

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

“ ____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Розробка системи електропостачання трансформаторобудівного заводу»

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ЕЕ–21ПЗ,
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Олексій КОДРИК

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

Василь ЗІНЗУРА

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

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

«_____» _____ 2025 р.

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

Кодрика Олексія Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання трансформаторобудівного заводу

Development of a power supply system for a transformer 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 03.06.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є розробка системи електропостачання трансформаторобудівного заводу. 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
1	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>03.02-19.02</i>	
2	<i>Картограма електричних навантажень</i>	<i>20.02-28.02</i>	
3	<i>Техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання</i>	<i>01.03-12.03</i>	
4	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>	<i>13.03-01.04</i>	
5	<i>Вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства</i>	<i>2.04-12.04</i>	
6	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i>	<i>13.05-01.05</i>	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>02.05-20.05</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини БКР</i>	<i>21.05-26.05</i>	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки БКР</i>	<i>27.05-02.06</i>	

Дата видачі завдання
«___» _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Василь ЗІНЗУРА

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

Олексій КОДРИК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 75 с.; 28 рис.; 21 табл.; 5 джерел

Кодрик О. О. Розробка системи електропостачання трансформаторобудівного заводу. – Рукопис.

Бакалаврська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025 рік.

Дана робота присвячена створенню комплексної системи електропостачання для підприємства з виробництва трансформаторів.

У процесі виконання дослідження проводився детальний аналіз електричних навантажень підприємства, що включав визначення встановленої потужності електроприймачів різних категорій. Особливу увагу приділено розрахунку характеристик графіків споживання електроенергії протягом робочих змін та періодів максимального завантаження виробництва.

Важливим аспектом стало дослідження режимів компенсації реактивної потужності, оскільки трансформаторобудівні підприємства характеризуються значним споживанням реактивної енергії через використання потужних електродвигунів та індукційного обладнання для термообробки сталі.

Проведено ретельний аналіз можливих аварійних режимів роботи мережі, включаючи розрахунки струмів короткого замикання на різних рівнях напруги. Це дозволило визначити необхідні параметри комутаційної та захисної апаратури.

Ключові слова: розрахункові навантаження, електрична мережа, графіки навантажень

ABSTRACT

Qualification work: 75 p.; 28 Fig.; 21 tables; 5 sources

Kodryk O. Development of a power supply system for a transformer 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, 2025.

This work is devoted to the creation of a comprehensive power supply system for a transformer manufacturing enterprise.

In the process of carrying out the research, a detailed analysis of the electrical loads of the enterprise was carried out, which included determining the installed capacity of electrical receivers of various categories. Particular attention was paid to calculating the characteristics of electricity consumption schedules during work shifts and periods of maximum production load.

An important aspect was the study of reactive power compensation modes, since transformer manufacturing enterprises are characterized by significant consumption of reactive energy due to the use of powerful electric motors and induction equipment for heat treatment of steel.

A thorough analysis of possible emergency modes of network operation was carried out, including calculations of short-circuit currents at different voltage levels. This allowed determining the necessary parameters of switching and protective equipment.

Keywords: design loads, electrical network, load graphs

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	8
1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ	8
1.2 Освітлювальні електричні навантаження.....	9
1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ	10
1.4 Графіки електричних навантажень заводу	15
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	20
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ	22
3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....	22
3.2 Схема внутрішнього електропостачання	25
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	27
4.1 Баланс реактивної потужності.....	27
4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв	28
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. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	45
7.1 Пасивні фільтри вищих гармонік.....	47
7.2 Системи активної фільтрації для усунення гармонійних спотворень.....	50
7.3 Трифазні широтно-імпульсні перетворювачі із джерелами напруги та струму	52
7.4 Низьковольтні безтрансформаторні комбіновані активні системи фільтрації. 61	
7.5 Аналіз та порівняльні дослідження активних і комбінованих силових компенсаторів для усунення мережевих гармонік.....	64
ВИСНОВКИ	74
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>						
<i>Розроб.</i>	<i>Кодрик О.О.</i>				Розробка системи електропостачання трансформаторобудівного заводу Development of a power supply system for a transformer plant	<i>Лім.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>		
<i>Перев.</i>	<i>Зінзура В.В.</i>						6	75		
<i>Н. контр.</i>	<i>Зінзура В.В.</i>					ЦНТУ				
<i>Затвер.</i>	<i>Плешков П.Г.</i>					<i>гр. ЕЕ-21ПЗ</i>				

ВСТУП

Робота зосереджена на створенні комплексної електроенергетичної системи для підприємства з виробництва трансформаторів.

Варто підкреслити, що споживання електроенергії на виробничих об'єктах демонструє стійку тенденцію до збільшення. Це пов'язано з активним впровадженням інноваційних технологічних рішень та розширенням автоматизованих процесів у виробничих циклах. Сучасне обладнання четвертого покоління характеризується високою енергоємністю та потребує стабільного електропостачання для ефективної експлуатації.

Трансформаторобудівна галузь має особливі енергетичні вимоги через специфіку виробничих процесів. Виготовлення силових трансформаторів передбачає використання потужних печей для сушіння та просочення обмоток, преса для формування магнітопроводів, а також складного випробувального устаткування для контролю якості готової продукції. Кожен з цих етапів потребує значних енергетичних ресурсів.

Сучасні тенденції в енергетиці промислових підприємств включають впровадження розумних систем управління споживанням, використання відновлюваних джерел енергії та технологій енергозбереження. Інтеграція систем моніторингу дозволяє в режимі реального часу відстежувати споживання електроенергії та оптимізувати навантаження.

Особливої уваги заслуговує питання якості електроенергії на трансформаторобудівних заводах, оскільки навіть незначні коливання напруги можуть призвести до браку в готовій продукції та додаткових витрат на виправлення дефектів.

										Арк.
										7
Вим.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата						

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	N спож шт	P одн.сп.		P сум, кВт	m	K _v	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		n _{эф}	K _p	Розрах навант.				
		min, кВт	max, кВт						P зм, кВт	Q зм, квар			P розр, кВт	Q розр, квар	S розр, кВА		
ТП 1, 2																	
Головний корпус																	
силове:	160	5	40	3900	8,0	0,40	0,85	0,62	1560	966,8	160	1,10	1715,22	966,8	1968,93		
освітлювальне:									32,9				12,5	7,75			
Всього:									1592,9	966,8			1727,72	974,55	1983,62		
Зварювальний корпус																	
силове:	160	1,7	30	3640	17,7	0,35	0,70	1,02	1274	1299,74	160	1,11	1417,38	1299,74	1923,09		
освітлювальне:									27,4				9,11	9,29			
Всього:									1301,4	1299,74			1426,49	1309,03	1936,09		
Апаратний цех																	
силове:	100	5	100	2080	20,0	0,40	0,75	0,88	832	733,75	42	1,21	1006,46	733,75	1245,53		
освітлювальне:									27,06				10,28	9,07			
Всього:									859,06	733,75			1016,74	742,82	1259,18		
Всього по ТП 1, 2:																	
силове:	420	1,7	100	9620	58,8	0,38	0,77	0,82	3666	3000,29	192	1,09	4011,38	3000,29	5009,28		
освітлювальне:									87,36				31,89	26,11			
БК 0,4 кВ										-1513,5				-1513,5			
Всього на шини 0,4 кВ ТП 1, 2:									3753,36	1486,79			4043,27	1512,9	4317,05		
Втрати в трансформаторах:													43,23	243,36			
Кількість трансформаторів: 4																	
Номинальна потужність, кВА: 1600																	
Коефіцієнт завантаження: K _з = 0,67																	
Всього на шини 10 кВ ТП 1, 2:													4086,5	1756,26	4447,91		
ТП 3																	
Киснева станція																	
силове:	15	5	80	136	16	0,6	0,7	1,02	81,6	83,25	3	1,66	135,35	91,58	163,42		
освітлювальне:									10,94				6,24	6,36			
Всього:									92,54	83,25			141,59	97,94	172,16		
Гараж																	

Продовження табл. 1.3

Назва	N спож шт	P одн.сп.		P сум, кВт	m	K _v	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		n _{эф}	K _p	Розрах навант.		
		min, кВт	max, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
сілове:	13	3	7	63	2,3	0,3	0,65	1,17	18,9	22,1	13	1,53	28,92	22,1	36,4
освітлювальне:									15,48				4,41	5,16	
Всього:									34,38	22,1			33,33	27,26	43,06
Механоскладальний цех															
сілове:	170	5	250	6154	50	0,25	0,65	1,17	1538,5	1798,71	49	1,28	1976,01	1798,71	2672,07
освітлювальне:									44,47				10,56	12,34	
Всього:									1582,97	1798,71			1986,57	1811,05	2688,19
Територія заводу															
освітлювальне:									103				10,3	2,09	
Всього:									103	0			10,3	2,09	10,51
Всього по ТП 3:															
сілове:	198	3	250	6353	83,3	0,26	0,65	1,16	1639	1904,06	51	1,27	2084,26	1904,06	2823,05
освітлювальне:									173,89				31,51	25,95	
БК 0,4 кВ										-1472				-1472	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 3:									1812,89	432,06			2115,77	458,01	2164,78
Врати в трансформаторах													21,7	122,15	
Кількість трансформаторів: 2															
Номинальна потужність, кВА: 1600															
Коефіцієнт завантаження: Kз = 0,68															
Всього на шинах 10 кВ ТП 3:													2137,47	580,16	2214,81
ТП 4															
Котельня															
сілове:	25	3	50	907	16,7	0,6	0,75	0,88	544,2	479,94	25	1,17	635,6	479,94	796,45
освітлювальне:									13,42				7,65	6,75	
Всього:									557,62	479,94			643,25	486,69	806,62
Деревообробний цех															
сілове:	20	1	15	151	15	0,2	0,65	1,17	30,2	35,31	20	1,55	46,94	35,31	58,74
освітлювальне:									25,92				4,92	5,75	
Всього:									56,12	35,31			51,86	41,06	66,15
Лаковарочний цех															

Продовження табл. 1.3

Назва	N спож шт	P одн.сп.		P сум, кВт	m	K _v	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		n _{эф}	K _p	Розрах навант.		
		min, кВт	max, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
слово:	30	5	250	2900	50	0,3	0,7	1,02	870	887,58	23	1,38	1200,53	887,58	1493,01
освітлювальне:									28,51				8,13	8,29	
Всього:									898,51	887,58			1208,66	895,87	1504,47
Всього по ТП 4:															
слово:	75	1	250	3958	250	0,36	0,72	0,97	1444,4	1402,83	32	1,27	1829,34	1402,83	2305,3
освітлювальне:									67,85				20,7	20,79	
БК 0,4 кВ										-332				-332	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 4:									1512,25	1070,83			1850,04	1091,62	2148,09
Втрати в трансформаторах:													21,47	120,91	
Кількість трансформаторів: 2															
Номинальна потужність, кВА: 1600															
Коефіцієнт завантаження: Kз = 0,67															
Всього на шинах 10 кВ ТП 4:													1871,51	1212,53	2229,97
ТП 5															
Ізоляційний корпус															
слово:	50	1	30	716	30	0,6	0,9	0,48	429,6	208,06	48	1,12	479,45	208,06	522,65
освітлювальне:									18,77				10,7	5,18	
Всього:									448,37	208,06			490,15	213,24	534,53
Заготівельно-звар цех															
слово:	160	3	200	4772	66,7	0,3	0,75	0,88	1431,6	1262,55	48	1,25	1789,85	1262,55	2190,34
освітлювальне:									29,38				8,37	7,38	
Всього:									1460,98	1262,55			1798,22	1269,93	2201,44
Всього по ТП 5:															
слово:	210	1	200	5488	200	0,34	0,78	0,79	1861,2	1470,61	55	1,21	2251,1	1470,61	2688,89
освітлювальне:									48,15				19,07	12,56	
БК 0,4 кВ										-1654				-1654	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 5:									1909,35	-183,39			2270,17	-170,83	2276,59
Втрати в трансформаторах:													23,3	130,68	
Кількість трансформаторів: 2															

Продовження табл. 1.3

Назва	N спож шт	P одн.сп.		P сум, кВт	m	K _v	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		n _{эф}	K _p	Розрах навант.			
		мін, кВт	мак, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА	
Номінальна потужність, кВА: 1600																
Коефіцієнт завантаження: K _з = 0,71																
Всього на шинах 10 кВ ТП 5:																
Всього по об'єкту																
силowe:	903	1	250	25419	250	0,34	0,95	0,33	8610,6	2806,29	203	1	8610,6	2806,29	9056,36	
освітлювальне:									377,25				103,17	85,41		
Всього:									8987,85	2806,29			8713,77	2891,7	9181,05	
Потужність КП 0,4 кВ:										-4971,5				-4971,5		
Втрати в трансформаторах:													109,71	617,09		
Всього по об'єкту:													8823,48	3508,79	9495,54	
Високвольтне навантаження																
АД 1- АД4	4	800	800	3200		0,75	0,9	0,48	2400	1162,37			2400	1162,37	2666,67	
Всього високовольтного навантаження:													2400	1162,37	2666,67	
Всього по об'єкту 10 кВ:													11223,48	4671,16	12156,73	
КП 10 кВ:														-3600		
Всього 10 кВ з КП:													11223,48	1071,16	11274,48	
tgφ = 0,095																

Таблиця 1.5. Результати розрахунків доб. графіків

№	Зим. дні						Літн. дні					
	Роб. дні			Вих. і дні			Роб. дні			Вих. і дні		
	$P_{др}$ кВт	$Q_{др}$ квар	$S_{др}$ кВА	$P_{др}$ кВт	$Q_{др}$ квар	$S_{др}$ кВА	$P_{др}$ кВт	$Q_{др}$ квар	$S_{др}$ кВА	$P_{др}$ кВт	$Q_{др}$ квар	$S_{др}$ кВА
1	5403	658	5443	4953	1148	5084	4592	560	4626	4210	976	4322
2	5403	743	5454	4953	1148	5084	4592	631	4635	4210	976	4322
3	4615	692	4667	4953	1148	5084	3923	588	3967	4210	976	4322
4	4615	658	4662	4953	1148	5084	3923	560	3963	4210	976	4322
5	5966	844	6025	4953	1148	5084	5071	717	5121	4210	976	4322
6	5966	776	6016	4953	1148	5084	5071	660	5114	4210	976	4322
7	9342	979	9393	4953	1148	5084	7941	832	7984	4210	976	4322
8	10243	1283	10323	4953	1148	5084	8707	1090	8775	4210	976	4322
9	11256	1688	11382	2814	861	2943	9568	1435	9675	2392	732	2501
10	11256	1688	11382	2814	861	2943	9568	1435	9675	2392	732	2501
11	10243	1198	10313	2814	861	2943	8707	1019	8766	2392	732	2501
12	9005	1030	9064	2814	861	2943	7654	875	7704	2392	732	2501
13	9680	1249	9760	2814	861	2943	8228	1062	8296	2392	732	2501
14	10468	1249	10542	2814	861	2943	8898	1062	8961	2392	732	2501
15	11256	1367	11339	2814	861	2943	9568	1162	9638	2392	732	2501
16	11256	1249	11325	2814	861	2943	9568	1062	9627	2392	732	2501
17	9680	1334	9771	2814	861	2943	8228	1133	8306	2392	732	2501
18	9117	1080	9181	4953	1148	5084	7750	918	7804	4210	976	4322
19	6754	760	6797	4953	1148	5084	5741	646	5777	4210	976	4322
20	6416	912	6480	4953	1148	5084	5454	775	5509	4210	976	4322
21	5178	810	5241	4953	1148	5084	4401	689	4455	4210	976	4322
22	5628	827	5688	4953	1148	5084	4784	703	4835	4210	976	4322
23	5628	692	5670	4953	1148	5084	4784	588	4820	4210	976	4322
24	5403	743	5454	4953	1148	5084	4592	631	4635	4210	976	4322

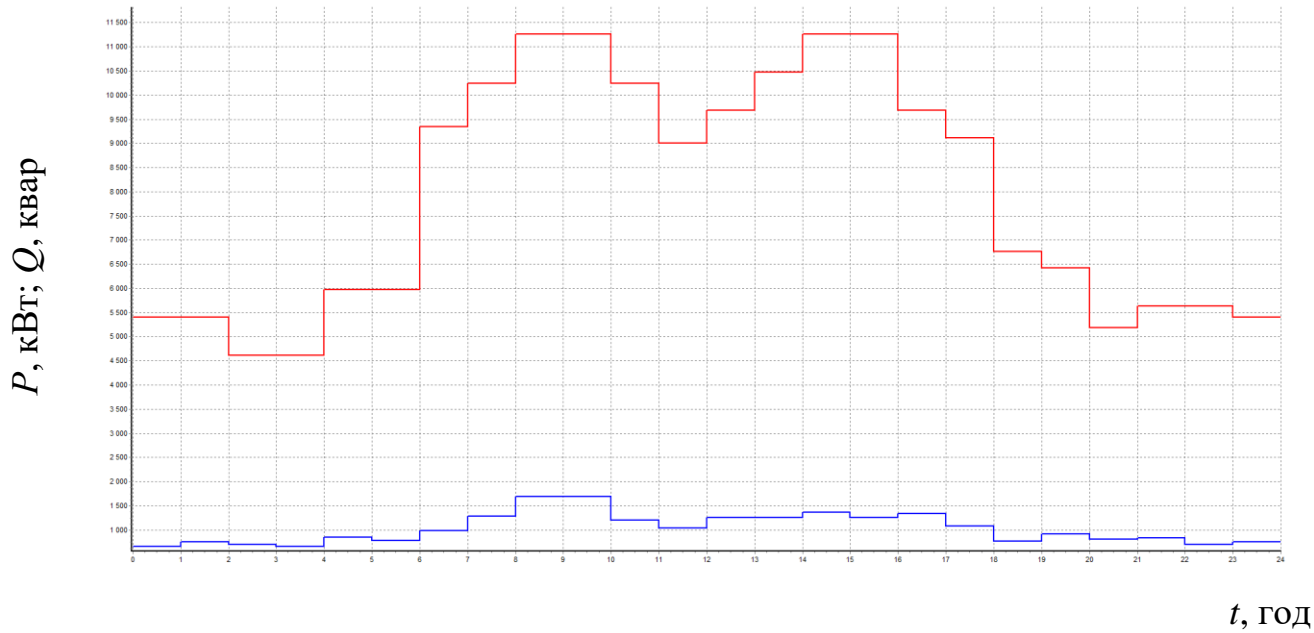


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

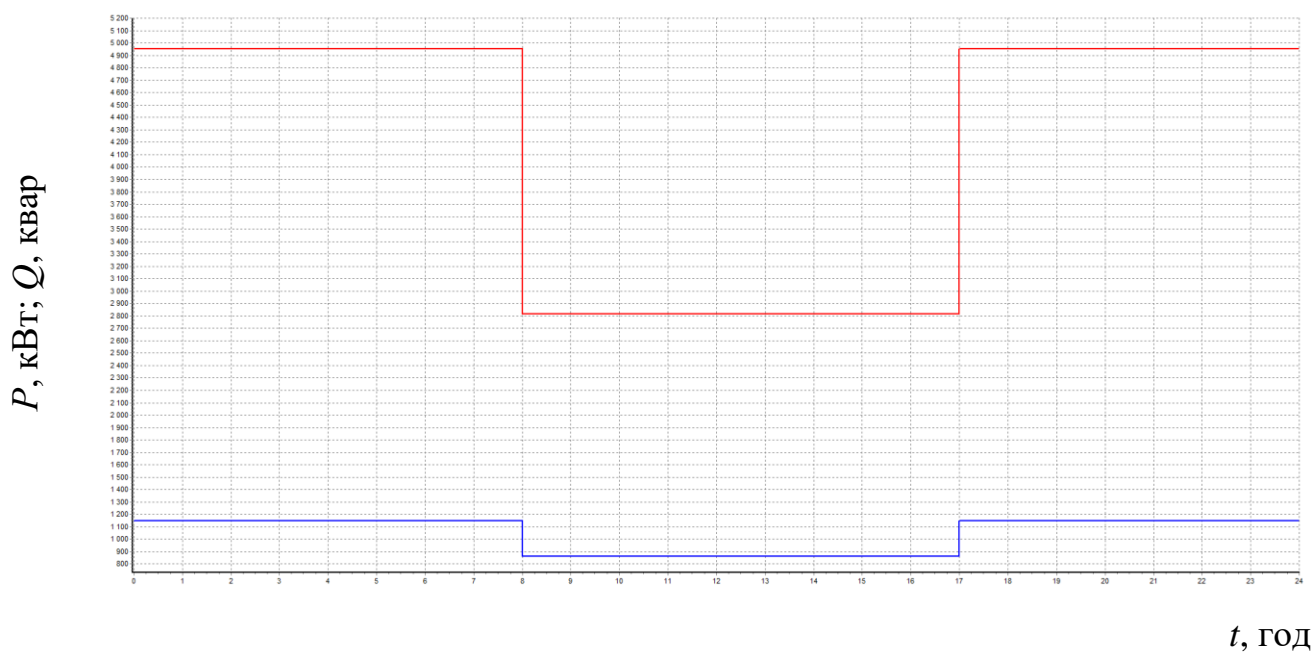


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (з.в.)

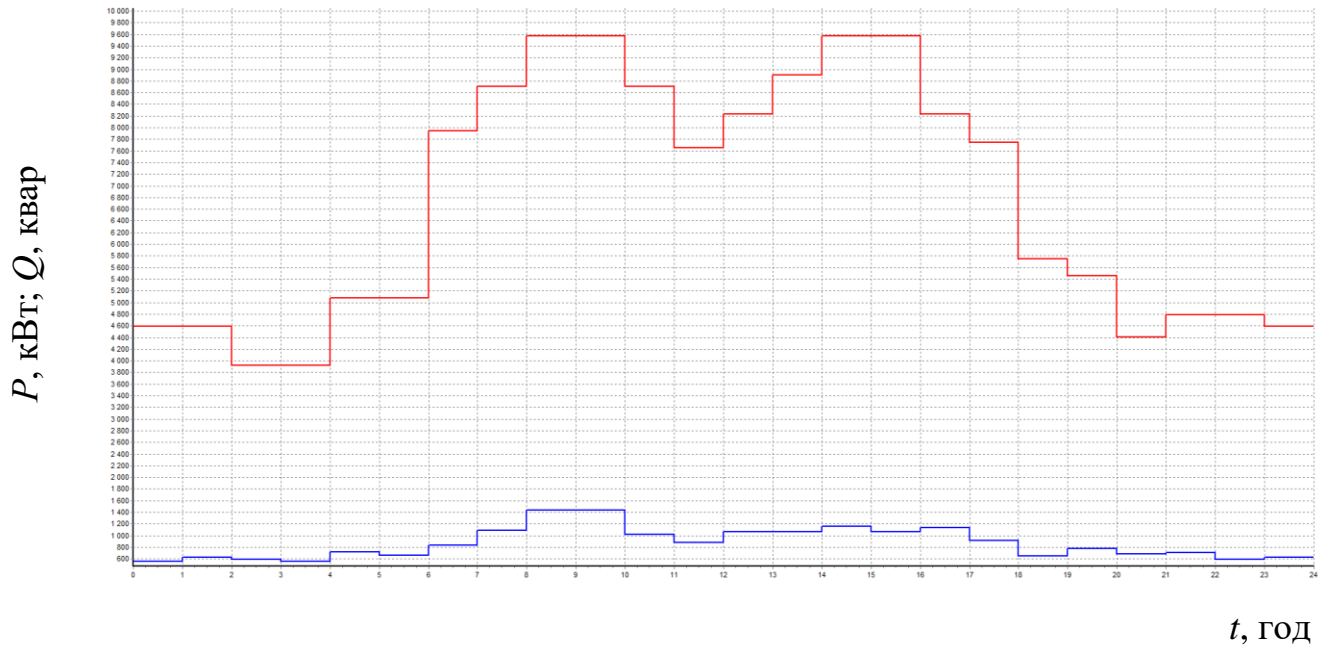


Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

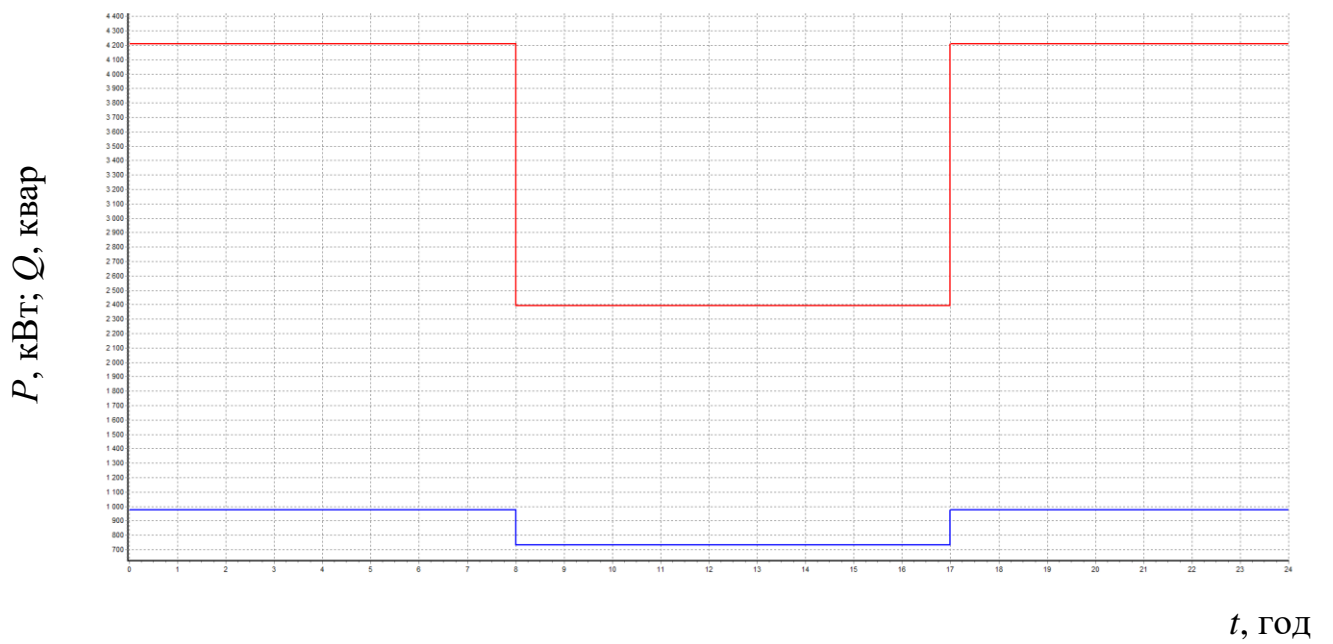


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

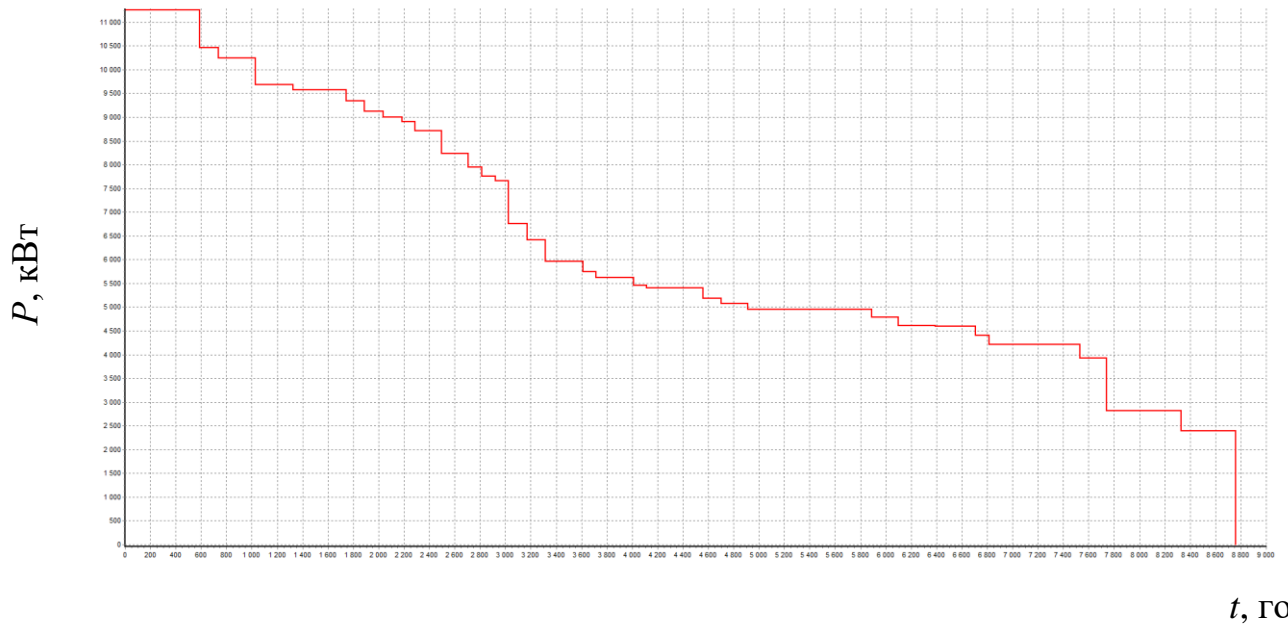


Рис. 1.5. Річний графік за тривалістю

Таблиця 1.6. Результати розрахунку графіків

№	Назва параметру	Знач.	Од. вим.
1	$S_{\text{розр}}$	11381,87	МВА
2	$W_{\text{зим.роб.}}$	27897219	кВт·год
3	$V_{\text{зим.роб.}}$	3602823	квар·год
4	$W_{\text{зим.вих.}}$	6475365	кВт·год
5	$V_{\text{зим.вих.}}$	1622985	квар·год
6	$W_{\text{літн.роб.}}$	16937865	кВт·год
7	$V_{\text{літн.роб.}}$	2187465	квар·год
8	$W_{\text{літн.вих.}}$	4064544	кВт·год
9	$V_{\text{літн.вих.}}$	1018944	квар·год
10	$W_{\text{річн}}$	55374993	кВт·год
11	$V_{\text{річн}}$	8432217	квар·год
12	$T_{\text{м}}$	4921,277	год
13	$\tau_{\text{м}}$	3325,413	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розрахунок картограми головного корпусу:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_{\text{осв}} + P_{\text{сил}}}{\pi l}} = \sqrt{\frac{12,5 + 1715,22}{3,14 \cdot 0,2}} = 52,44 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}} \cdot 360}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{12,5 \cdot 360}{1715,22 + 12,5} = 2,6^\circ$$

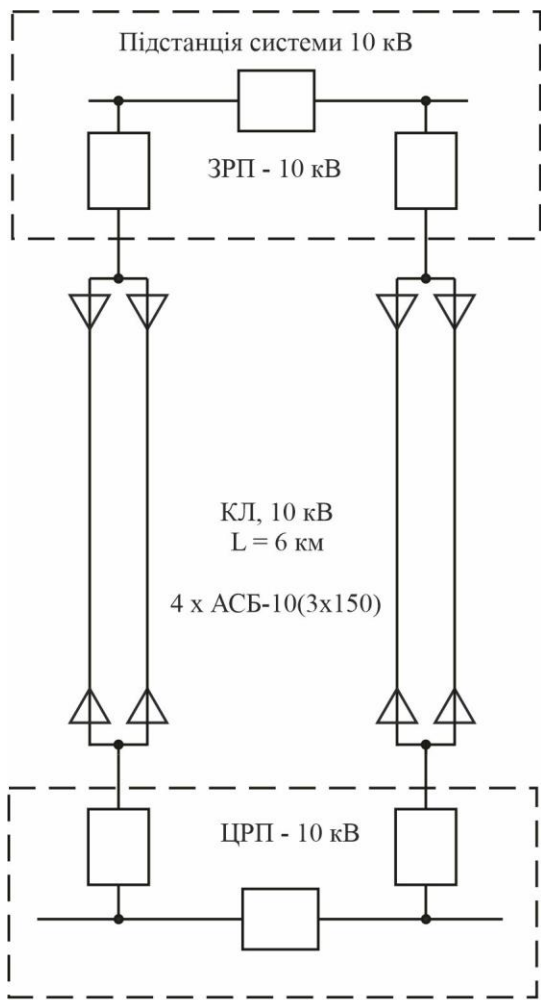
Центр електричних навантажень, м:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m X_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{55632,58}{1727,72} = 32,2$$

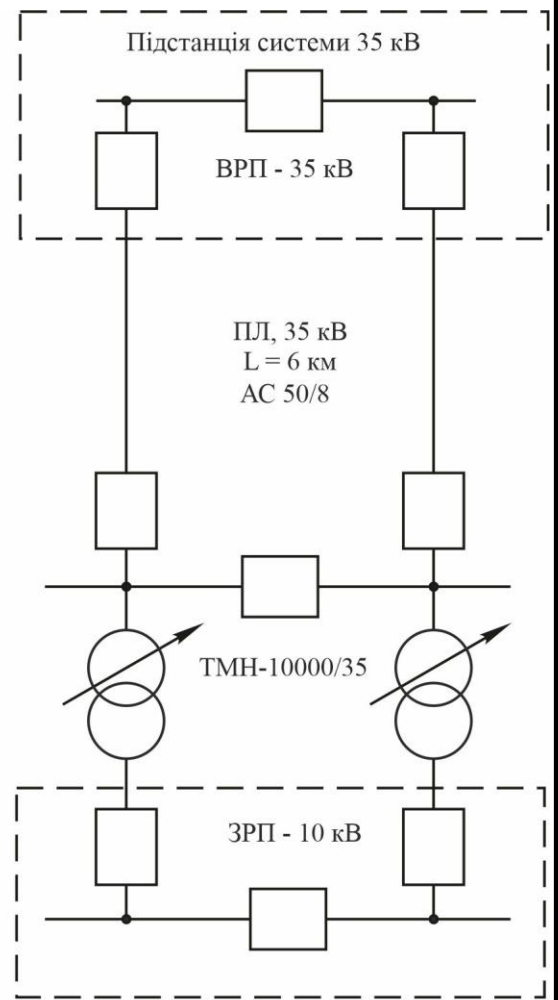
$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{275398,57}{1727,72} = 159,4$$

Таблиця 2.1. Картограма ел. навантажень

№	Назва цеху	$P_{\text{спр}}$, кВт	$P_{\text{осв}}$, кВт	P_1 , кВт	m	R , мм	α , град	x , м	y , м	P_{1x} , кВт·м	P_{1y} , кВт·м
1.	Головний корпус	1715,22	12,5	1727,72	0,2	52,44	2,60	32,20	159,40	55632,58	275398,57
2.	Зварювальний корпус	1417,38	9,11	1426,49	0,2	47,65	2,30	31,20	210,60	44506,49	300418,79
3.	Апаратний цех	1006,46	10,28	1016,74	0,2	40,23	3,64	176,40	264,60	179352,94	269029,40
4.	Ізоляційний корпус	479,45	10,7	490,15	0,2	27,93	7,86	40,80	269,60	19998,12	132144,44
5.	Киснева станція	135,35	6,24	141,59	0,2	15,01	15,87	278,40	274,60	39418,66	38880,61
6.	Котельня	635,6	7,65	643,25	0,2	32,00	4,28	398,20	264,60	256142,15	170203,95
7.	Деревообробний цех	46,94	4,92	51,86	0,2	9,09	34,15	412,60	83,40	21397,44	4325,12
8.	Лаковарочний цех	1200,53	8,13	1208,66	0,2	43,86	2,42	50,12	64,06	60578,04	77426,76
9.	Гараж	28,92	4,41	33,33	0,2	7,28	47,63	139,00	32,90	4632,87	1096,56
10.	Механоскладальний цех	1976,01	10,56	1986,57	0,2	56,23	1,91	139,00	32,98	276133,23	65517,08
11.	Заготівельно-звар цех	1789,85	8,37	1798,22	0,2	53,50	1,68	295,80	23,00	531913,48	41359,06
12.	Тер заводу	0	10,3	10,30	0,2	4,05	360,00	239,80	143,60	2469,94	1479,08
	Всього по заводу	10431,71	103,17	10534,88						1492175,93	1377279,43



а)



б)

Рис. 3.1. Схеми зовн. електропостачання

$$K_{\text{зав}} = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{164,29}{275} = 0,6$$

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{1км}} l_{\text{сум}} K_{\text{зав}}^2 = 20 \cdot 24 \cdot 0,36 = 172,8 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{кл}} = \Delta P_{\text{кл}} \tau = 86,4 \cdot 3325,11 = 287289,5 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

$$C_{\text{втр.кл}} = \Delta W_{\text{сум}} C_0 = 287289,5 \cdot 8,87 \cdot 0,001 = 2548,26 \text{ тис.грн.}$$

Таблиця 3.1. Розрахунок капвкладень

№	Назва	Од.	К-сть	Вартість	Всього
1	КЛ 10 кВ	км	24	54	1248
2	Траншея	км.	6	14,3	85,8
3	Шафи КРП	шт.	2	10,7	21,4
Всього					1355,2

Таблиця 3.2. Поточні витрати

№	Назва	K_j	P_{aj}	C_{aj}	P_{ej}	C_{ej}	C_j
1	КЛ 10 кВ	1248	5	62,4	5	62,4	124,8
2	Траншея	85,8	5	4,29	5	4,29	8,58
3	Шафи КРП	21,4	15	3,21	5	1,07	4,28
Всього							137,7

Розрахунок збитку від недовідпуску електроенергії наведено нижче.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,004 + 0,96 = 0,964 \quad 1/\text{рік}$$

$$T_{\text{відн}} = \frac{\sum \lambda_i T_{\text{відн}i}}{\lambda} = \frac{(0,004 \cdot 0,00045 + 0,96 \cdot 0,00084)}{0,964} = 0,00083838 \quad \text{рік}$$

$$K_{\text{пр}} = 1,2 K_{\text{прmax}} = 1,2 \cdot 0,002 = 0,0024$$

$$K_{\text{а.п}} = \lambda T_{\text{відн}} = 0,964 \cdot 0,000838381742738589 = 0,0008082$$

$$K_{\text{а.пр}} = 0,5 \lambda K_{\text{пр}}^2 = 0,5 \cdot 0,964 \cdot 0,00000576 = 0,00000277632$$

$$K_{\text{а.пр}}^{(2)} = K_{\text{а.п}}^2 + 2K_{\text{а.пр}} = 0,00000065318724 + 2 \cdot 0,00000277632 = 0,0000062058$$

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Опори елементів мережі:

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

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

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

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

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

$$R_{K1} = R_c + R_{кл} = 0,044 + 0,618 = 0,662 \text{ Ом}$$

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

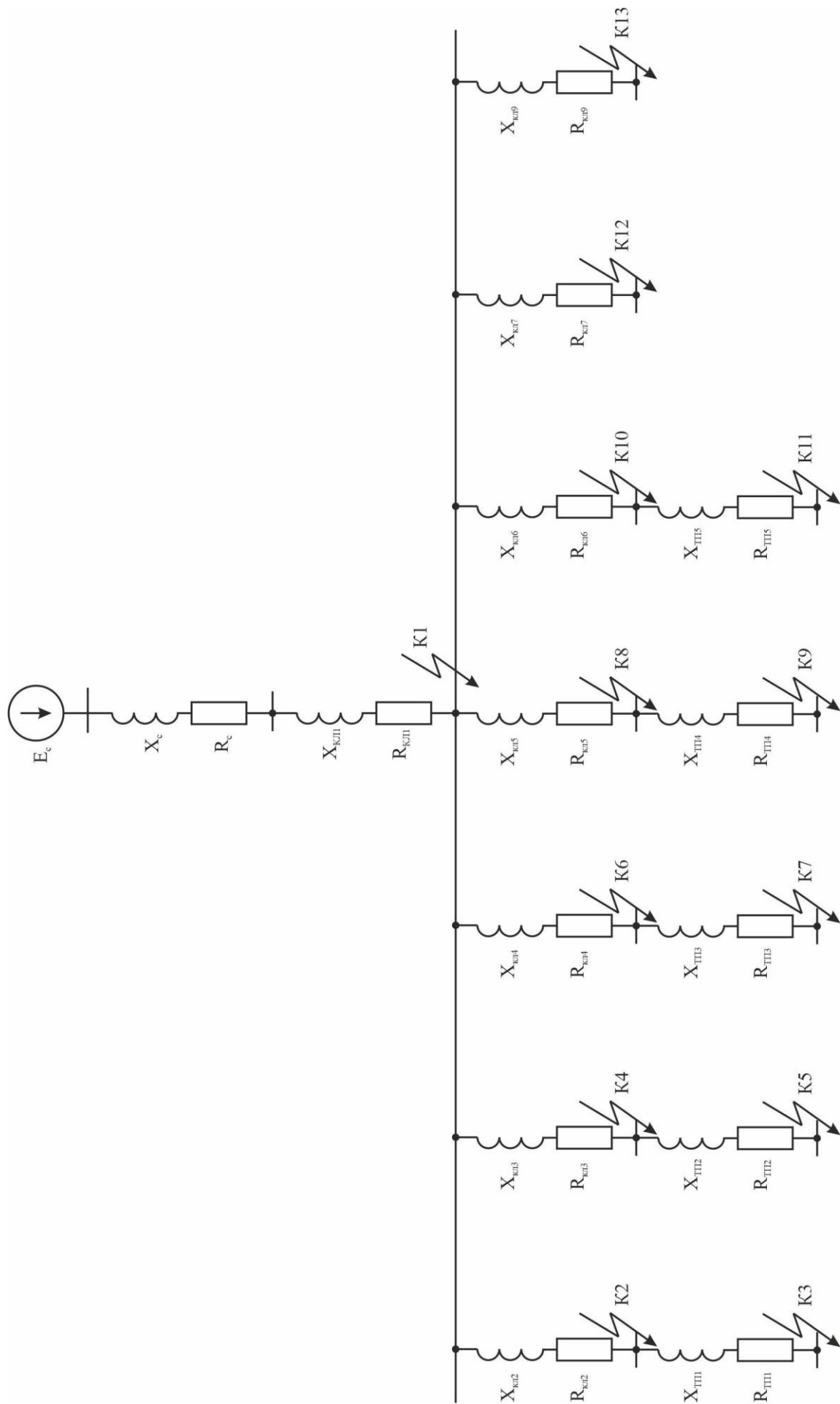


Рис. 6.1. Розрахункова схема

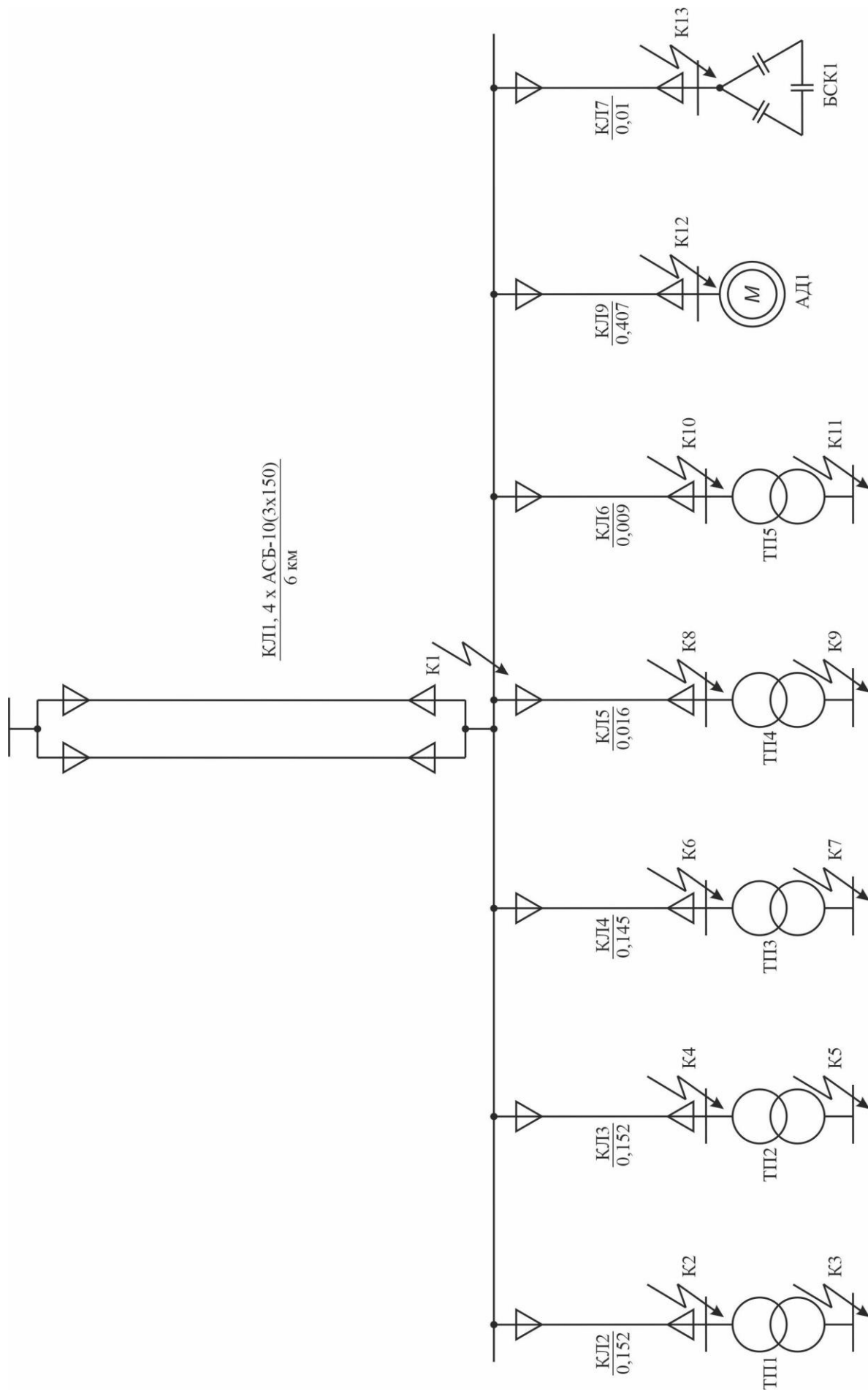


Рис. 6.2. Схема заміщення

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:

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

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

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

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

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

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

Параметри вибору КЛ1:

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

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

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

Обираємо кабель ААШВ-10(3 х 70).

Опір КЛ1:

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

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

Параметри струму к.з. в т. К2:

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

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

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

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:

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

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

Параметри струму к.з. в т. К3:

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

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

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

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

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

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

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

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

№	R, Ом	X, Ом	$I_{к}''$, 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:

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

Обираємо 2 х ААШВ-10(3х70).

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

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 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:	$I_{нт} \leq I_{в.н.}$ $i_{ат} \leq \sqrt{2}\beta_{ном} I_{в.н.}$ $\sqrt{2}I_{нт} + i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{н.в.} (1 + \beta_{ном})$	$4,05 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 4,05 + 0 < < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $5,73 \leq 39,6$
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	$B_k \leq I_{т.ном}^2 t_{т.ном}$	$20,48 \leq 1200$

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

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

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

Обираємо ВР2-10-20/1000.

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема приєднання ТВП наведена на рис. 6.3.

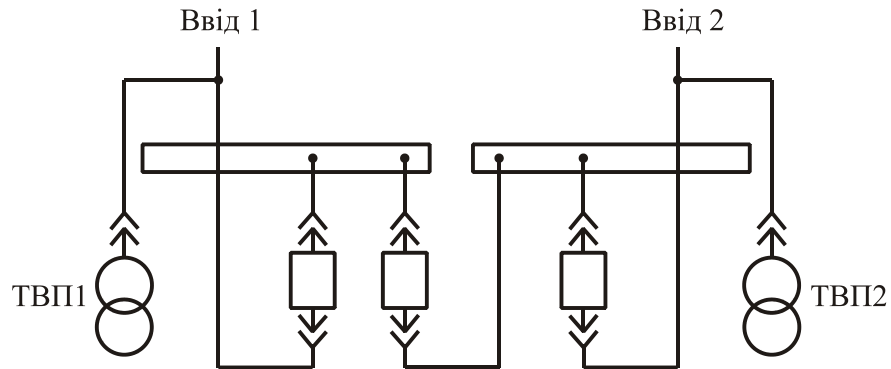


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП

Таблиця 6.5. Розрахунок електр. навант. ТВП

№	Назва споживача	P _н , кВт	n, шт.	P _Σ , кВт	cosφ	tgφ	P _{вст} , кВт	Q _{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:

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

струмових компонентів домінуючих гармонік безпосередньо від навантажувального обладнання, запобігаючи їх поширенню в електричну мережу.

Принцип функціонування пасивного фільтра базується на створенні шляхів з мінімальним електричним опором для специфічних гармонічних частот поблизу джерела нелінійного навантаження. Це призводить до відведення та нейтралізації струмових компонентів домінуючих гармонік безпосередньо від навантажувального обладнання, запобігаючи їх поширенню в електричну мережу.

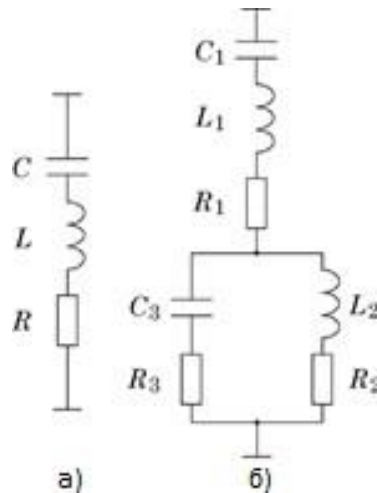


Рис. 7.1 - Конфігурації пасивних налагоджуваних фільтраційних систем.

(а) Конструкція з одинарним налаштуванням. (б) Варіант подвійного налаштування

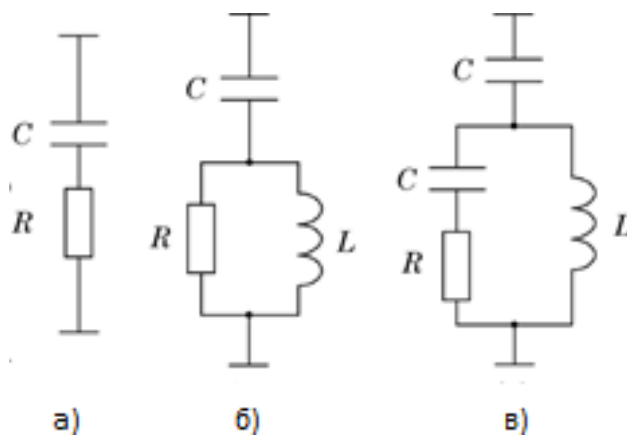


Рис. 7.2. Різновиди пасивних високочастотних фільтрів. (а) Структура першого порядку. (б) Конфігурація другого порядку. (в) Схема третього порядку.

7.2 Системи активної фільтрації для усунення гармонійних спотворень

Активні фільтри розділяються на дві основні категорії залежно від способу їх підключення до електричної мережі: шунтуючі (паралельні) та послідовні варіанти. Шунтуючі активні фільтри демонструють значні переваги порівняно з послідовними аналогами у плані конструктивних рішень та функціональних можливостей.

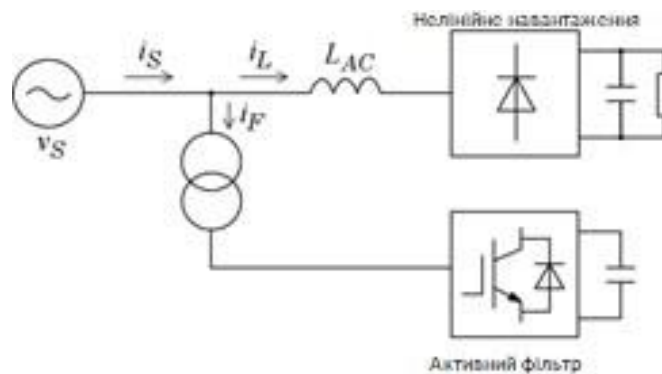


Рис. 7.3 - Конфігурація одно- або трифазного паралельного активного компенсатора

Шунтуючий активний фільтр представляє собою одну з найважливіших базових конфігурацій серед усіх існуючих типів чистих і гібридних активних фільтрувальних систем. Ця технологія знайшла широке застосування в промисловості завдяки своїй ефективності та відносній простоті реалізації.

Навантаження постійного струму у більшості практичних застосувань можна розглядати як асинхронний двигун змінного струму, який керується за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) через інвертор напруги. Такі системи є основними джерелами гармонічних спотворень у промислових електричних мережах. Активний фільтр може бути виконаний як з гальванічною розв'язкою через трансформатор, так і без неї, залежно від конкретних вимог застосування. Пристрій підключається паралельно до навантаження, яке є джерелом гармонічних спотворень. Використання трансформатора дозволяє

забезпечити додаткову ізоляцію та узгодження напруг, але збільшує габарити та вартість системи.

Управління активним фільтром здійснюється за принципом прямого зв'язку, який включає наступні етапи:

- Етап вимірювання : контролер визначає миттєвий гармонічну складову струм навантаження i_L .
- Етап цифрової обробки: використовуючи алгоритми цифрової обробки сигналів, система виділяє гармонічну складову струму i_{Lh} з загального струму навантаження.
- Етап компенсації: активний фільтр генерує компенсуючий струм i_{AF} ($= -i_{Lh}$) який за величиною дорівнює гармонічній складовій, але протилежний за фазою i_{Lh} .

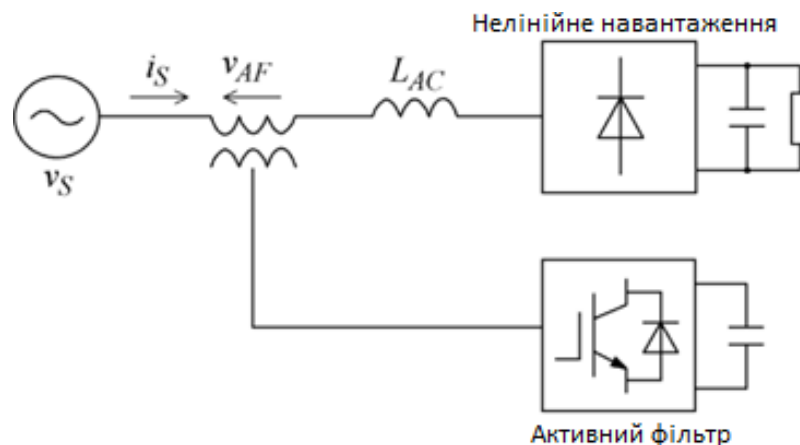


Рис. 7.4. - Схема одно- або трифазного послідовного активного компенсатора.

Реактивна котушка для змінного струму, що розташована на АС-стороні діодного випрямлювача, відіграє ключову функцію у забезпеченні стабільної та коректної роботи активного фільтраційного пристрою. На противагу паралельному активному фільтру, послідовний тип керується через механізм

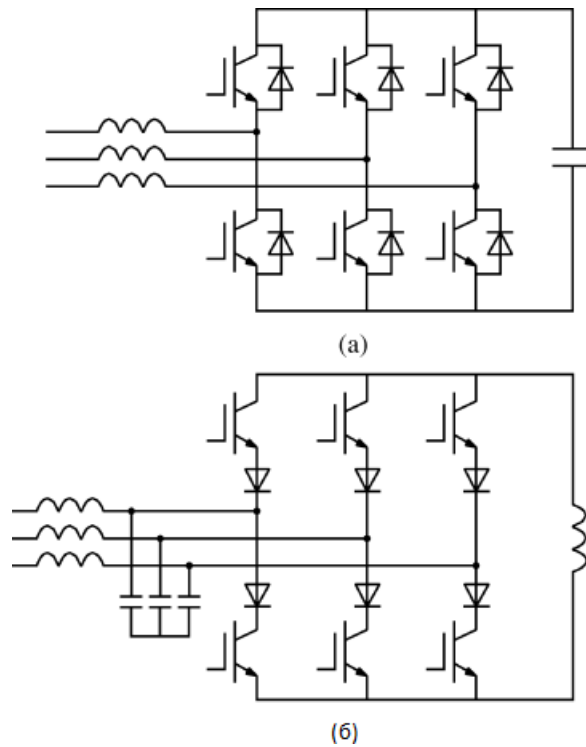


Рис. 7.5. Варіанти схем електроживлення трифазних активних компенсаторів. (а) ШІМ-перетворювач типу "джерело напруги", (б) ШІМ-перетворювач типу "джерело струму"

Додатково, модулі біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT), що представлені на сучасному ринку, демонструють оптимальну сумісність з ШІМ-інверторами джерела напруги завдяки наявності антипаралельно увімкненого діода зворотного струму в кожному IGBT. Така конфігурація звільняє IGBT від необхідності забезпечення зворотного блокування струму, що надає конструкторам більшу свободу у виборі компромісу між втратами провідності та комутації, а також стійкістю до коротких замикань порівняно з IGBT, що мають функцію зворотного блокування з протилежного боку, ШІМ-інвертори джерела струму потребують або послідовного з'єднання стандартного IGBT із зворотно-блокуючим діодом, як продемонстровано на схемі 7.5(б), або застосування спеціалізованих зворотно-блокуючих IGBT. Такі рішення ускладнюють проектування та виробництво пристроїв, одночасно погіршуючи експлуатаційні характеристики порівняно із звичайними IGBT без реверсивного блокування. Практично всі активні фільтри, що знайшли широке застосування у

складовим. За умови розташування активного фільтра в кінцевій точці радіального розподільного фідера досягається ефективно придушення гармонік уздовж усієї довжини фідерної лінії. Функціональна аналогія полягає в тому, що активний фільтр виконує роль "гармонічного термінатора", схоже до 50-омного навантаження на завершенні високочастотної сигнальної лінії.

У публікації представлена конфігурація трифазного послідовного активного фільтра, сконструйованого з трьох однофазних H-мостових інверторних модулів, які функціонують при частоті широтно-імпульсної модуляції 10 кГц та використовують високочастотний DC-конденсатор з мінімальною номінальною ємністю. Постійнострумові термінали фільтраційної системи з'єднуються з DC-шиною трифазного діодного випрямного пристрою, обладнаного власним згладжувальним конденсатором, формуючи спільну DC-ланку між активним фільтром та випрямлячем. Задовільні характеристики фільтрації підтверджені результатами трифазних експериментальних досліджень на установці номінальною напругою 200 В, потужністю 20 кВт при мережній частоті 50 Гц.

У 1988 році дослідники представили дві концепції гібридних активних фільтрів для придушення гармонічних спотворень від нелінійних навантажень а згодом у 1990 році - додаткові варіанти. Спрощені схемотехнічні рішення гібридних активних фільтрів демонструються на рис. 7.7,

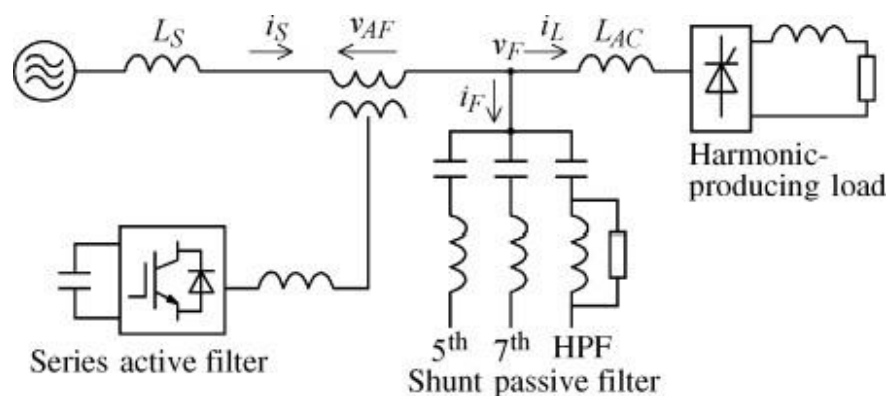


Рис. 7.7. - Поєднання послідовного активного компенсатора з паралельним пасивним фільтром.

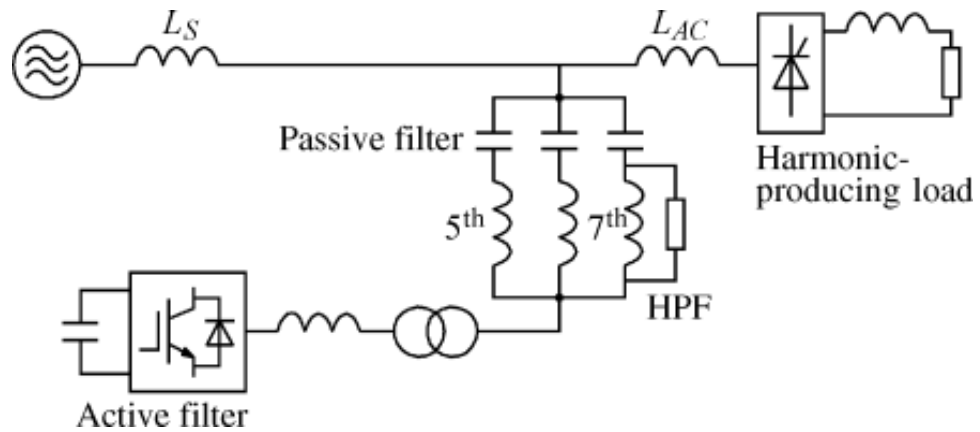


Рис. 7.8 - Каскадне з'єднання активного та пасивного фільтрувальних пристроїв.

Представлення цих двох гібридних конфігурацій стимулювало науковців та інженерів у галузі силової електроніки до поглиблених досліджень різноманітних гібридних активних фільтраційних систем з акцентом на їхнє промислове впровадження.

Обидві гібридні фільтраційні системи базуються на інтеграції активного фільтра, трифазного трансформаторного пристрою (альтернативно - трьох однофазних трансформаторів) та пасивної фільтраційної секції. Пасивна частина включає два резонансні контури, налаштовані на п'яту та сьому гармонічні складові, плюс високочастотний фільтр другого порядку для одинадцятої гармоніки. Попри певні схемотехнічні відмінності, обидві гібридні конфігурації демонструють практично ідентичні принципи функціонування та фільтраційні характеристики. Комбінування з пасивними елементами забезпечує суттєве зниження номінальної потужності активної складової. Функціональне призначення активного фільтра полягає не в безпосередній компенсації гармонійних струмів тиристорного випрямляча, а в досягненні "гармонічної розв'язки" між джерелом електроживлення та навантаженням. Унаслідок цього запобігається виникненню гармонічних резонансних явищ, а гармонічні струми не поширюються в живлячу мережу.

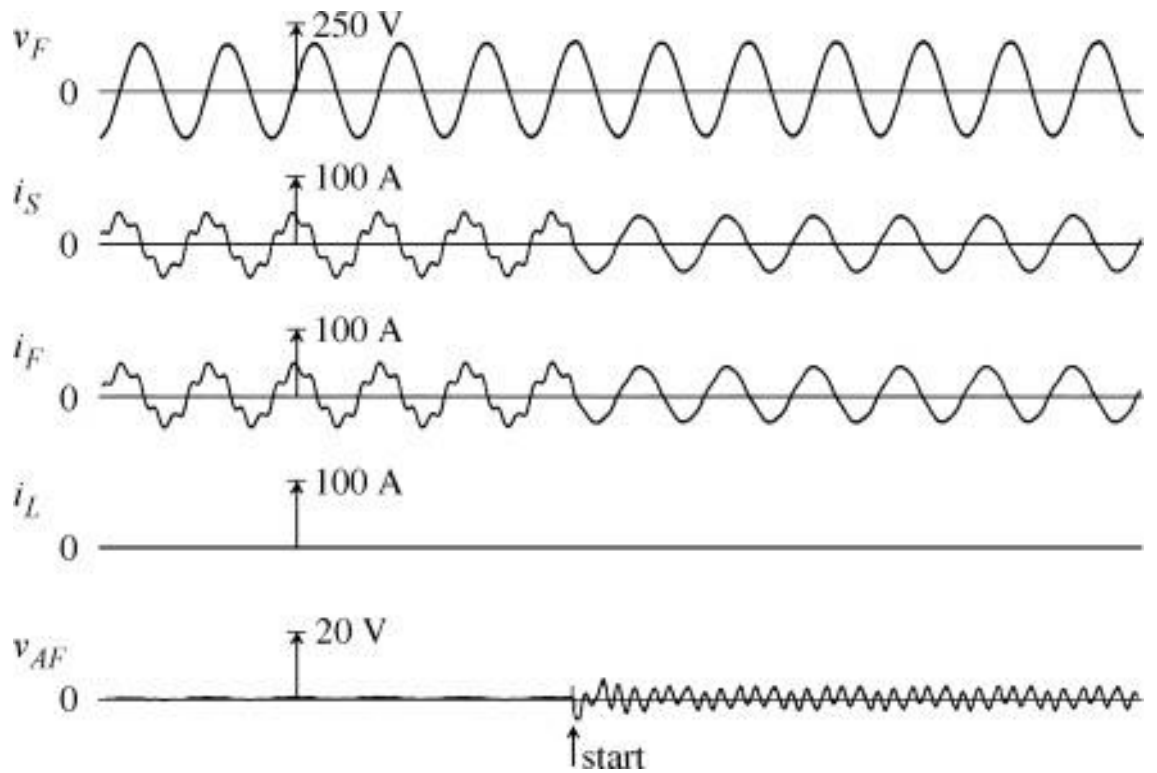


Рис. 7.11 - Осцилограми експериментальних досліджень у режимі холостого ходу ($i_L = 0$, у випадку $L_S = 2\%$)

Після активації активного фільтра через пасивні фільтраційні контури припинилась циркуляція гармонічних струмів. Крім того, на клеммах пасивного фільтра зникли напругові гармонічні складові, оскільки фонові гармонічні напруги були заблоковані активним фільтраційним пристроєм.

Ці гібридні фільтраційні системи пропонують практичні та високоефективні рішення для придушення гармонік у потужних випрямних установках. Проте їхня комерціалізація стикається з труднощами через відсутність трансформаторної складової та складну архітектуру пасивної фільтраційної частини.

7.4 Низьковольтні безтрансформаторні комбіновані активні системи фільтрації

Електроприводи зі змінною швидкістю обертання, засновані на сучасних ШІМ-інверторах з напруговим живленням на IGBT-модулях, отримали широке поширення у промислових системах, побутовому обладнанні та транспортних

Нелінійне навантаження створює гармонійні спотворення в електричній мережі, що призводить до зниження якості електроенергії та негативно впливає на роботу електронного обладнання. Рис. 2 демонструє основні електричні параметри: напругу джерела (V_s), струм навантаження (I_L), струм навантаження (I_s), і струм, що споживається від джерела, які характеризують роботу АСФ та ГСФ систем. Активні силові фільтри працюють за принципом компенсації гармонік шляхом генерації струмів, що мають протилежну фазу відносно гармонічних складових навантаження. Ілюстрація 7.2 (а) відображає взаємозв'язок між V_s з I_L , включаючи основну гармонічну компоненту i_{Lf} . Тут також зазначено кут (ϕ) який характеризує зміщення коефіцієнта потужності навантаження (КПН), та інтервал комутації (Δ).

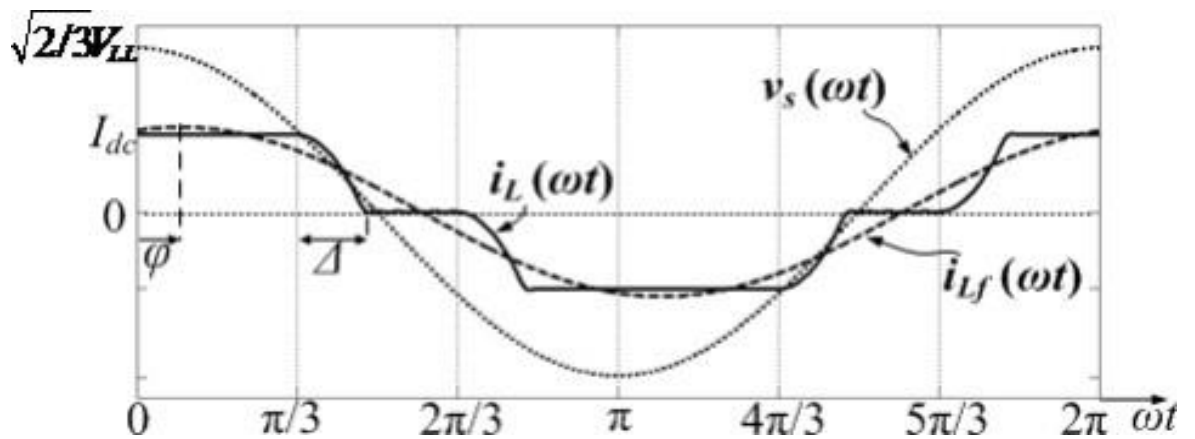


Рис. 7.14 – а) Електрична напруга живлення та електричний струм навантаження діодного випрямного пристрою

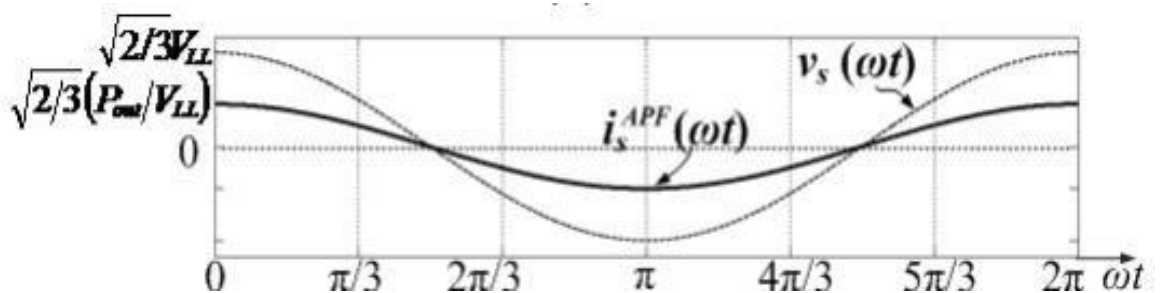


Рис. 7.14 - б) Параметри напруги джерела живлення та струмові характеристики джерела у конфігурації АСФ

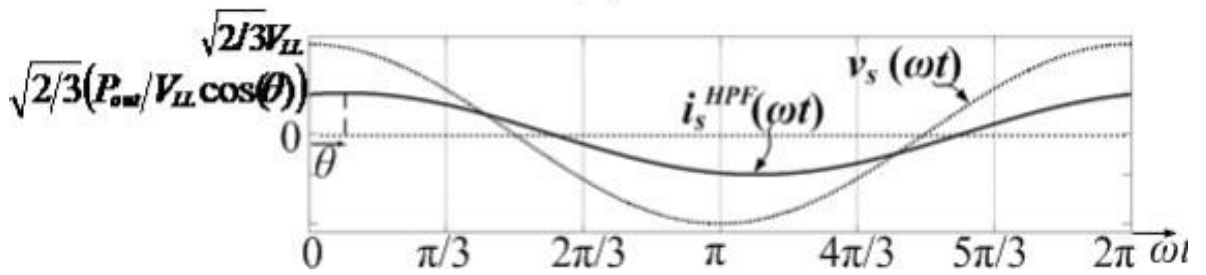


Рис. 7.14 - в) Електричні параметри напруги та струму джерела живлення в архітектурі ГСФ

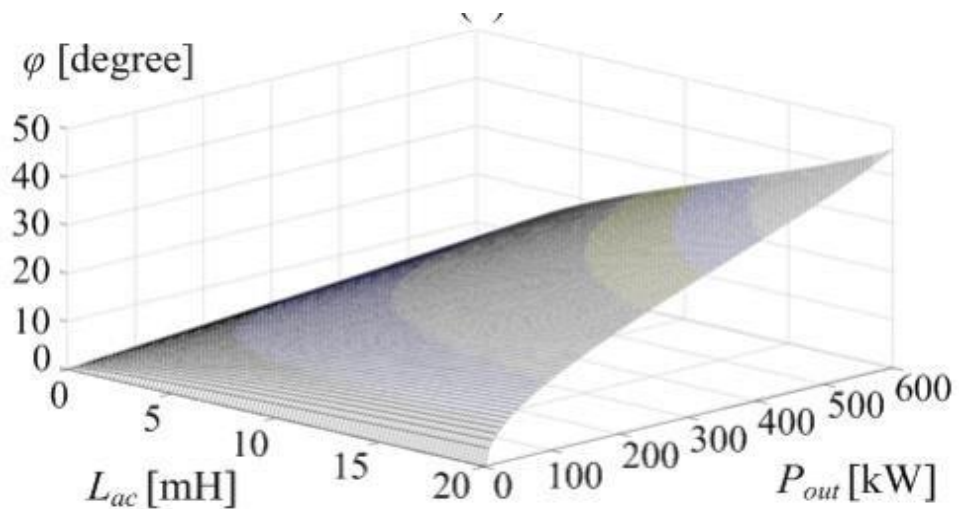


Рис. 7.14 - г) Кутові характеристики нахилу коефіцієнта зсуву фаз навантаження залежно від індуктивності L_{ac} і вихідної потужності P_{out}

На діаграмі 7.14(б) представлено струм джерела I_s у режимі компенсації, який функціонує з одиничним коефіцієнтом потужності, адже активний силовий фільтр (АСФ) здійснює компенсацію як гармонічних складових, так і реактивної потужності. Діаграма 7.2(в) демонструє струм джерела I_s після застосування гібридного силового фільтра (ГСФ) з кутовим зміщенням коефіцієнта потужності θ , оскільки ГСФ забезпечує компенсацію виключно реактивної потужності. Процеси перемикання струму навантаження, відображені на діаграмі 7.14(а), характеризуються неідеальною поведінкою через присутність індуктивності L_{ac} у комутаційному контурі. Протягом інтервалу комутації значення струму навантаження дорівнює:

$$i_L(\omega t) = I_{dc} + \frac{V_{LL}}{\sqrt{2}\omega L_{ac}} \left[\cos\left(\frac{\pi}{3} - \omega t\right) - 1 \right], \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} + \Delta. \quad (7.2)$$

$$\Delta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\sqrt{2}\omega L_{ac} I_{dc}}{V_{LL}} \right) \quad (7.3)$$

Надалі споживаний струм навантаження визначається шляхом застосування гармонічного аналізу Фур'є:

$$i_L(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}I_{dc}}{\pi} \{ M_L \cos(\omega t - \varphi) + (a_5 \cos(5\omega t) + b_5 \sin(5\omega t)) - (a_7 \cos(7\omega t) + b_7 \sin(7\omega t)) + (a_{11} \cos(11\omega t) + b_{11} \sin(11\omega t)) - \dots \}$$

Де:

$$M_L = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + \left(\sin\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \frac{\Delta \sin(\Delta) \cos(\Delta)}{2}}}{1 - \cos(\Delta)}$$

$$a_k = \frac{1}{2k(k+1)} \left[\frac{\sin\left((k+1)\frac{\Delta}{2}\right)^2}{\sin\frac{\Delta}{2}} \right] - \frac{1}{2k(k+1)} \left[\frac{\sin\left((k-1)\frac{\Delta}{2}\right)^2}{\sin\frac{\Delta}{2}} \right]$$

$$b_k = \frac{\sin(\Delta(k-1))}{2k(k-1)(1-\cos(\Delta))} - \frac{\sin(\Delta(k+1))}{2k(k+1)(1-\cos(\Delta))}, k = 5, 7, 11, 13, \dots$$

Вважаючи, що комутаційні елементи та реактивні компоненти у системах АСФ і ГСФ функціонують без енергетичних втрат, постійний струм I_{dc} співвідноситься з вихідною потужністю P_{out} наступним чином:

$$S_{APF} = 3V_c^{APF} I_c^{APF} \quad (7.8)$$

Де величини I_c^{APF} та V_c^{APF} представляють ефективне значення компенсаційного струму інвертора АСФ та значення напруги змінструмової сторони інвертора відповідно. Використовуючи рівняння (7.4) і (7.7), ефективне значення компенсуючого струму, який генерується інвертором, обчислюється як:

$$I_c^{APF} = \frac{P_{out}}{\sqrt{3}V_{LL}} \sqrt{\tan^2(\varphi) + \frac{K_1}{(M_L \cos(\varphi))^2}} \quad (7.9)$$

де

$$K_1 = \sum_{m=1}^{n/2} (a_k^2 + b_k^2), k = 6m \mp 1.$$

Ефективне значення напруги змінструмової сторони інвертора активного силового фільтра може бути розраховане з використанням діаграми 7.14(а), рівнянь (7.1), (7.4) та (7.7):

$$V_c^{APF} = \sqrt{\frac{V_{LL}^2}{3} + \frac{2P_{out}X_{L1} \tan(\varphi)}{3} + \left(\frac{P_{out}X_{L1}}{\sqrt{3}V_{LL} \cos(\varphi)}\right)^2 \left(\sin^2(\varphi) + \frac{K_2}{M_L^2}\right)} \quad (7.10)$$

де

$$K_2 = \sum_{m=1}^{n/2} k^2 (a_k^2 + b_k^2), k = 6m \mp 1$$

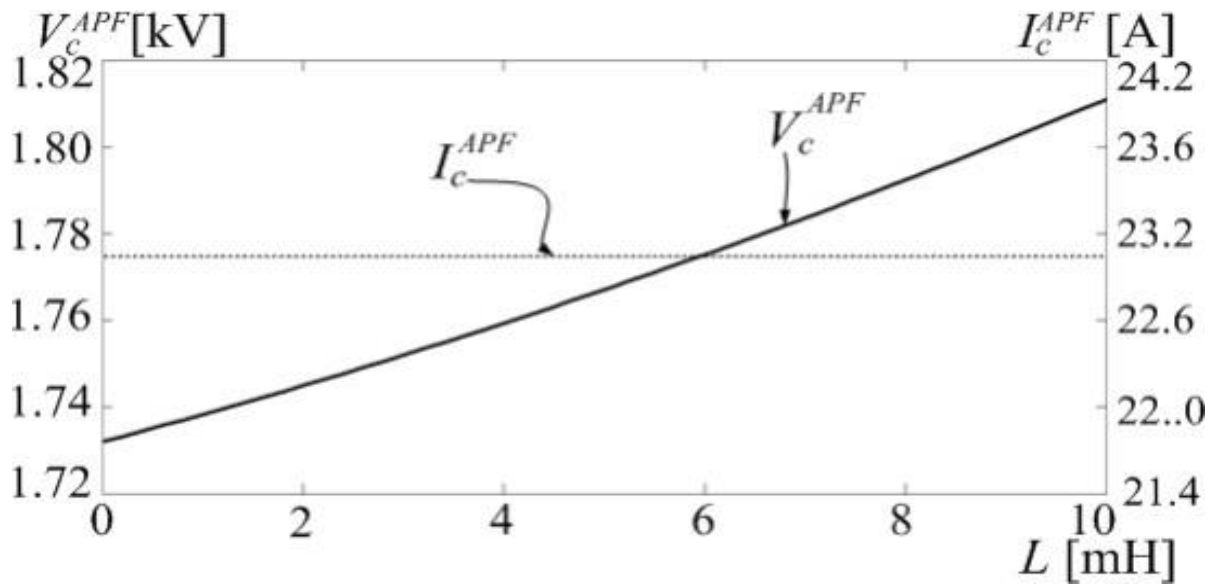
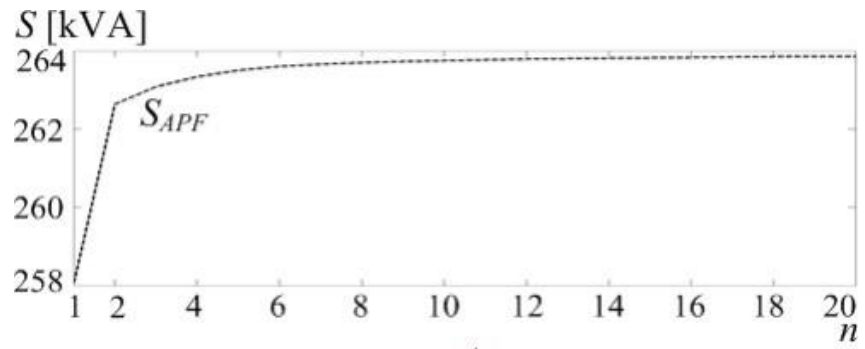
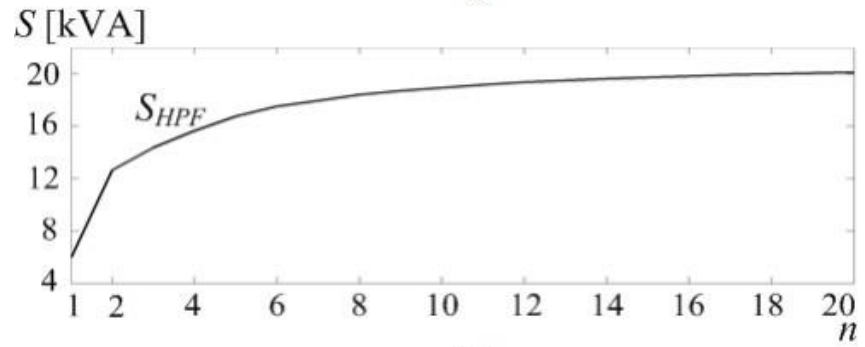


Рис. 7.15 – Середньоквадратичні параметри електричної напруги та струму активного силового фільтра відповідно до величини індуктивності L

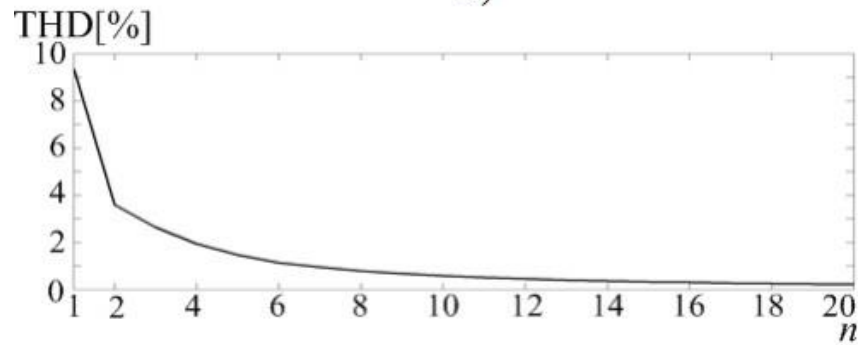
У цьому підрозділі проводиться порівняльний аналіз номінальних характеристик інверторів активних та гібридних силових фільтрів на основі параметрів компенсації гармонік n -го порядку, індуктивності навантаження на вході L_{ac} , вихідної потужності P_{out} та фільтруючої індуктивності L . Оскільки практична реалізація гібридного силового фільтра передбачає роботу з фіксованою ємністю пасивної частини, забезпечення одиничного коефіцієнта потужності у всьому діапазоні експлуатації є неможливим. У рамках цього порівняльного дослідження слід акцентувати, що активний силовий фільтр гарантує безперервну роботу з одиничним коефіцієнтом потужності.



а)

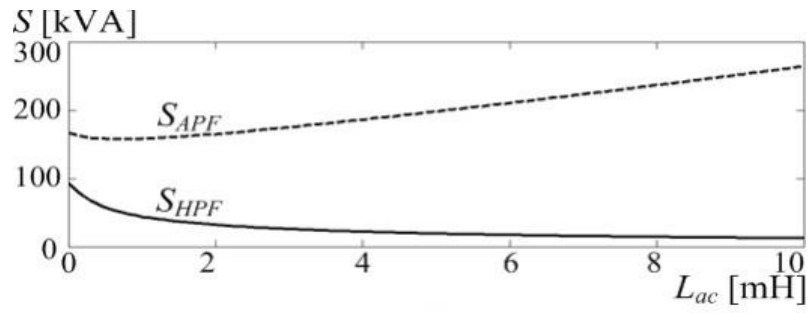


б)

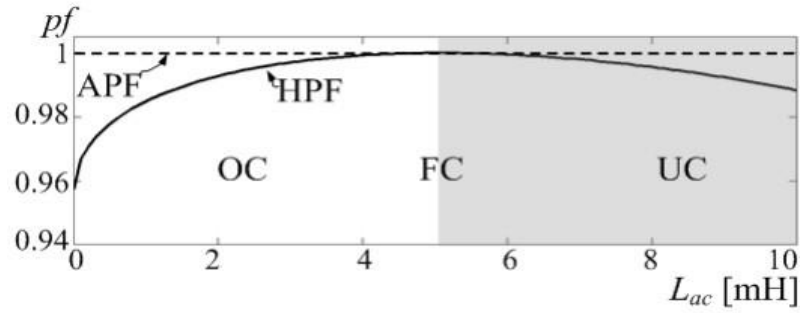


в)

Рис. 7.16 – (а), (б) Розрахункові значення характеристик інвертора і (в) відповідні графіки коефіцієнта гармонічних спотворень THD від параметра n

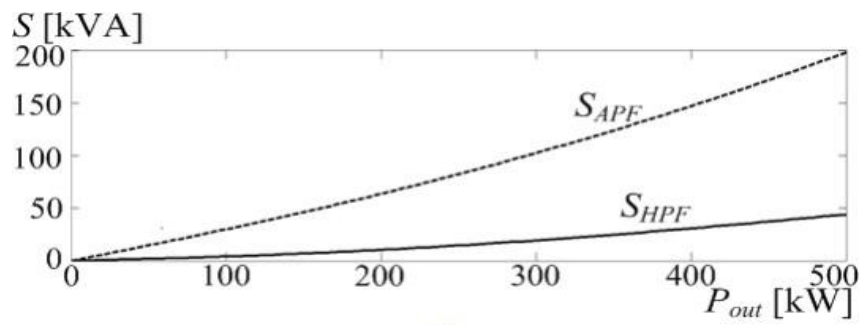


a)

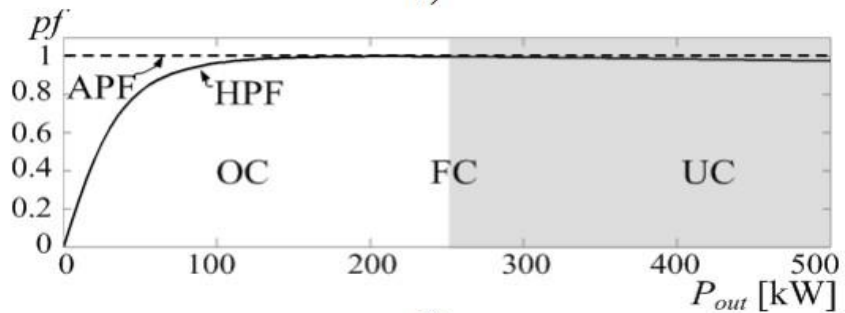


б)

Рис. 7.17 – (а) Розрахункові параметри інверторного пристрою та (б) залежність коефіцієнта потужності від індуктивності L_{ac}



a)



б)

Рис. 7.18 – (а) Розрахункові значення інверторних систем і (б) характеристики коефіцієнта потужності відповідно до параметра L

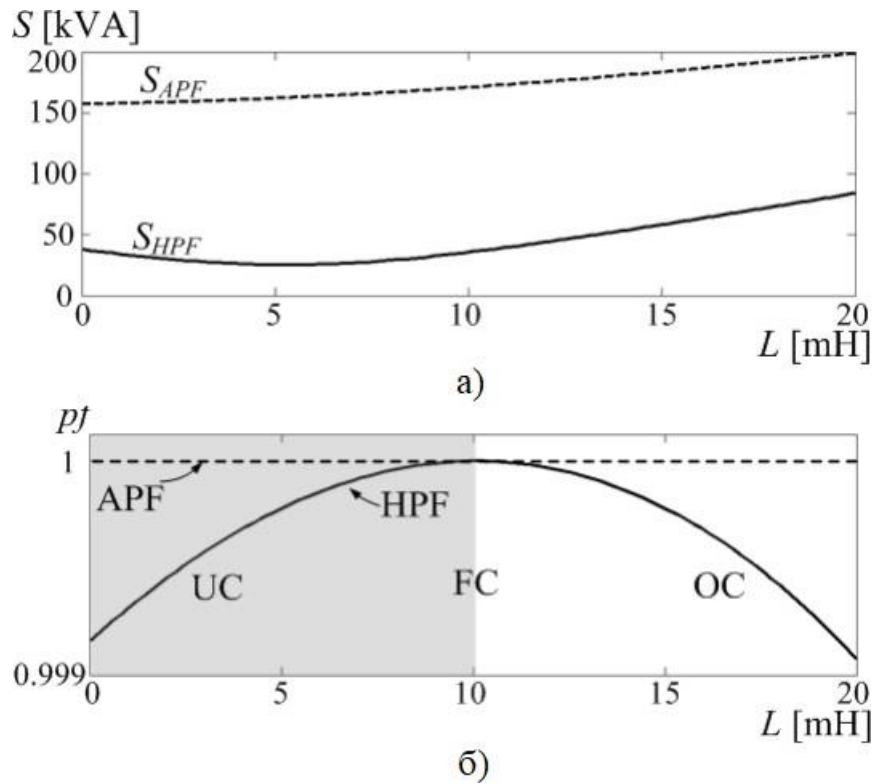


Рис. 7.19 – (а) Розрахункові параметри інверторних пристроїв та (б) зміна коефіцієнта потужності відносно індуктивності L

Слід відзначити, що індуктивність фільтрації L чинить незначний вплив на коефіцієнт потужності клем мережі у системах з гібридними силовими фільтрами. Проте у практичних застосуваннях величина L не повинна перевищувати певних меж для забезпечення коректного функціонування системи регулювання. Надмірна індуктивність фільтрації може спричинити зменшення частоти комутації та потребу у підвищеній напрузі постійного струму, а також призвести до погіршення показника загального коефіцієнта гармонічних спотворень.

