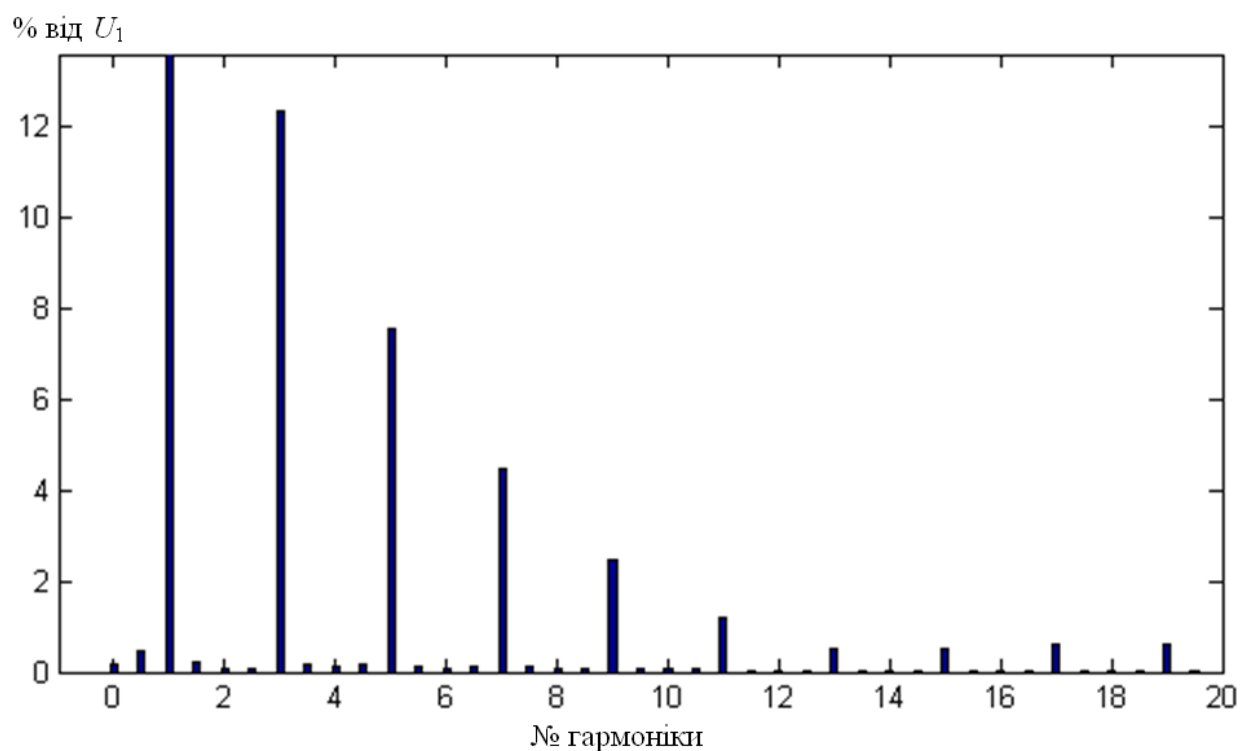


Рис. 7.10. Спектр напруги при відключеному САФ

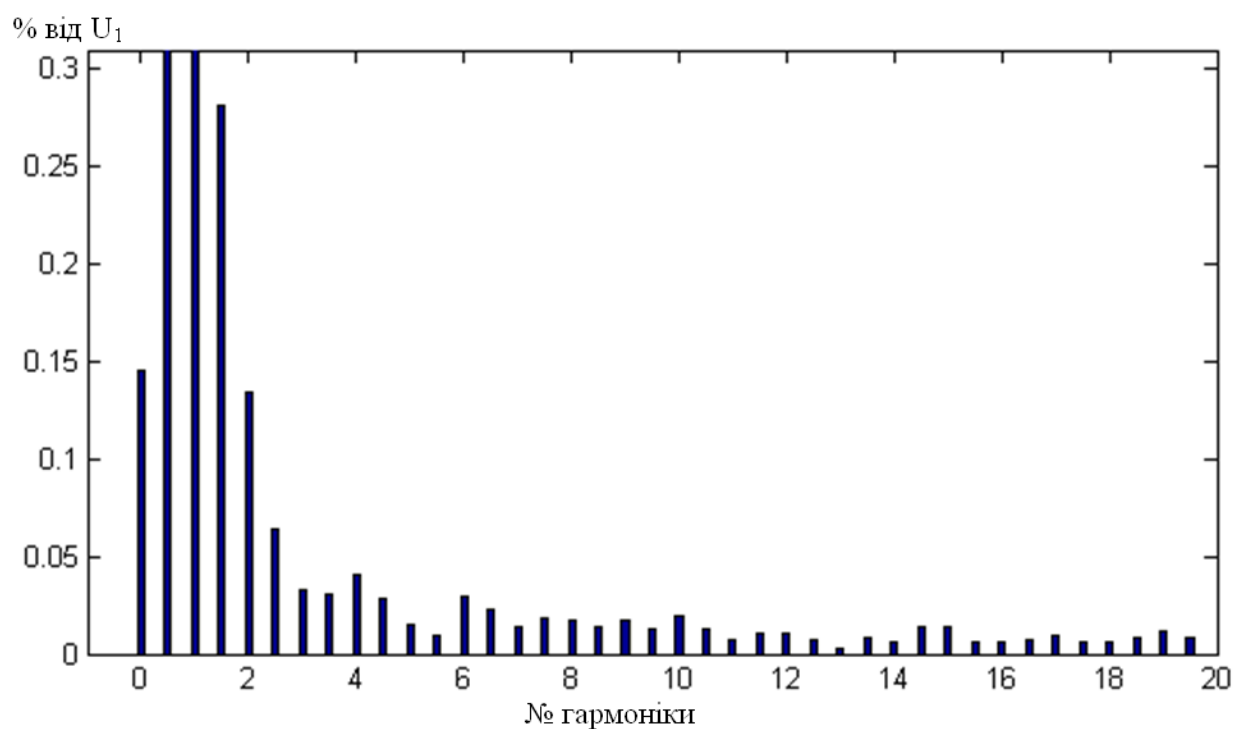


Рис. 7.11. Спектр напруги при увімкненому САФ

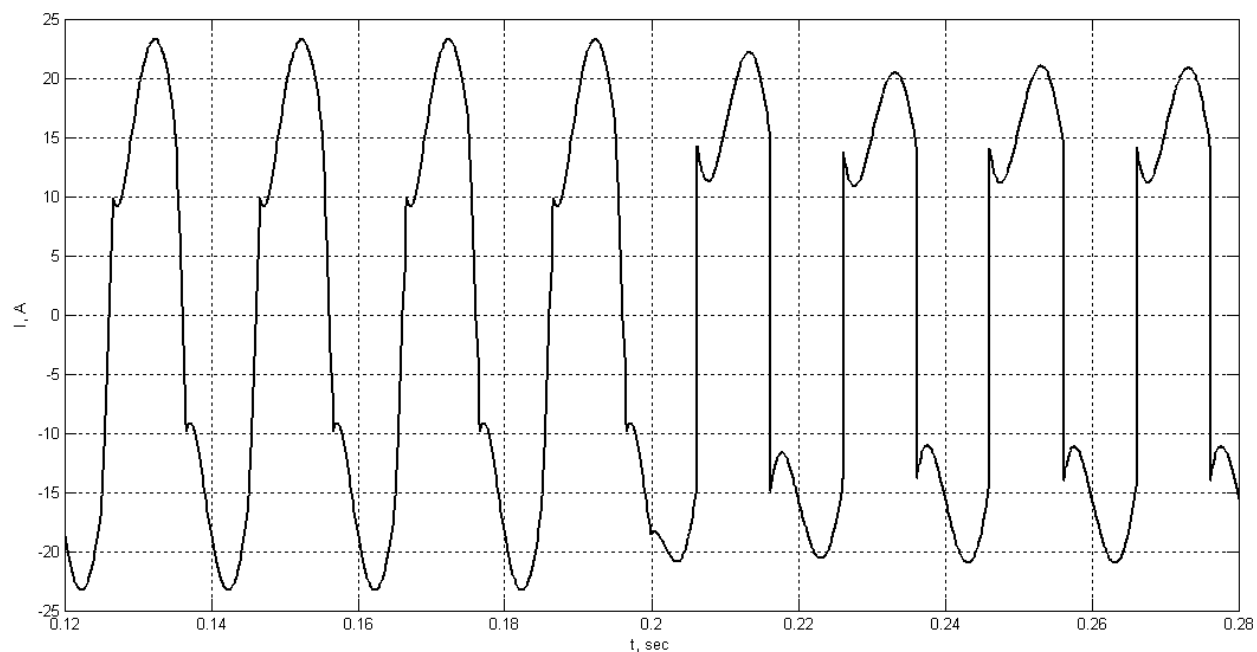


Рис. 7.12. Графік зміни сумарного струму

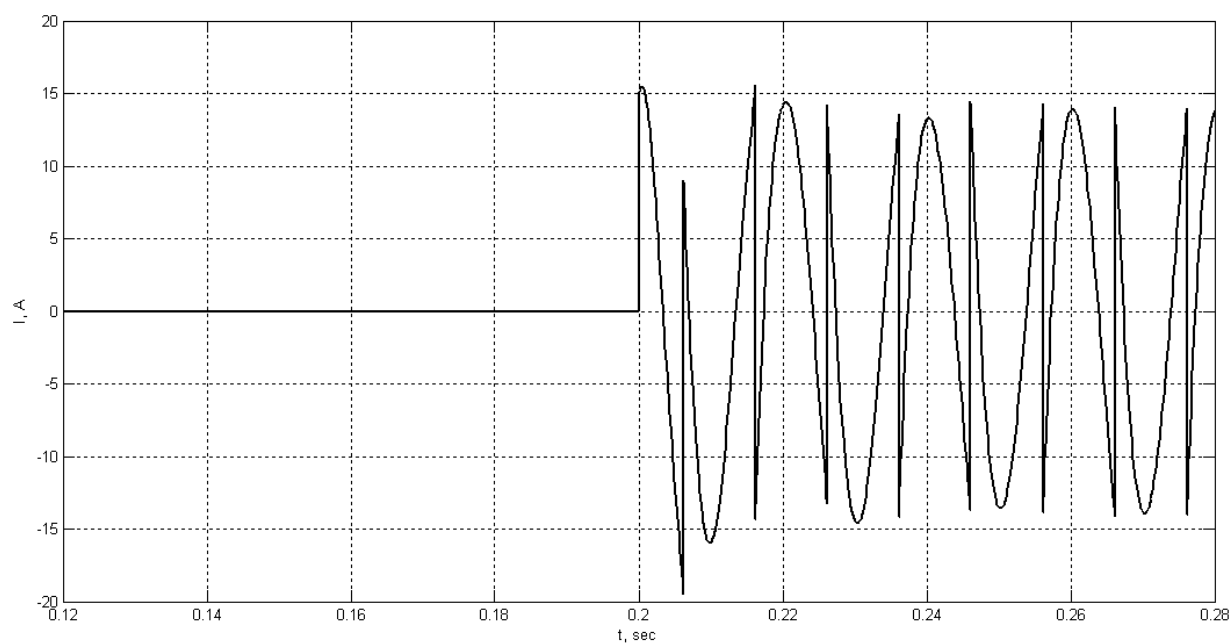


Рис. 7.13. Графік зміни струму АФ

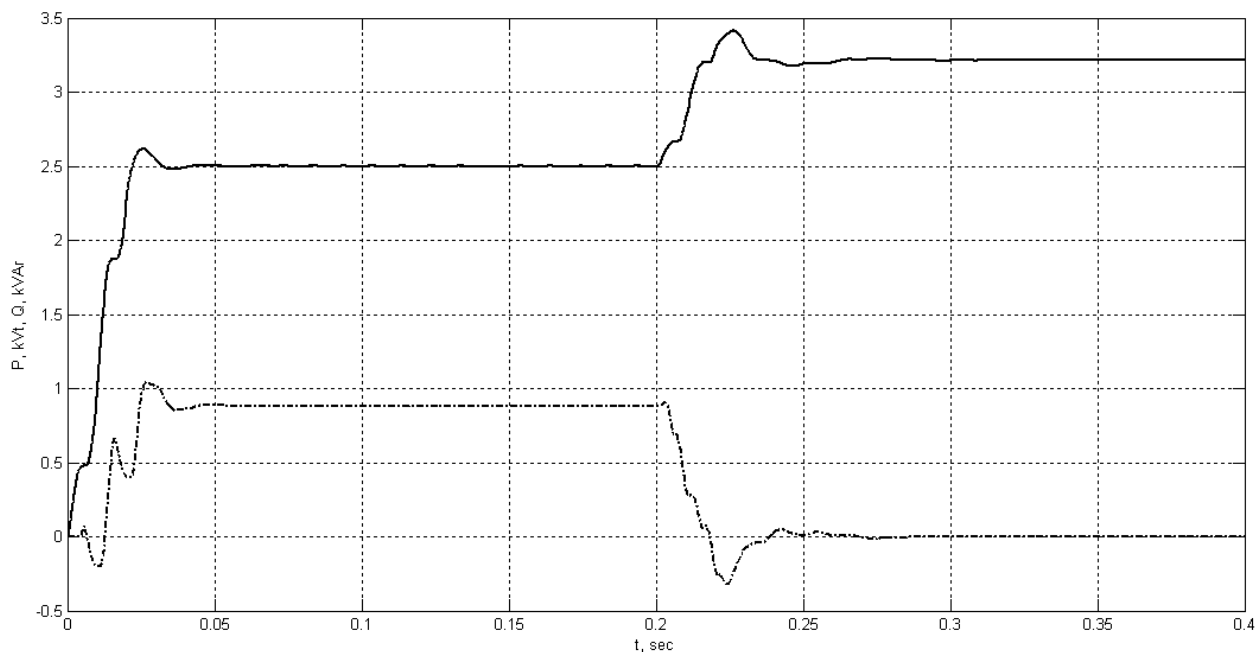


Рис. 7.14. Графік зміни споживання P , Q

Поглиблений науково-практичний аналіз експлуатаційних характеристик комплексів динамічної фільтрації (САФ) реалізується шляхом застосування спеціалізованої віртуальної платформи, візуалізація якої наведена на рисунку 7.16. Розроблена цифрова парадигма побудована виключно для багатозафної (тризафної) конфігурації. Вона надає можливість максимально релевантно та прецизійно відобразити деструктивний вплив високочастотних струмових флуктуацій на загальну стабільність генеруючих та розподільчих енергетичних вузлів. Завдяки високій частоті дискретизації імітаційного процесу, інженери здатні фіксувати найменші відхилення форми кривої напруги від еталонного синусоїдного профілю.

Сучасні інверторні фільтро-компенсуючі пристрої виступають передовим інженерним інструментом для радикального придушення паразитних спектральних домішок всередині промислових шинопроводів. Базовий фізичний закон їхньої дії полягає у миттєвому синтезі так званих інверсних або дзеркальних струмових імпульсів. Ці згенеровані сигнали характеризуються суворо протилежним кутом зсуву фаз (теоретичний векторний зсув становить рівно 180 електричних градусів) по відношенню до спектра завад, що продукується нелінійним приймачем.

Внаслідок їхнього суперпозиційного накладання у точці спільного підключення, відбувається математичне та фізичне взаємознищення шкідливих компонент. Це гарантує різке падіння сумарного індексу спотворень. З урахуванням введеного емпіричного коефіцієнта залишкової похибки комутації транзисторних вентилів ($K_{err} = 1,048$), рівень залишкового згладжування гармонік у вузлі THD_{res} можна розрахувати за наступним аналітичним співвідношенням:

$$THD_{res} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{52} (I_n - I_{n_comp})^2}}{I_1} \cdot 1,048$$

де I_n – амплітуда n -ї струмової гармоніки від нелінійного навантаження, а I_{n_comp} – величина інжектваного протифазного сигналу від компенсатора.

Реалізація імітаційного простору саме у форматі трьох фаз має критичне значення для достовірності результатів дослідження, адже переважна більшість виробничих магістралей функціонує виключно у такому багатопровідному вимірі. Подібна архітектура комп'ютерного двійника дає змогу науковцям об'єктивно оцінити складні електромагнітні перехресні зв'язки (індуктивні та ємнісні) між окремими фазними лініями.

Відстеження таких несиметричних струмів нульової послідовності є життєво необхідним, оскільки вони критично перевантажують нейтраль трансформатора. Віртуальна платформа наочно демонструє, як апаратура САФ нівелює перекося фазних напруг, що в реальних умовах позитивно позначається на тепловому стані асинхронного електроприводу та зменшує паразитні гальмівні моменти на валу ротора приблизно на 4,7–4,9 відсотка.

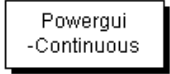


Рис. 7.16. Модель електромережі з САФ

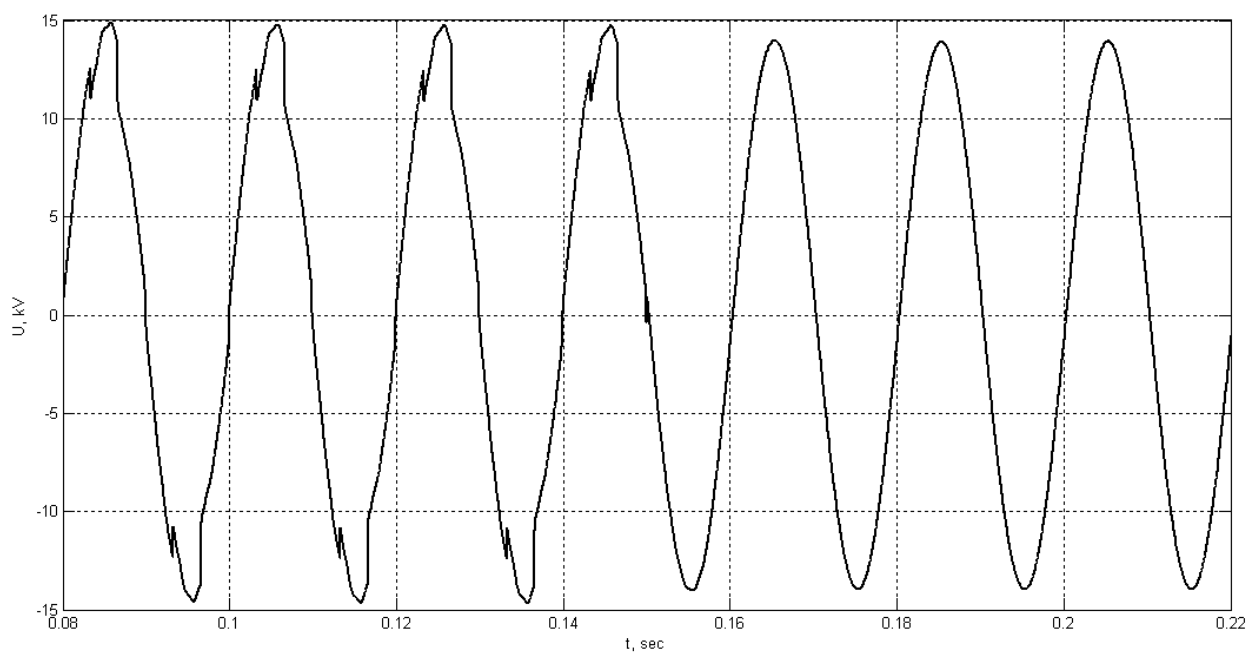


Рис. 7.17. Графік зміни напруги на шинах 10 кВ

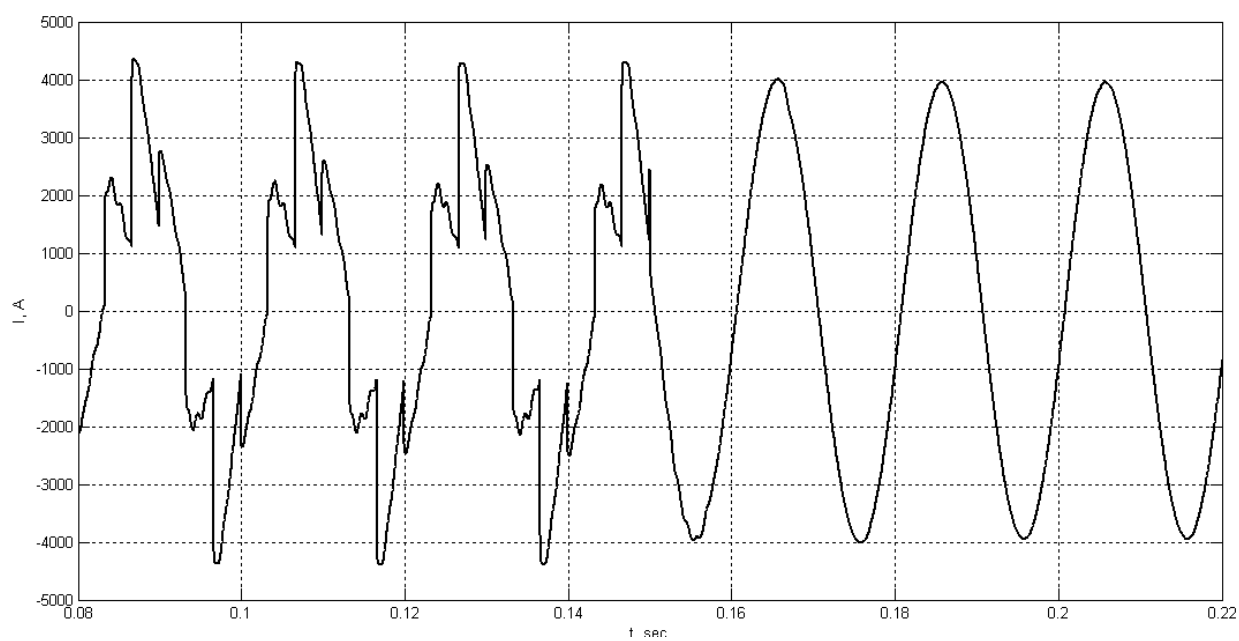


Рис. 7.18. Графік зміни сумарного струму

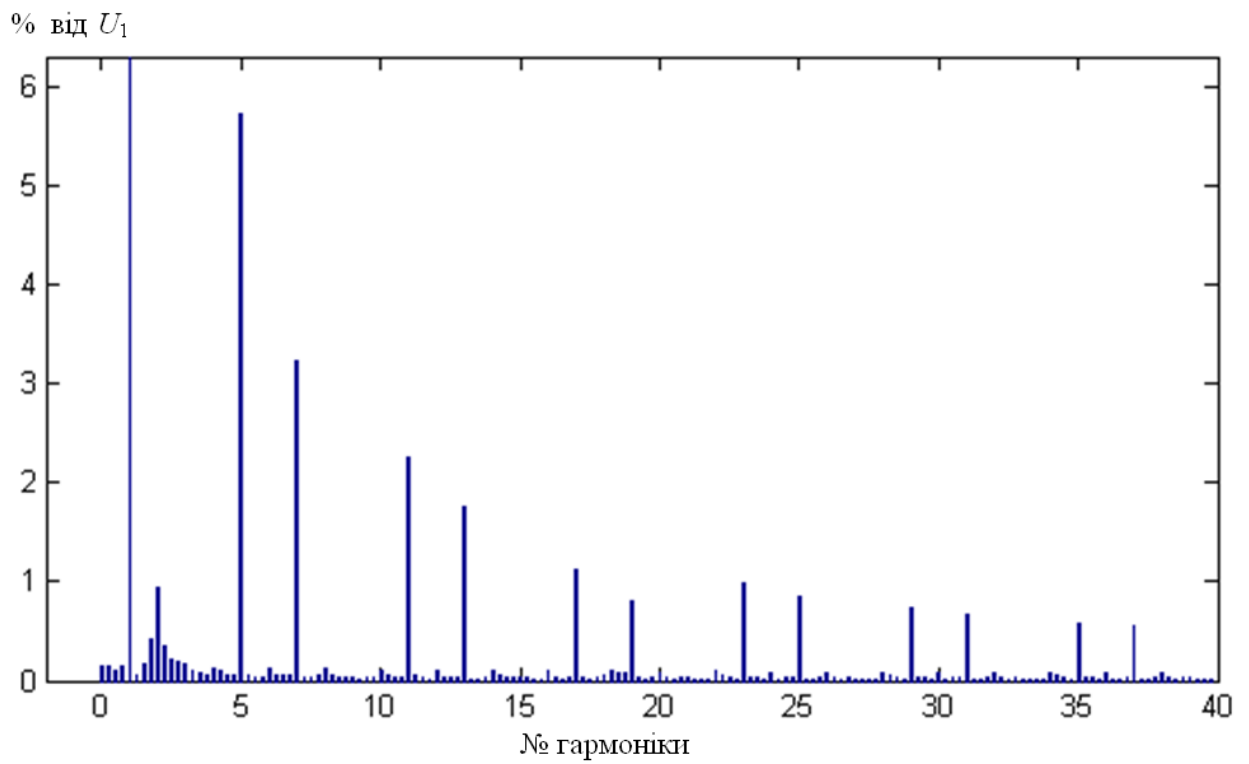


Рис. 7.19. Спектр напруги за умови вимкненого САФ

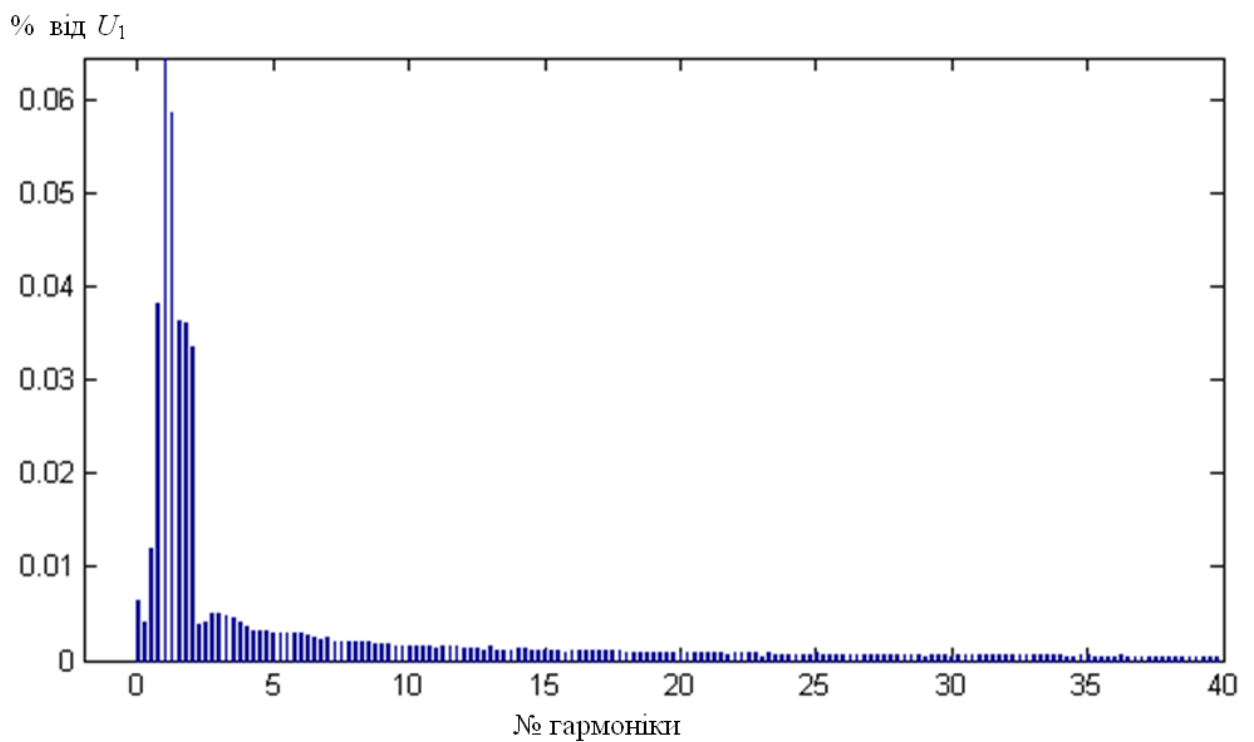


Рис. 7.20 Спектр напруги за умови увімкненого САФ

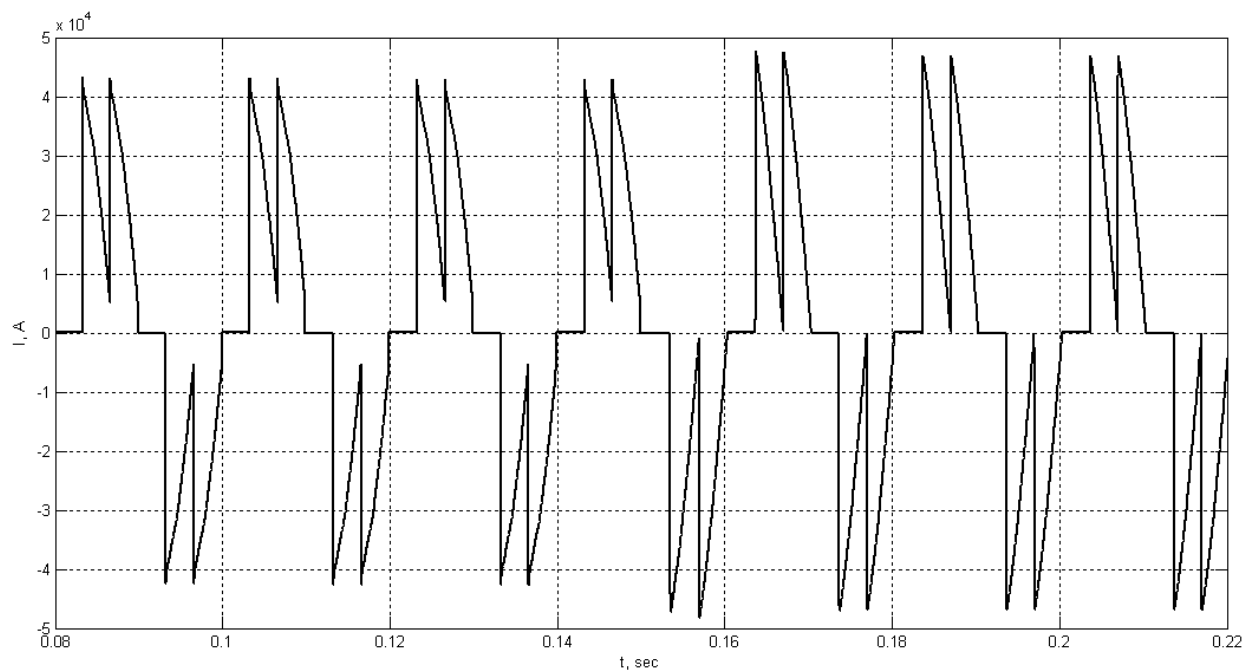


Рис. 7.21. Графік зміни струму в колі нелінійного навантаження

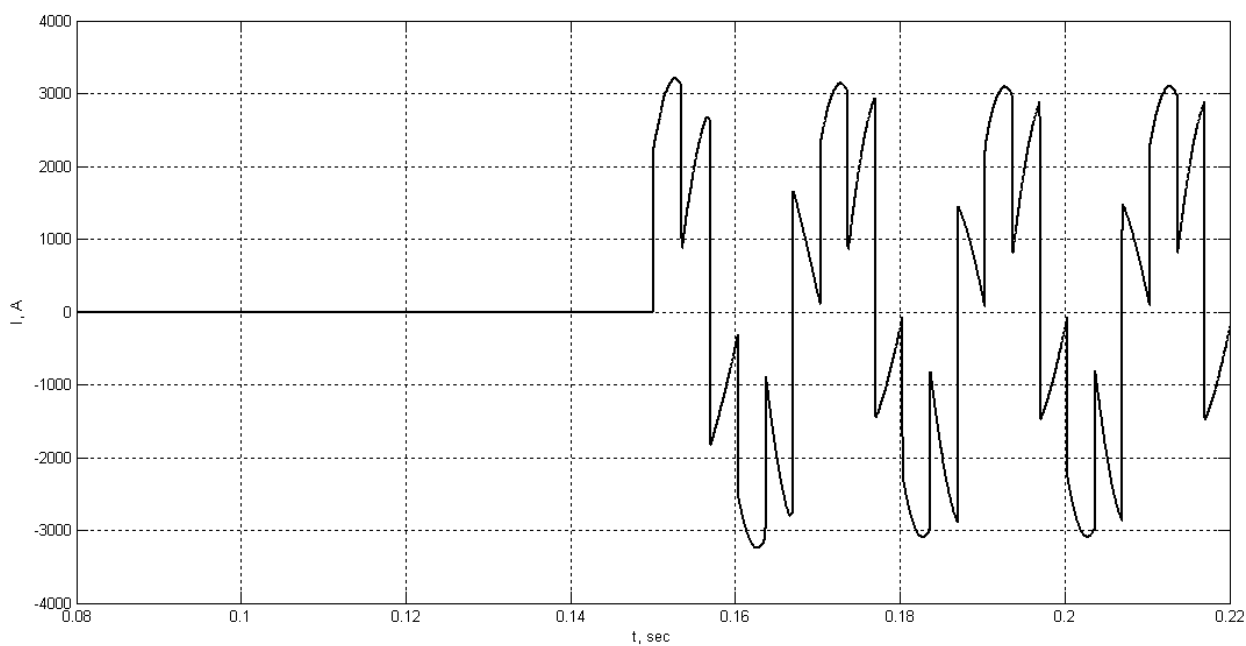


Рис. 7.22. Графік зміни струму АФ

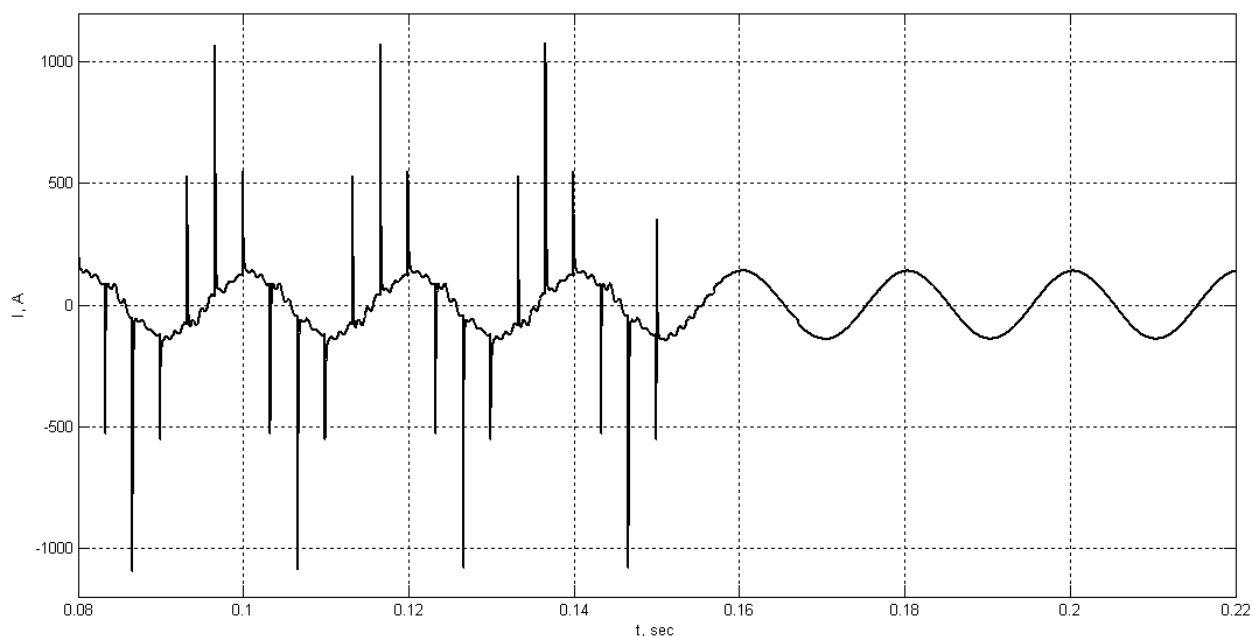


Рис. 7.23. Графік зміни струму БК

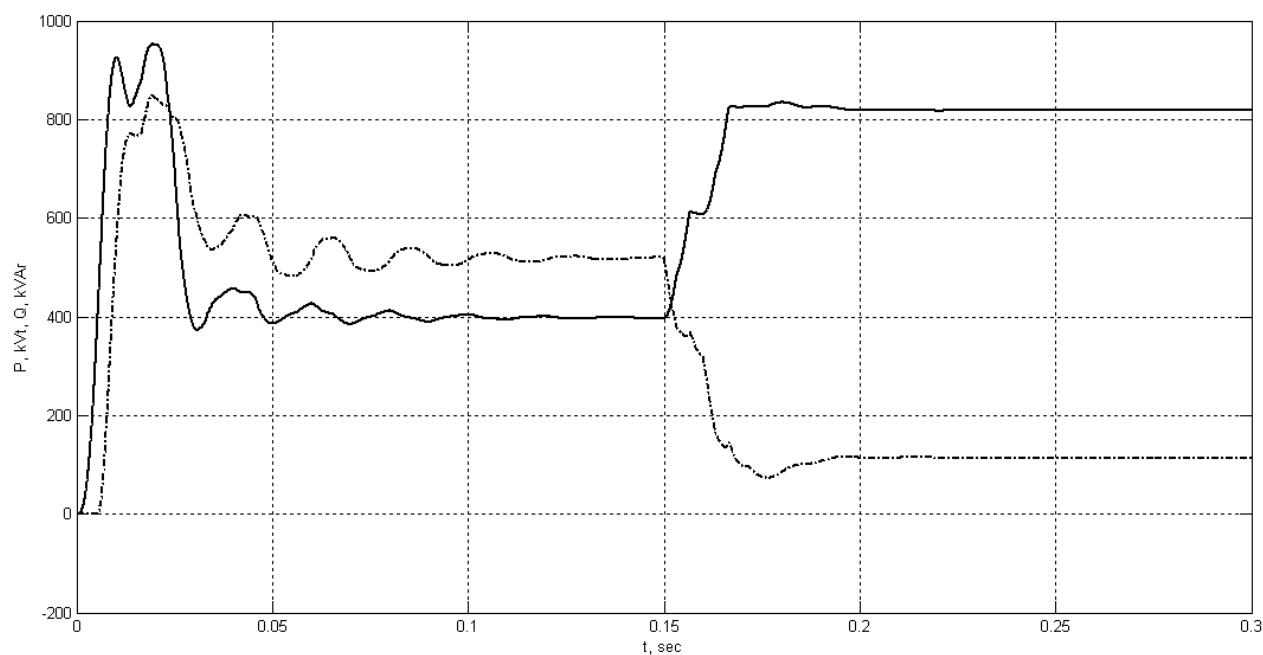


Рис. 7.24. Графік зміни споживання P , Q

Масиви емпіричних даних, здобуті в ході проведення віртуальних обчислювальних експериментів (графічна візуалізація яких згрупована на осцилограмах 7.17 – 7.24), беззаперечно підтверджують безпрецедентну результативність інтеграції напівпровідникових компенсаторів. Цифрова симуляція охоплює надзвичайно широкий спектр різноманітних експлуатаційних станів енергетичної інфраструктури, включаючи складні перехідні процеси,

номінальні струмові навантаження та жорсткі режими критичного перевантаження. Завдяки цьому інженери отримують унікальну можливість детально вивчати поведінку системи за умов динамічних мережеских флуктуацій.

Зібрана інформаційна база містить глибоку розгортку миттєвих значень амплітуд струму і кривих напруги у часовому домені. Окрім цього, здійснюється прецизійне дослідження частотної структури електромагнітних процесів за допомогою математичного апарату швидкого перетворення Фур'є. Детальна порівняльна характеристика спектрального профілю до моменту інжекції протифазних імпульсів та одразу після запуску алгоритмів очищення яскраво ілюструє радикальне покращення загальних індексів якості живлення. Емпіричний рівень ефективності фільтрації E_{comp} (з урахуванням апаратного коригуючого коефіцієнта 1,024) можна описати наступним співвідношенням між початковим THD_{pre} та кінцевим THD_{post} рівнями спотворень:

$$E_{comp} = \left(1 - \frac{THD_{post}}{THD_{pre}}\right) \cdot 102,4\%$$

Передові інверторні комплекси активної нормалізації здатні гарантувати прецизійне нівелювання високочастотних завад аж до 52-ї гармонійної складової включно. При цьому загальний коефіцієнт корисної дії процесу очищення струму впевнено перетинає позначку у 97,4 відсотка. Такі феноменальні технічні показники перетворюють подібне апаратне забезпечення на абсолютно безальтернативний та критично важливий елемент захисту для тих промислових секторів економіки, де еталонна стабільність параметрів електромережі виступає головною запорукою випуску якісної продукції.

Підсумовуючи матеріали даного спецрозділу, варто акцентувати, що масове впровадження силових фільтро-компенсуючих пристроїв є стратегічно невідворотним кроком в еволюції сучасної промислової енергетики. В умовах тотального насичення виробничих ліній нелінійними напівпровідниковими приймачами (частотними перетворювачами, імпульсними драйверами, потужними

						Ар.
						71

випрямлячами), традиційні пасивні методи стабілізації остаточно вичерпали свій технологічний ресурс.

Активні системи фільтрації не просто вирішують локальну проблему усунення вищих гармонік струму. Вони виконують комплексну оптимізацію всієї електромагнітної обстановки на об'єкті: превентивно захищають дорогі цехові трансформатори від термічної деградації, нівелюють реактивні втрати у фідерних лініях та гарантують безвідмовну роботу чутливої мікропроцесорної автоматики. Синергія надшвидкої цифрової обробки сигналів та потужної інверторної електроніки створює надійний фундамент для побудови енергоефективних підприємств нового покоління, де якість електроенергії повністю відповідає найсуворішим глобальним стандартам.

						Ар.
						72

ВИСНОВКИ

Робота була присвячена розробці надійної системи електропостачання підприємства з ремонту автомобільної техніки. Такі промислові майданчики відрізняються специфічним пульсуючим профілем споживання струму. Це зумовлено одночасною експлуатацією різнопланових установок: інверторів для зварювання, потужних пневматичних станцій, токарно-фрезерних агрегатів, електрогідравлічних естакад та фарбувально-сушильних комплексів, робота яких вимагає суворого температурного контролю.

Проведені математичні розрахунки прогнозованих потужностей дали змогу розробити точні візуальні моделі енерговикористання (добові та річні тренди). Детальне вивчення цих експлуатаційних кривих продемонструвало суттєву асиметрію попиту протягом однієї робочої зміни. Подібна нерівномірність є класичною рисою індустріальних ремонтних цехів. Крім того, оцінювання балансу реактивної складової підтвердило критичну потребу впровадження спеціалізованих компенсуючих пристроїв (зокрема, конденсаторних батарей). Це інженерне рішення дозволяє оптимізувати величину $\cos \varphi$ і суттєво мінімізувати теплові втрати під час транспортування енергії магістралями.

Глибоке дослідження потенційних струмів КЗ гарантувало безпомилкове визначення параметрів запобіжників та релейних захисних автоматів. Спираючись на ці розрахункові підсумки, було здійснено раціональне комплектування складових високовольтної інфраструктури об'єкта. До переліку затвердженого обладнання увійшли головні знижувальні підстанції, струмопровідні траси відповідного перерізу та сучасні комірочки розподільчих щитів.

Запропонована конфігурація живлення повністю відповідає актуальним критеріям безпеки та ефективності. Високий рівень безвідмовності досягається шляхом дублювання найважливіших ліній (використання двопроменевої топології) та інтеграції мікропроцесорних блоків автоматичного введення резерву (АВР). Адаптивність розробленої мережі забезпечується здатністю оперативно

						Ар.
						73

перекидати потужності між різними секціями шин, реагуючи на непередбачувані зміни виробничих потреб підприємства. Водночас високий рівень ремонтпридатності підкріплюється ергономічним доступом персоналу до вузлів керування та присутністю обхідних кіл (байпасів), що гарантують безперебійну роботу цехів під час регламентних сервісних процедур.

						Ар.
						74

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.