

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 інструментального заводу»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–22мбз,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

\_\_\_\_\_ Денис М'ЯСКОВСЬКИЙ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи

професор, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_ Лариса ВІХРОВА

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 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

М'яковського Дениса Володимировича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання інструментального заводу  
Development of a power supply system for a tool factory

2. Керівник роботи Віхрова Лариса Григорівна, канд. техн. наук, професор  
(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 інструментального 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 \_\_\_\_\_

Лариса ВІХРОВА

Завдання прийнято до виконання  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Підпис здобувача \_\_\_\_\_

Денис М'ЯСКОВСЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 77 с.; 19 рис.; 21 табл.; 5 джерел

### **М'ясковський Д. В. Розробка системи електропостачання інструментального заводу. – Рукопис.**

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

Робота присвячена вирішенню завдання проектування комплексної системи електрозабезпечення промислового підприємства, що спеціалізується на виробництві інструментів.

Детально розроблені обчислення електричного навантаження дозволили визначити оптимальні параметри для функціонування мережі. Аналіз характеристик графіків споживання електроенергії сприяв встановленню закономірностей енергоспоживання протягом робочих періодів. Дослідження режимів реактивної потужності забезпечило розуміння необхідності компенсаційних заходів для підвищення коефіцієнта потужності.

Комплексний розрахунок струмів короткого замикання в різних точках електричної мережі став основою для вибору захисного обладнання. Ці дослідження створили підґрунтя для обґрунтованого підбору компонентів високовольтної електромережі підприємства.

**Ключові слова:** розрахункові навантаження, електрична мережа, графіки навантажень

## ABSTRACT

Qualification work: 77 p.; 19 Fig.; 21 tables; 5 sources

**Miaskovsky D. Development of a power supply system for a tool factory. – 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.

The work is devoted to solving the problem of designing a comprehensive power supply system for an industrial enterprise specializing in the production of tools.

Detailed calculations of the electrical load allowed us to determine the optimal parameters for the functioning of the network. Analysis of the characteristics of electricity consumption graphs contributed to the establishment of patterns of energy consumption during working periods. Research into reactive power modes provided an understanding of the need for compensatory measures to increase the power factor.

A comprehensive calculation of short-circuit currents at various points of the electrical network became the basis for the selection of protective equipment. These studies created the basis for a well-founded selection of components for the enterprise's high-voltage electrical network.

**Keywords:** design loads, electrical network, load graphs

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ</b> .....	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
<b>РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ</b> .....	20
<b>РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ</b> .....	22
3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....	22
3.2 Схема внутрішнього електропостачання .....	25
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ</b> .....	27
4.1 Баланс реактивної потужності.....	27
4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв .....	28
<b>РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА</b> .....	31
<b>РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ</b> .....	32
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень .....	32
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ.....	40
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....	42
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб .....	43
<b>РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ</b> .....	45
7.1 Аналітичний огляд засобів регулювання напруги в розподільних електричних мережах.....	45
7.2 Застосування напівпровідникових силових трансформаторів.....	58
7.3 Використання технологій FACTS в електричних мережах.....	66
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	76
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	77

					<b>КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ</b>					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>						
<i>Розроб.</i>	<i>М'яковський Д.В.</i>				Розробка системи електропостачання інструментального заводу Development of a power supply system for a tool factory			<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перев.</i>	<i>Віхрова Л.Г.</i>							6	77	
<i>Н. контр.</i>	<i>Віхрова Л.Г.</i>				<b>ЦНТУ</b> <i>гр. ЕЕ-22мбз</i>					
<i>Затвер.</i>	<i>Плешков П.Г.</i>									









Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	$N_{\text{спож}}$ шт	$P_{\text{одн.сп.}}$		$P_{\text{сум.}}$ кВт	$m$	$K_{\text{в}}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	Сер. зм. нав.		$n_{\text{сф}}$	$K_{\text{р}}$	Розрах. навантаж.			
		min, кВт	max, кВт						$P_{\text{зм.}}$ , кВт	$Q_{\text{зм.}}$ , квар			$P_{\text{розр.}}$ , кВт	$Q_{\text{розр.}}$ , квар	$S_{\text{розр.}}$ , кВА	
		3	4													10
ТП 1, 2																
Термічне відділення № 1																
силове:	80	20	150	4180	7,5	0,70	0,90	0,48	2926	1417,13	56	1,07	3143,69	1417,13	3448,34	
освітлювальне:									56,67				53,84	10,93		
Всього:									2982,67	1417,13			3197,53	1428,06	3501,94	
Всього по ТП 1, 2:																
силове:	80	20	150	4180	7,5	0,70	0,90	0,48	2926	1417,13	56	1,07	3143,69	1417,13	3448,34	
освітлювальне:									56,67				53,84	10,93		
БК 0,4 кВ										-675				-675		
Всього 0.4 кВ ТП 1, 2:									2982,67	742,13			3197,53	753,06	3285,01	
Втрати в ТП:													33,08	186,05		
Нтр: 3 шт.																
Стр, кВА: 1600																
$K_{\text{з}} = 0,68$																
Всього 10 кВ ТП 1, 2:													3230,61	939,11	3364,34	
ТП 3, 4																
Зварювальне відділення № 1																
силове:	60	30	120	4900	4,0	0,60	0,35	2,68	2940	7868,7	60	1,10	3241,06	7868,7	8510,05	
освітлювальне:									50,8				48,26	9,8		
Всього:									2990,8	7868,7			3289,32	7878,5	8537,59	
Всього по ТП 3, 4:																
силове:	60	30	120	4900	4,0	0,60	0,35	2,68	2940	7868,7	60	1,10	3241,06	7868,7	8510,05	
освітлювальне:									50,8				48,26	9,8		
БК 0,4 кВ										-7566				-7566		
Всього 0.4 кВ ТП 3, 4:									2990,8	302,7			3289,32	312,5	3304,13	
Втрати в ТП:													33,36	187,49		
Нтр: 3 шт.																
Стр, кВА: 1600																
$K_{\text{з}} = 0,69$																

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Всього 10 кВ ТП 3, 4:													3322,68	499,99	3360,08
ТП 5															
Заготівельне відділення															
силове:	75	5	70	800	14,0	0,25	0,70	1,02	200	204,04	23	1,44	287,35	204,04	352,42
освітлювальне:									50,71				48,17	9,78	
Всього:									250,71	204,04			335,52	213,82	397,86
Цех конічних свердел															
силове:	140	2,8	58	4300	20,7	0,25	0,65	1,17	1075	1256,81	140	1,16	1245,34	1256,81	1769,31
освітлювальне:									47,55				45,17	9,17	
Всього:									1122,55	1256,81			1290,51	1265,98	1807,79
Цех прокату свердел															
силове:	70	5,4	80	1950	14,8	0,20	0,70	1,02	390	397,88	49	1,33	519,88	397,88	654,66
освітлювальне:									89,76				85,27	17,31	
Всього:									479,76	397,88			605,15	415,19	733,89
Всього по ТП 5:															
силове:	285	2,8	80	7050	28,6	0,24	0,67	1,12	1665	1858,73	176	1,15	1907,27	1858,73	2663,19
освітлювальне:									188,02				178,61	36,26	
БК 0,4 кВ													-1254	-1254	
Всього 0.4 кВ ТП 5:									1853,02	604,73			2085,88	640,99	2182,15
Втрати в ТП:													21,95	123,44	
Нтр: 2 шт.															
Стр, кВА: 1600															
Кз = 0,68															
Всього 10 кВ ТП 5:													2107,83	764,43	2242,16
ТП 6, 7															
Зварювальне відділення № 2															
силове:	35	20	100	6480	5,0	0,60	0,35	2,68	3888	10405,95	35	1,14	4427,13	10405,95	11308,55
освітлювальне:									82,37				78,25	15,88	
Всього:									3970,37	10405,95			4505,38	10421,83	11353,99
Всього по ТП 6, 7:															
силове:	35	20	100	6480	5,0	0,60	0,35	2,68	3888	10405,95	35	1,14	4427,13	10405,95	11308,55

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
освітлювальне:									82,37				78,25	15,88	
БК 0,4 кВ										-10684				-10684	
Всього 0.4 кВ ТП 6, 7:									3970,37	-278,05			4505,38	-262,17	4513
Втрати в ТП:													46,02	258,23	
№тр: 4 шт.															
Стр, кВА: 1600															
Кз = 0,71															
Всього 10 кВ ТП 6, 7:													4551,4	-3,94	4551,4
ТП 8, 9, 10															
Цех мітчиків															
силове:	150	5	75	3380	15,0	0,20	0,70	1,02	676	689,66	90	1,24	836,3	689,66	1083,99
освітлювальне:									122,35				116,23	23,59	
Всього:									798,35	689,66			952,53	713,25	1189,97
Цех плашок															
силове:	65	4,6	44	800	9,6	0,25	0,70	1,02	200	204,04	36	1,34	267,67	204,04	336,57
освітлювальне:									55,08				52,33	10,62	
Всього:									255,08	204,04			320	214,66	385,33
Цех фрез															
силове:	100	2,5	55	3840	22,0	0,20	0,65	1,17	768	897,89	100	1,22	939,76	897,89	1299,75
освітлювальне:									118,34				112,42	22,82	
Всього:									886,34	897,89			1052,18	920,71	1398,14
Термічне відділення № 2															
силове:	35	10	180	2800	18,0	0,70	0,90	0,48	1960	949,27	31	1,10	2163,52	949,27	2362,61
освітлювальне:									187,22				177,86	36,11	
Всього:									2147,22	949,27			2341,38	985,38	2540,28
Насосна															
силове:	18	5	90	400	18	0,6	0,7	1,02	240	244,85	9	1,31	313,76	269,33	413,5
освітлювальне:									23,52				14,11	2,86	
Всього:									263,52	244,85			327,87	272,19	426,13
Територія заводу															
освітлювальне:									59,05				5,91	1,2	
Всього:									59,05	0			5,91	1,2	6,03
Всього по ТП 8, 9, 10:															

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
силове:	368	2,5	180	11220	72	0,34	0,79	0,78	3844	2985,71	125	1,13	4349,34	2985,71	5275,53
освітлювальне:									565,56				478,86	97,2	
БК 0,4 кВ										-585				-585	
Всього 0.4 кВ ТП 8, 9, 10:									4409,56	2400,71			4828,2	2497,91	5436,09
Втрати в ТП:													54,59	307,16	
Нтр: 5 шт.															
Стр, кВА: 1600															
Кз = 0,68															
Всього 10 кВ ТП 8, 9, 10:													4882,79	2805,07	5631,17
Всього по об'єкту															
силове:	828	2,5	180	33830	72	0,45	0,97	0,25	15263	3772,22	376	1	15263	3772,22	15722,24
освітлювальне:									943,42				837,82	170,07	
Всього:									16206,42	3772,22			16100,82	3942,29	16576,43
Потужність КП 0,4 кВ:										-20764				-20764	
Втрати в ТПрах:													189	1062,38	
Всього по об'єкту:													16289,82	5004,67	17041,27
Високовольтне навантаження															
АД 1, 2	2	700	700	1400		0,75	0,85	0,62	1050	650,73			1050	650,73	1235,29
Всього високовольтного навантаження:													1050	650,73	1235,29
Всього по об'єкту 10 кВ:													17339,82	5655,4	18238,77
КП 10 кВ:														-3600	
Всього 10 кВ з КП:													17339,82	2055,4	17461,21
tgφ = 0,119															

## 1.4 Графіки електричних навантажень заводу

Результати розрахунків графіків ел. навантажень наведено нижче.

Таблиця 1.4. Дані для розрахунку параметрів графіків

№	Роб. дні		Вих. дні	
	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %
1	49	41	46	66
2	39	36	46	66
3	35	47	46	66
4	39	42	46	66
5	52	51	46	66
6	51	44	46	66
7	85	63	46	66
8	92	76	46	66
9	100	100	26	54
10	100	100	26	54
11	93	68	26	54
12	75	61	26	54
13	91	75	26	54
14	100	78	26	54
15	100	79	26	54
16	99	70	26	54
17	92	81	26	54
18	84	64	46	66
19	56	46	46	66
20	60	55	46	66
21	41	45	46	66
22	50	45	46	66
23	56	44	46	66
24	51	46	46	66

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	8491	1066	8558	7971	1715	8153	7218	906	7275	6776	1458	6931
2	6758	936	6823	7971	1715	8153	5745	795	5800	6776	1458	6931
3	6065	1222	6187	7971	1715	8153	5155	1038	5258	6776	1458	6931
4	6758	1092	6846	7971	1715	8153	5745	928	5819	6776	1458	6931
5	9011	1325	9108	7971	1715	8153	7659	1127	7741	6776	1458	6931
6	8838	1144	8912	7971	1715	8153	7512	972	7575	6776	1458	6931
7	14730	1637	14821	7971	1715	8153	12520	1392	12597	6776	1458	6931
8	15943	1975	16065	7971	1715	8153	13551	1679	13655	6776	1458	6931
9	17329	2599	17523	4506	1403	4719	14730	2209	14895	3830	1193	4012
10	17329	2599	17523	4506	1403	4719	14730	2209	14895	3830	1193	4012
11	16116	1767	16213	4506	1403	4719	13699	1502	13781	3830	1193	4012
12	12997	1585	13093	4506	1403	4719	11047	1348	11129	3830	1193	4012
13	15769	1949	15889	4506	1403	4719	13404	1657	13506	3830	1193	4012
14	17329	2027	17447	4506	1403	4719	14730	1723	14830	3830	1193	4012
15	17329	2053	17450	4506	1403	4719	14730	1745	14833	3830	1193	4012
16	17156	1819	17252	4506	1403	4719	14582	1546	14664	3830	1193	4012
17	15943	2105	16081	4506	1403	4719	13551	1789	13669	3830	1193	4012
18	14556	1663	14651	7971	1715	8153	12373	1414	12454	6776	1458	6931
19	9704	1196	9777	7971	1715	8153	8249	1016	8311	6776	1458	6931
20	10397	1429	10495	7971	1715	8153	8838	1215	8921	6776	1458	6931
21	7105	1170	7201	7971	1715	8153	6039	994	6120	6776	1458	6931
22	8664	1170	8743	7971	1715	8153	7365	994	7432	6776	1458	6931
23	9704	1144	9771	7971	1715	8153	8249	972	8306	6776	1458	6931
24	8838	1196	8919	7971	1715	8153	7512	1016	7580	6776	1458	6931

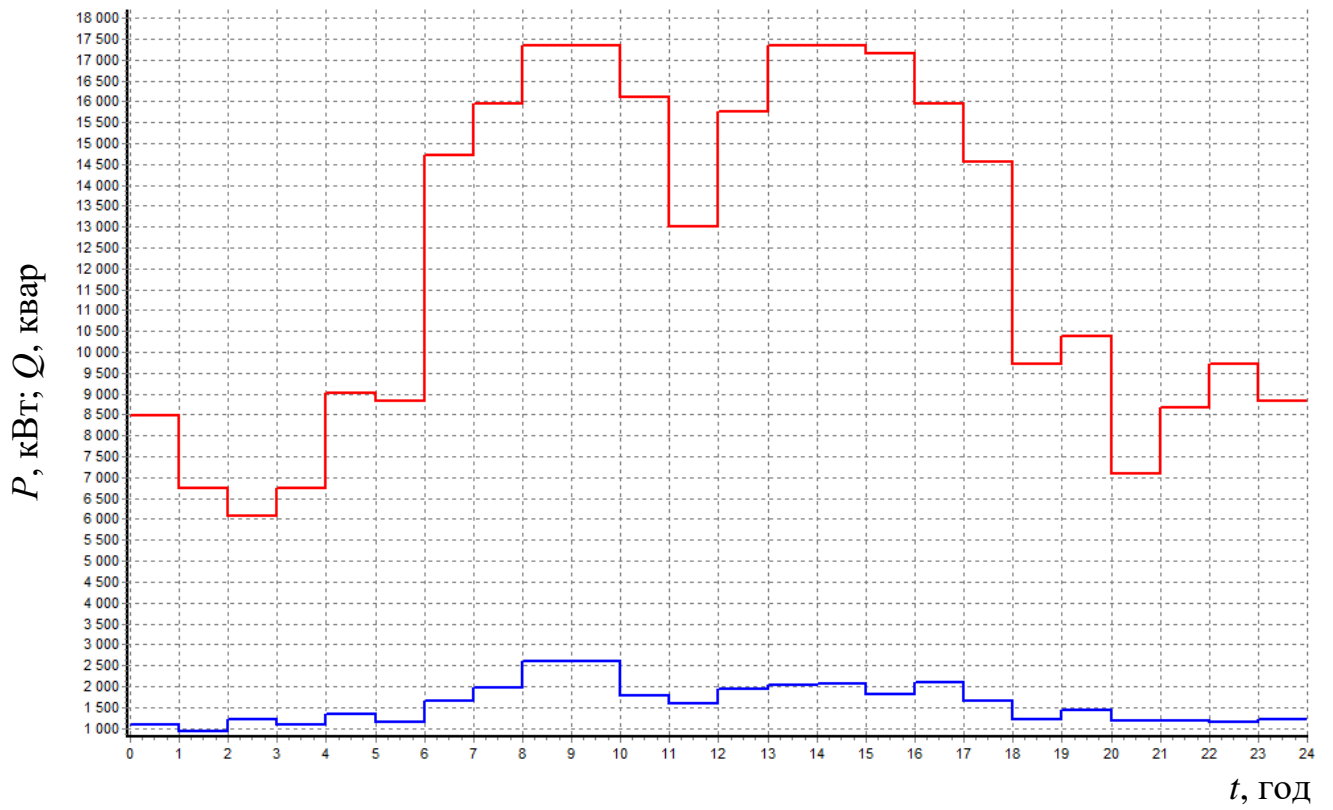


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

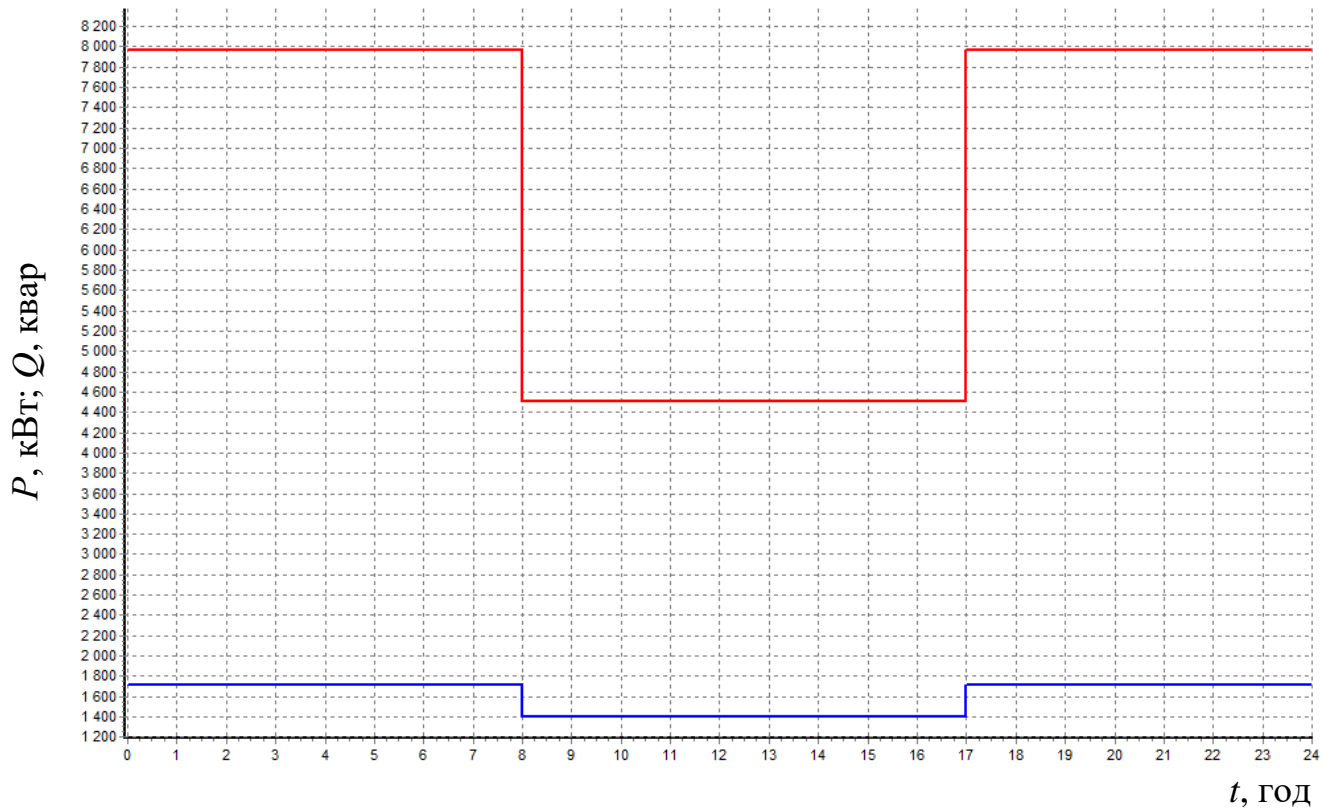


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (з.в.)

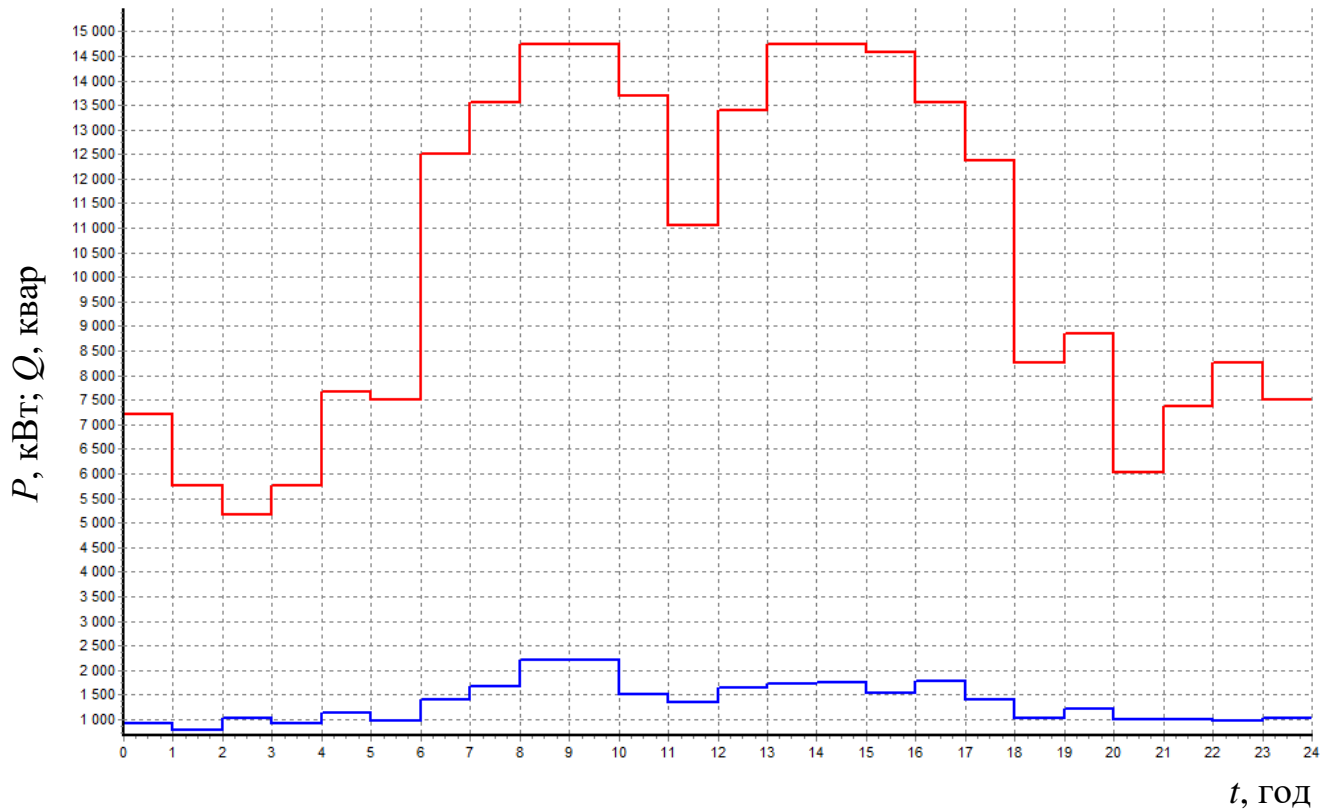



Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

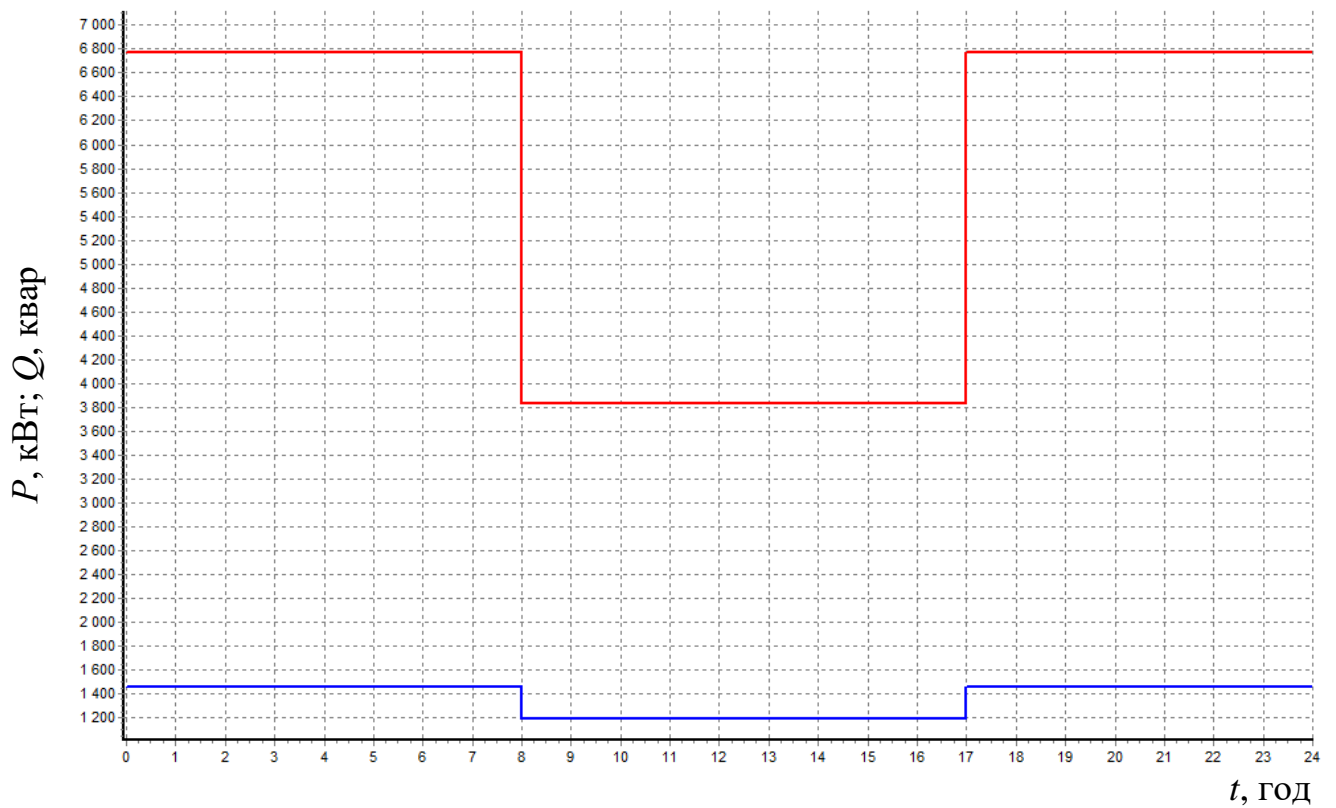


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

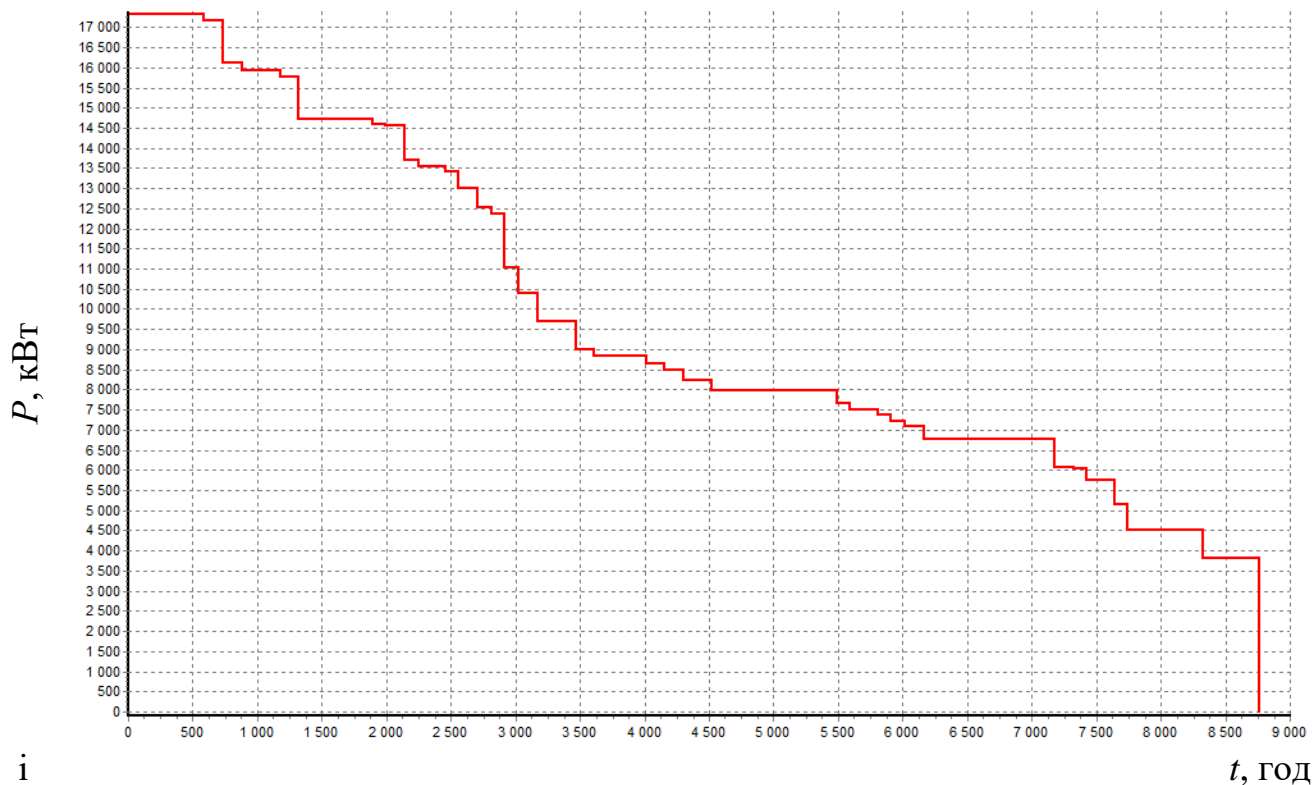



Рис. 1.5. Річний графік за тривалістю

Таблиця 1.6. Результати розрахунку графіків

№	Назва параметру	Знач.	Од. вим.
1	$S_{розр}$	17522,81	МВА
2	$W_{з.р.}$	43050273	кВт·год
3	$V_{з.р.}$	5566596	квар·год
4	$W_{з.в.}$	10407735	кВт·год
5	$V_{з.в.}$	2492880	квар·год
6	$W_{л.р.}$	26137965	кВт·год
7	$V_{л.р.}$	3379530	квар·год
8	$W_{л.в.}$	6533280	кВт·год
9	$V_{л.в.}$	1565136	квар·год
10	$W_{річн.}$	86129253	кВт·год
11	$V_{річн.}$	13004142	квар·год
12	$T_m$	4971	год
13	$\tau_m$	3379	год

## РОЗДІЛ 2

### КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розрахунок картограми термічного відділення:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_{\text{осв}} + P_{\text{сил}}}{\pi m}} = \sqrt{\frac{3143,69 + 53,84}{3,14 \cdot 0,2}} = 71,34 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}} \cdot 360}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{53,84 \cdot 360}{3143,69 + 53,84} = 6,06^\circ$$

Центр електричних навантажень:

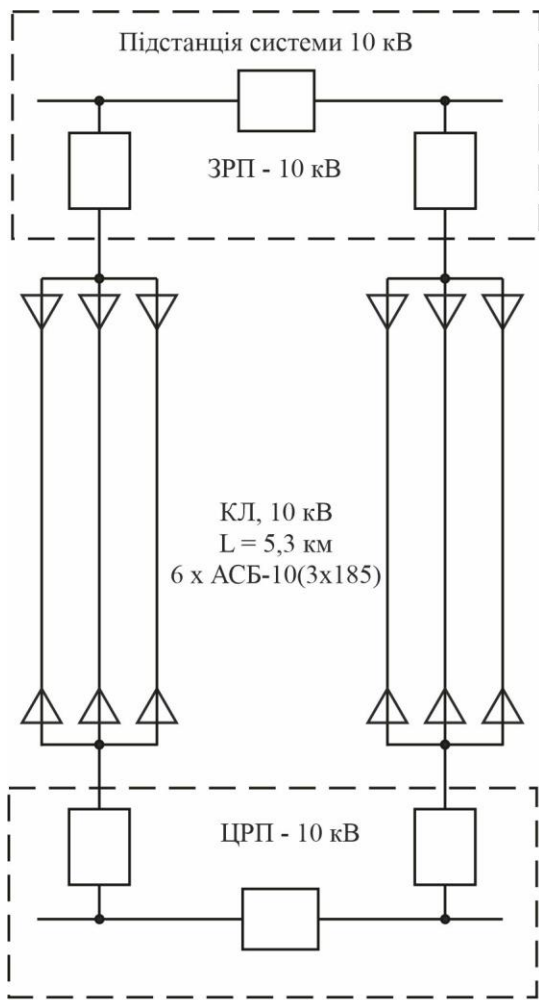
$$X = \frac{\sum_{j=1}^m X_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{5890510,37}{19273,28} = 305,6 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{2388893,71}{19273,28} = 123,9 \text{ м}$$

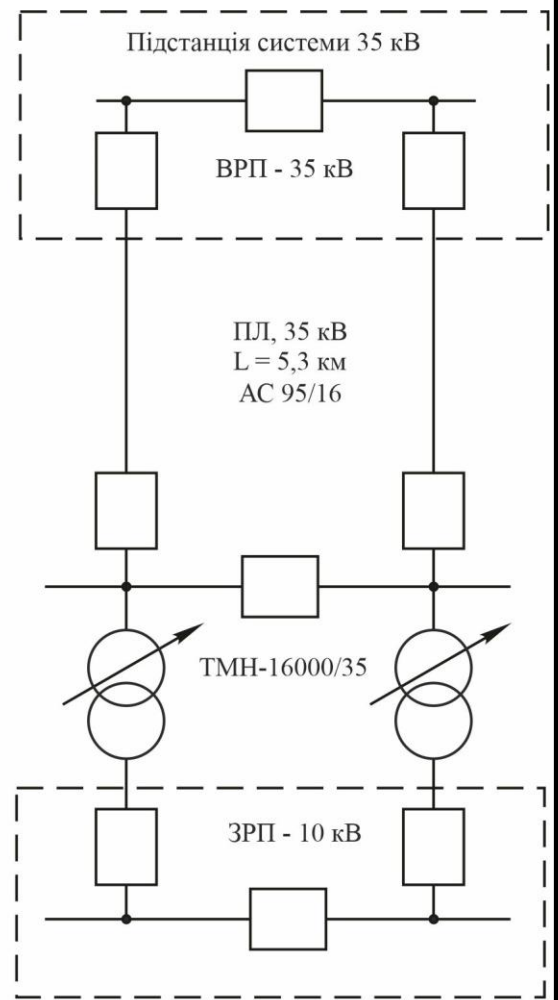
Таблиця 2.1. Картограма ел. навантажень

№	Назва цеху	$P_{\text{силь}}$ , кВт	$P_{\text{осв}}$ , кВт	$P_1$ , кВт	$m$	$R$ , мм	$\alpha$ , град	$x$ , м	$y$ , м	$P_1 \cdot x$ , кВт·м	$P_1 \cdot y$ , кВт·м
1.	Термічне відділення № 1	3143,69	53,84	3197,53	0,2	71,34	6,06	369,00	210,00	1179888,57	671481,30
2.	Зварювальне відділення № 1	3241,06	48,26	3289,32	0,2	72,35	5,28	321,00	163,00	1055871,72	536159,16
3.	Заготівельне відділення	287,35	48,17	335,52	0,2	23,11	51,68	369,00	163,00	123806,88	54689,76
4.	Цех конічних свердел	1245,34	45,17	1290,51	0,2	45,32	12,60	416,00	163,00	536852,16	210353,13
5.	Цех прокату свердел	519,88	85,27	605,15	0,2	31,03	50,73	389,00	114,00	235403,35	68987,10
6.	Зварювальне відділення № 2	4427,13	78,25	4505,38	0,2	84,68	6,25	389,00	86,00	1752592,82	387462,68
7.	Цех мігчиків	836,3	116,23	952,53	0,2	38,94	43,93	201,00	61,00	191458,53	58104,33
8.	Цех плашок	267,67	52,33	320,00	1,2	9,21	58,87	355,00	58,00	113600,00	18560,00
9.	Цех фрез	939,76	112,42	1052,18	0,2	40,92	38,46	54,00	42,00	56817,72	44191,56
10.	Термічне відділення № 2	2163,52	177,86	2341,38	0,2	61,04	27,35	255,00	24,00	597051,90	56193,12
11.	Насосна										
	а) 0,4 кВ	313,76	14,11	327,87	0,2	22,84	15,49	34,00	205,00	11147,58	67213,35
	б) 10,5 кВ (АД)	1050	0	1050,00	0,2	40,88	0,00	34,00	205,00	35700,00	215250,00
12.	Територія заводу	0	5,91	5,91	0,2	3,07	360,00	54,00	42,00	319,14	248,22
	<b>Всього по заводу</b>	<b>18435,46</b>	<b>837,82</b>	<b>19273,28</b>						<b>5890510,37</b>	<b>2388893,71</b>





а)



б)

Рис. 3.1. Схеми зовн. електропостачання

$$K_{\text{зав}} = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{168}{310} = 0,54$$

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{1км}} l_{\text{сум}} K_{\text{зав}}^2 = 22 \cdot 31,8 \cdot 0,2916 = 204 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{кл}} = \Delta P_{\text{кл}} \tau = 68 \cdot 3379,3 = 229792,4 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

$$C_{\text{втр.кл}} = \Delta W_{\text{сум}} C_0 = 229792,4 \cdot 8,87 \cdot 0,001 = 2038,26 \text{ тис.грн.}$$

Таблиця 3.1. Розрахунок капвкладень

№	Назва	Од.	К-сть	Вартість	Всього
1	КЛ 10 кВ	км	31,8	54	1717,2
2	Траншея	км.	5,3	14,3	75,79
3	Шафи КРП	шт.	2	10,7	21,4
Всього					1814,39

Таблиця 3.2. Поточні витрати

№	Назва	$K_j$	$P_{aj}$	$C_{aj}$	$P_{ej}$	$C_{ej}$	$C_j$
1	КЛ 10 кВ	1717,2	5	85,86	5	85,86	171,72
2	Траншея	75,79	5	3,7895	5	3,7895	7,579
3	Шафи КРП	21,4	15	3,21	5	1,07	4,28
Всього							183,58

Розрахунок збитку від недовідпуску електроенергії наведено нижче.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,004 + 1,272 = 1,276 \text{ 1/рік}$$

$$T_{\text{відн}} = \frac{\sum \lambda_i T_{\text{відн},i}}{\lambda} = \frac{(0,004 \cdot 0,00045 + 1,272 \cdot 0,001113)}{1,276} = 0,00111092 \text{ рік}$$

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

$$K_{\text{а.п}} = \lambda T_{\text{відн}} = 1,276 \cdot 0,00111092163009404 = 0,001417536$$

$$K_{\text{а.пр}} = 0,5 \lambda K_{\text{пр}}^2 = 0,5 \cdot 1,276 \cdot 0,00000576 = 0,00000367488$$

$$K_{\text{а.пр}}^{(2)} = K_{\text{а.п}}^2 + 2K_{\text{а.пр}} = 0,00000200940831 + 2 \cdot 0,00000367488 = 0,0000093592$$





**РОЗДІЛ 4**  
**РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ**  
**ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

**4.1 Баланс реактивної потужності**

Розрахунки балансу РП згідно [1] приведені нижче.

$$P_p = P_n + \Delta P_m + P_e = 18223 + 178,1 + 1050 = 19451,1 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_n + \Delta Q_m + Q_e = 24730,77 + 1004,21 + 650,73 = 26385,71 \text{ кВАр}$$

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 19451,1 \cdot 0,15 = 2917,67 \text{ кВАр}$$

$$Q_{КП} = Q_p - Q_e = 26385,71 - 2917,67 = 23468,04 \text{ кВАр}$$

$$N_0 = \frac{P_n}{\beta \cdot S_{ном}} = \frac{18223}{0,7 \cdot 1600} = 16,27 \approx 17 \text{ шт.}$$

**Варіант 1.**  $N = 17$  шт.

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{ном})^2 - P_n^2} = \sqrt{(17 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 18223^2} = 5517,6 \text{ кВАр}$$

$$Q_{KH} = Q_n - Q_1 = 24730,77 - 5517,6 = 19213,17 \text{ кВАр}$$

$$Q_{KB} = Q_p - Q_{KH} - Q_e = 26385,71 - 19213,17 - 2917,67 = 4254,87 \text{ кВАр}$$



Таблиця 4.4. Результати вибору КП ( $N_T = 19$  шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{розр},$ кВт	$Q_{розр},$ квар	$Q_{проп},$ квар	$Q_{комп},$ квар	К-сть та потужн. батарей конд., шт. · кВАр	$Q_{БКсум},$ квар	$Q_{кп} -$ $Q_{бк},$ квар	$K_{зав}$	$S_{розр},$ кВА
1,2	3	3229,4	1607,61	927,67	679,94	3·225;	675	4,94	0,7	3361,37
3,4	4	3322,47	8064,87	3005,26	5059,61	4·200; 8·536;	5088	-28,39	0,7	4461
5	2	2106,5	2011,37	761,75	1249,62	2·225; 2·402;	1254	-4,38	0,7	2238,52
6,7	5	4551,29	10679,5	3262,78	7416,69	1·50; 5·402; 10·536;	7420	-3,31	0,7	5598,07
8,9,10	5	4874,75	3347,18	2756,23	590,95	5·50; 5·67;	585	5,95	0,7	5602,93

БК 0,4 кВ: 15022 квар.; БК 10 кВ: 10350 квар.

Втрати потужності:

$$\Delta P_{БКН} = P_{ТП}^{БКН} \cdot Q_{БКН} = 0,0045 \cdot 20764 = 93,44 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{БКВ} = P_{ТП}^{БКВ} \cdot Q_{БКВ} = 0,003 \cdot 3600 = 10,8 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_T = \frac{P_H^2 + Q_1^2}{U_{НОМ}^2} R_{тр} \cdot 10^{-3} = \frac{18223^2 + 5517,6^2}{10^2} \cdot 0,03 \cdot 0,001 = 108,76 \text{ кВт}$$

Вартість КП:

$$K_{БКН} = \sum_{i=1}^n N_{БКН i} K_{БКН i} = 6 \cdot 23,58 + 7 \cdot 25,38 + 1 \cdot 26,46 + 4 \cdot 28,08 +$$

$$+ 5 \cdot 39,78 + 3 \cdot 48,33 + 6 \cdot 58,86 + 28 \cdot 73,62 = 3216,33 \text{ тис.грн.}$$

$$K_{БКВ} = \sum_{i=1}^n N_{БКВ i} K_{БКВ i} = 2 \cdot 308,2752 = 616,55 \text{ тис.грн.}$$

Вартість ТП:

$$K_{ТП} = N_{ТП2} K_{ТП2} + N_{ТП1} K_{ТП1} = 7 \cdot 6380 + 3 \cdot 3375 = 54785 \text{ тис.грн.}$$



**РОЗДІЛ 5**  
**ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ**  
**ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА**

Вибір силового трансформатора ТП-1:

$$K_{зав} = \frac{S_{розр}}{n_{тр} S_{ном тр}} = \frac{2240,91}{2 \cdot 1600} = 0,7$$

$$S_{ном тр} = 2 \cdot 1600 = 3200 \geq \frac{S_{розр}}{K_1} = \frac{2240,91}{1,08} = 2075$$

$$S_{ном тр} = 1600 \geq \frac{S_{розр}}{K_2} = \frac{2240,91}{1,4} \approx 1600$$

Таблиця 5.1. Результати вибору цехових трансформаторів

№	К-сть тр.	$S_{розр}$ , кВА	$K_{зав}$	$\frac{S_{ном} > S_{розр}}{K_1}$	$S_{ном} > S_{розр}/K_2$
ТП-1	2	2240,91	0,70	2075	1601
ТП-2	1	1120,46	0,70	1037	800
ТП-3	2	2239,81	0,70	2074	1600
ТП-4	1	1119,90	0,70	1037	800
ТП-5	2	2238,52	0,70	2073	1599
ТП-6	2	2275,65	0,71	2107	1625
ТП-7	2	2275,65	0,71	2107	1625
ТП-8	2	2241,17	0,70	2075	1601
ТП-9	2	2241,17	0,70	2075	1601
ТП-10	1	1120,59	0,70	1038	800

## РОЗДІЛ 6

### РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

#### 6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Опори елементів мережі:

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

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

$$R_{кл} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,167 \cdot 5,3}{3} = 0,295 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,077 \cdot 5,3}{3} = 0,14 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X_c + X_{кл} = 1,103 + 0,14 = 1,243 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{кл} = 0,044 + 0,295 = 0,339 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,339^2 + 1,243^2} = 1,288 \text{ Ом}$$

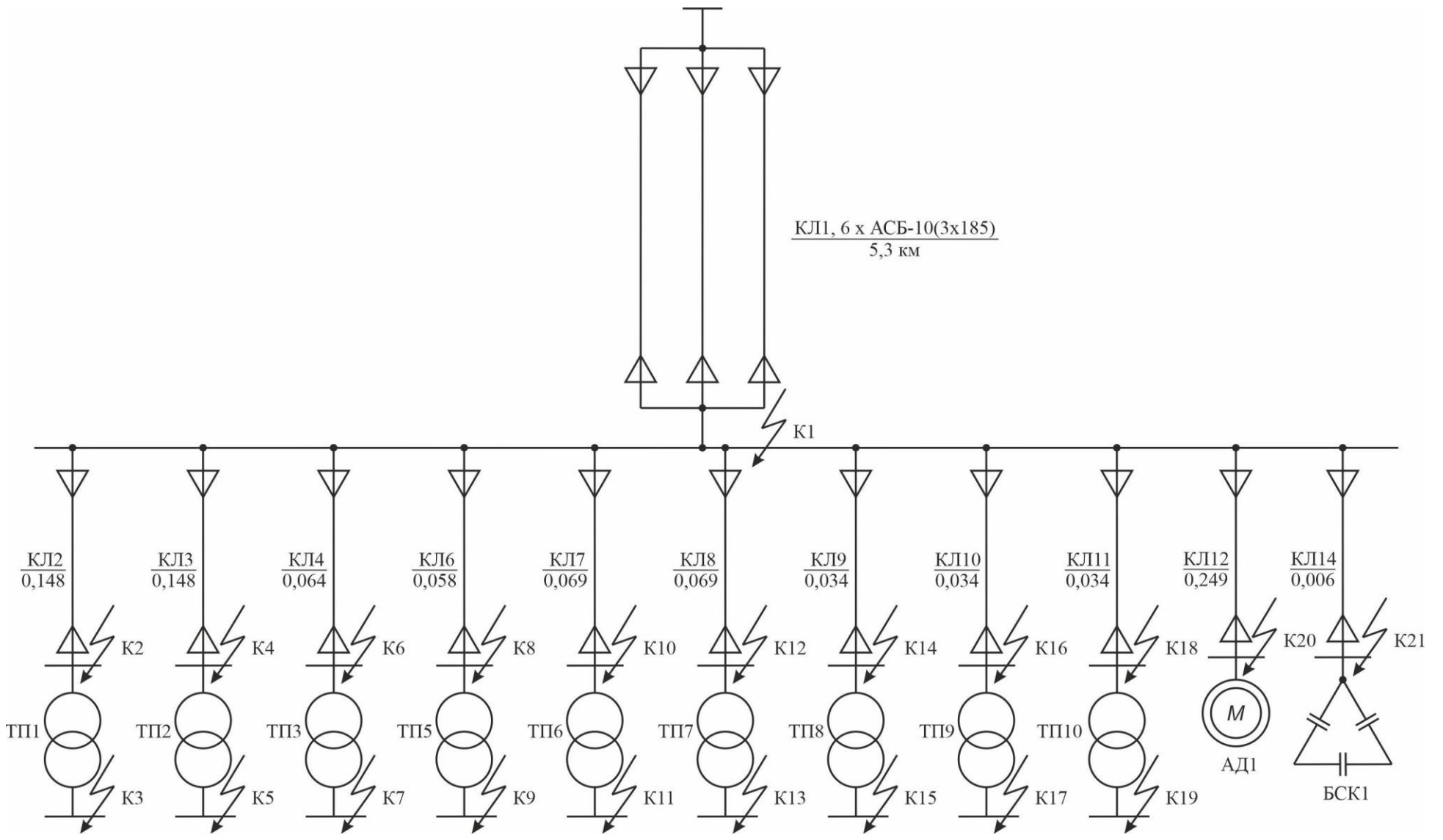


Рис. 6.1. Розрахункова схема

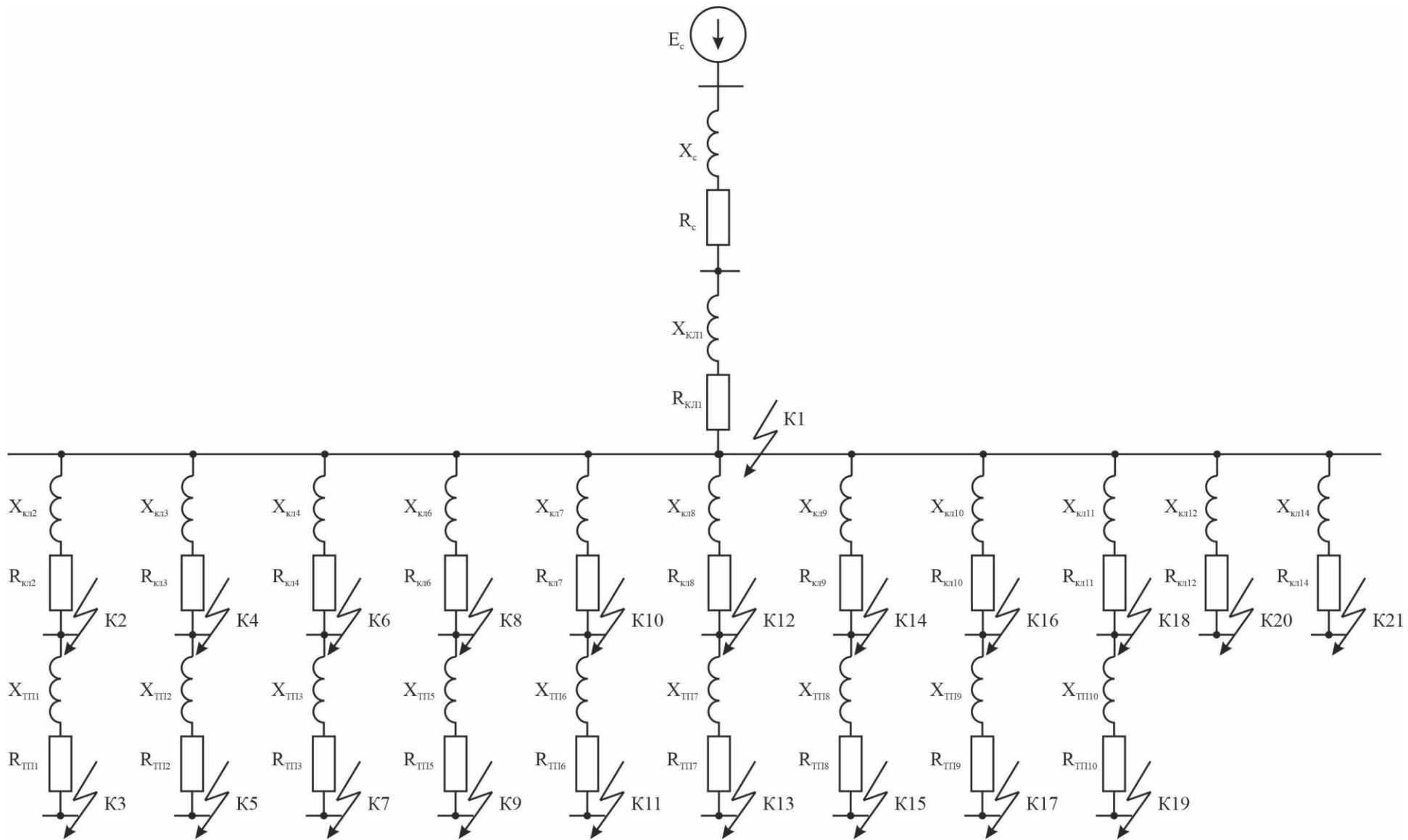


Рис. 6.2. Схема заміщення

Параметри струму к.з. в т. К1:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,288} = 4,71 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{1,243}{314 \cdot 0,339} = 0,0117 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0117}} = 1,425$$

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2}k_{y\partial} I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,425 \cdot 4,71 = 9,49 \text{ кА}$$

Струм підживлення від АД 10 кВ:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos\varphi_{\text{ном}} \cdot \eta} = \frac{0,7}{0,85 \cdot 0,92} = 0,895 \text{ МВА}$$

$$X_{\text{АД}} = \frac{1}{I_{\text{пуск}}} \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 0,895} = 23,69 \text{ Ом}$$

$$I''_{K1(\text{АД})} = n_{\text{АД}} \frac{E_* \cdot U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}X_{\text{АД}}} = 2 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 23,69} = 0,46 \text{ кА}$$

$$i_{y\partial 1(\text{АД})} = \sqrt{2}k_{y\partial(\text{АД})} I''_{K1(\text{АД})} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,46 = 1,11 \text{ кА}$$

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(\text{АД})} = 4,71 + 0,46 = 5,17 \text{ кА}$$

$$i_{y\partial 1} = i_{y\partial 1(c)} + i_{y\partial 1(AD)} = 9,49 + 1,11 = 10,6 \text{ кА}$$

Параметри вибору КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{2240,9}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 61,61 \text{ А}$$

$$B_k = I_{K1}^2 (t_{p.з.min} + T_a) = 5,17^2 (1,365 + 0,0117) = 36,8 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{36,8} \cdot 10^3 = 64,54 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель ААШВ-10(3 х 70).

Опір КЛ1:

$$R_{кл} = r_0 \cdot l_{кл} = 0,443 \cdot 0,148 = 0,066 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = x_0 \cdot l_{кл} = 0,086 \cdot 0,148 = 0,013 \text{ Ом}$$

Параметри струму к.з. в т. К2:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кл} = 1,243 + 0,013 = 1,256 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кл} = 0,339 + 0,066 = 0,405 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,405^2 + 1,256^2} = 1,32 \text{ Ом}$$

Таблиця 6.1. Розрахунок опорів КЛ

№	$l$ , км	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$R$ , Ом	$X$ , Ом
1	5,300	0,167	0,077	0,295	0,136
2	0,148	0,443	0,086	0,066	0,013
3	0,148	0,443	0,086	0,066	0,013
4, 5	0,064	0,443	0,086	0,028	0,006
6	0,058	0,443	0,086	0,026	0,005
7	0,069	0,443	0,086	0,031	0,006
8	0,069	0,443	0,086	0,031	0,006
9	0,034	0,443	0,086	0,015	0,003
10	0,034	0,443	0,086	0,015	0,003
11	0,034	0,443	0,086	0,015	0,003
12,13	0,249	0,443	0,086	0,110	0,021
14,15	0,006	0,326	0,083	0,002	0,000

$$I''_{K2} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3}Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,32} = 4,59 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{1,256}{314 \cdot 0,405} = 0,0099 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0099}} = 1,364$$

$$i_{y\partial 2} = \sqrt{2}k_{y\partial} I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,364 \cdot 4,59 = 8,85 \text{ кА}$$

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. К3:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{mp}) \left( \frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (1,256 + 3,79) \left( \frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0073 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{mp}) \left( \frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (0,405 + 0,5) \left( \frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0013 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0013^2 + 0,0073^2} = 0,0074 \text{ Ом}$$

$$I_{K3}'' = \frac{U_{cp.ном}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0074} = 31,21 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0073}{314 \cdot 0,0013} = 0,0179 \text{ с}$$

$$k_{y\partial 3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0179}} = 1,572$$

$$i_{y\partial 3} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,572 \cdot 31,21 = 69,38 \text{ кА}$$

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

№	$R$ , Ом	$X$ , Ом	$I_{к}''$ , кА	$T_a$ , с	$k_{уд}$	$i_{уд}$ , кА
1	0,3390	1,2430	5,17	0,0117	1,425	10,60
2	0,4050	1,2560	4,59	0,0099	1,364	8,85
3	0,0013	0,0073	31,21	0,0179	1,572	69,38
4	0,4050	1,2560	4,59	0,0099	1,364	8,85
5	0,0013	0,0073	31,21	0,0179	1,572	69,38
6	0,3670	1,2490	4,66	0,0108	1,396	9,20
7	0,0013	0,0073	31,21	0,0179	1,572	69,38
8	0,3650	1,2480	4,66	0,0109	1,400	9,23
9	0,0013	0,0073	31,21	0,0179	1,572	69,38
10	0,3700	1,2490	4,65	0,0108	1,396	9,18
11	0,0013	0,0073	31,21	0,0179	1,572	69,38
12	0,3700	1,2490	4,65	0,0108	1,396	9,18
13	0,0013	0,0073	31,21	0,0179	1,572	69,38
14	0,3540	1,2460	4,68	0,0112	1,409	9,33
15	0,0012	0,0073	31,21	0,0194	1,597	70,49
16	0,3540	1,2460	4,68	0,0112	1,409	9,33
17	0,0012	0,0073	31,21	0,0194	1,597	70,49
18	0,3540	1,2460	4,68	0,0112	1,409	9,33
19	0,0012	0,0073	31,21	0,0194	1,597	70,49
20	0,4490	1,2640	4,52	0,0090	1,329	8,50
21	0,3410	1,2430	4,70	0,0116	1,422	9,45

## 6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

КЛ до ТП1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp,ном}} = \frac{2240,9}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 61,61 \text{ A}$$

Обираємо 2 х ААШВ-10(3х70).

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

$$I_{ас} = 123,22 \text{ A} \leq K_{ан} \cdot K'_n \cdot I_{дон} = 1,35 \cdot 1 \cdot 165 = 222,75 \text{ A}$$

$$B_k = I_{к1}^2 (t_{p,з,мин} + T_a) = 5,17^2 (1,365 + 0,0117) = 64,54 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{мин} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{36,8} \cdot 10^3 = 64,54 \text{ мм}^2$$

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 <sup>2</sup> с	$F_{\text{min}},$ мм <sup>2</sup>	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	6	17461	160,02	320,04	36,8	64,54	6 х АСБ-10(3 х 185)	310	0,75	232,5	1,35	0,85	355,73
2	2	2240,9	61,61	123,22	36,8	64,54	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
3	1	1120,5	61,61	-	36,8	64,54	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	165	-	-	-
4, 5	3	3359,7	61,58	123,16	36,8	64,54	3 х ААШВ-10(3х70)	165	0,85	140,25	1,35	0,9	200,48
6	2	2238,5	61,54	123,08	36,8	64,54	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
7	2	2275,6	62,56	125,12	36,8	64,54	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
8	2	2275,6	62,56	125,12	36,8	64,54	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
9	2	2241,2	61,62	123,24	36,8	64,54	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
10	2	2241,2	61,62	123,24	36,8	64,54	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,9	148,5	1,35	1	222,75
11	1	1120,56	61,61	-	36,8	64,54	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	165	-	-	-
12,13	1	700	38,49	-	36,8	64,54	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1	165	-	-	-
14,15	1	1800	98,97	-	36,8	64,54	1 х ААШВ-10(3х95)	205	1	205	-	-	-

### 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
Номинальна напруга, кВ	$U_{вст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 11$
Довготр. струм, кА	$I_{р.ф.} \leq I_{ном}$	$786,41 \leq 1000$
Відключаюча здатність: - симетр. струм: - аперіод. склад.: - повний струм:	$I_{нт} \leq I_{в.н.}$ $i_{ат} \leq \sqrt{2}\beta_{ном} I_{в.н.}$ $\sqrt{2}I_{нт} + i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{н.в.} (1 + \beta_{ном})$	$5,17 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 5,17 + 0 < < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $7,31 \leq 39,6$
Динамічна стійкість: - симетр. струм: - уд. струм:	$I'' \leq I_{д.ст.}$ $i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{д.ст.}$	$5,17 \leq 52$ $10,6 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{т.ном}^2 t_{т.ном}$	$33,51 \leq 1200$

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

$$i_{ат} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 5,17 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0117}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_k = I''^2 (t_{с.с.} + t_{пз. max} + T_a) = 5,17^2 (0,042 + 1,2 + 0,0117) = 33,5 \text{ кА}^2 \text{ с}$$

Обираємо ВР2-10-20/1000.

## 6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема приєднання ТВП наведена на рис. 6.3.

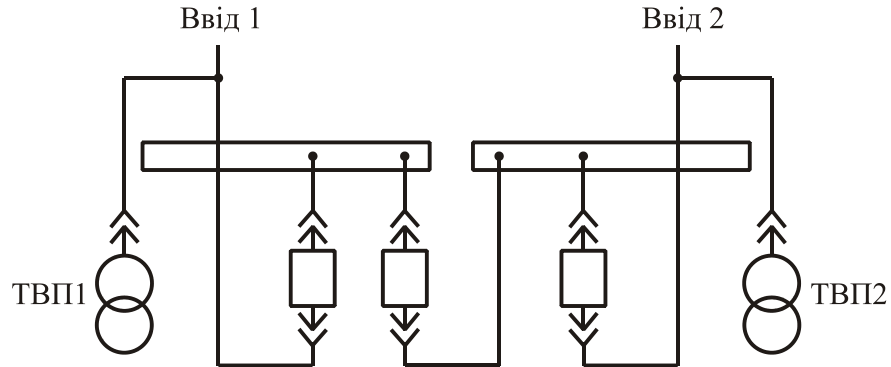


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП

Таблиця 6.5. Розрахунок електр. навант. ТВП

№	Назва споживача	P <sub>н</sub> , кВт	n, шт.	P <sub>Σ</sub> , кВт	cosφ	tgφ	P <sub>вст</sub> , кВт	Q <sub>вст</sub> , квар
1.	Пристрої підігріву комірок КРП	0,6	30	18	0,97	0,25	18	5
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							72	20

Сумарне навант. ТВП:

$$S_{вст} = \sqrt{P_{вст}^2 + Q_{вст}^2} = \sqrt{72^2 + 20^2} = 74,73 \text{ кВА}$$



## РОЗДІЛ 7

### СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

#### 7.1 Аналітичний огляд засобів регулювання напруги в розподільних електричних мережах

Провідними технічними рішеннями для керування напругою в електроенергетичній системі України є трансформатори з можливістю регулювання під навантаженням (РПН) та без навантаження (ПБВ), а також керування збудженням синхронних генераторів електростанцій. До сучасних засобів регулювання також належать статичні тиристорні компенсатори (СТК), синхронні компенсатори, батареї статичних конденсаторів та реактори.

Планування необхідних рівнів напруги в контрольних вузлах електричної мережі традиційно здійснюється на квартальній основі або відповідно до сезонних особливостей енергоспоживання. Однак такий підхід не дозволяє повною мірою врахувати всі експлуатаційні режими, що можуть виникнути протягом періоду застосування програми. Особливо це стосується непередбачуваних змін рівня споживання електроенергії, коливань генерації відновлюваних джерел енергії та відхилень від запланованої конфігурації енергосистеми.

Сучасні тенденції розвитку електроенергетики вимагають впровадження інтелектуальних систем управління напругою (Smart Grid технологій), які забезпечують автоматичне регулювання в реальному часі. До таких систем належать:

- СТАТКОМ (статичні синхронні компенсатори) – швидкодіючі пристрої на базі силової електроніки
- Системи накопичення енергії (BESS) – батарейні системи, що можуть швидко регулювати реактивну потужність





Схема трансформатора з РПН показана на рис. 1.

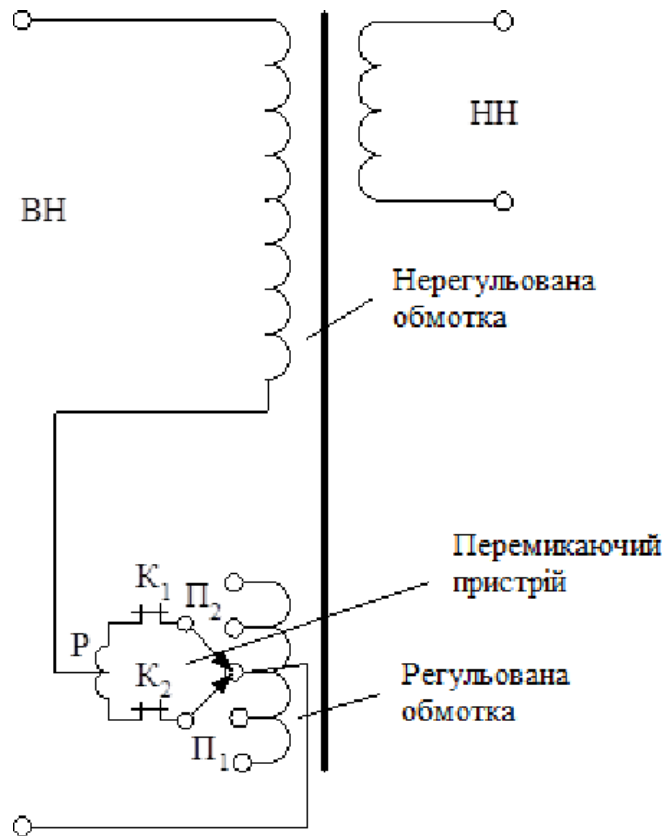


Рис. 7.1. Схема силового трансформатора з РПН

Конструктивні особливості таких трансформаторів полягають в наступному:

- Менші габарити контактних груп – через зниження струмових навантажень;
- Спрощена ізоляційна конструкція – відносно меншої потужності дугогасіння;
- Зменшені втрати в контактах – за рахунок нижчих струмів комутації;
- Підвищена надійність – менше ймовірність пошкодження контактних елементів.

Водночас існують альтернативні рішення розміщення регульовальних відгалужень на стороні нижчої напруги, що застосовуються в особливих випадках:

Регулювання на стороні НН:

- Використовується при необхідності точного регулювання споживчої напруги;

- Застосовується в розподільних трансформаторах малої потужності;

- Вимагає більш потужних комутаційних пристроїв через вищі струми.

Розвиток технологій силової електроніки призводить до впровадження електронних регуляторів напруги (ЕТРН), які можуть встановлюватися на будь-якій стороні трансформатора. Такі пристрої забезпечують:

- Безконтактне регулювання – відсутність механічних контактів;

- Високу швидкодію – регулювання за частки секунди;

- Плавне регулювання – без ступінчастих змін напруги;

- Мінімальні втрати – завдяки використанню напівпровідникових елементів.

Вибір розміщення регулювальної гілки також залежить від специфіки мережі, вимог до якості електроенергії та економічних чинників. У високовольтних мережах перевага надається регулюванню на стороні ВН, тоді як у розподільних мережах можливе застосування комбінованих схем регулювання.

$$U_{2B} = U_1 - \Delta U_m$$

$$U'_{2H} = U_{2B} - \Delta U_T;$$

Напруга на стороні НН визначається:

$$U_{2H} = \frac{U'_{2H}}{k},$$

Силові трансформатори, що не обладнані системами регулювання під навантаженням, випускаються зі стандартною схемою відгалужень, яка включає одну основну та чотири додаткові регулювальні гілки. Така конфігурація забезпечує можливість адаптації трансформатора до конкретних умов експлуатації в електричній мережі.





- Необхідна кількість регулювальних відгалужень для забезпечення якісної напруги споживачів;
- Оптимальна напруга перемикання для досягнення заданих параметрів на шинах низької напруги підстанції;
- Діапазон регулювання з урахуванням можливих коливань параметрів мережі.

Система регулювання напруги працює за принципом компенсації (зустрічного регулювання), що передбачає:

- Підвищення коефіцієнта трансформації при зниженні напруги в мережі;
- Зниження коефіцієнта трансформації при підвищенні напруги живлення;
- Автоматичну адаптацію до змін режиму роботи електроустановок споживачів;

Критичним етапом розрахунків є врахування внутрішнього падіння напруги на опорах трансформатора. Це падіння складається з:

- Активної складової - втрати на активному опорі обмоток;
- Реактивної складової - втрати на індуктивному опорі розсіювання;
- Залежності від навантаження – пропорційність квадрату струму навантаження.

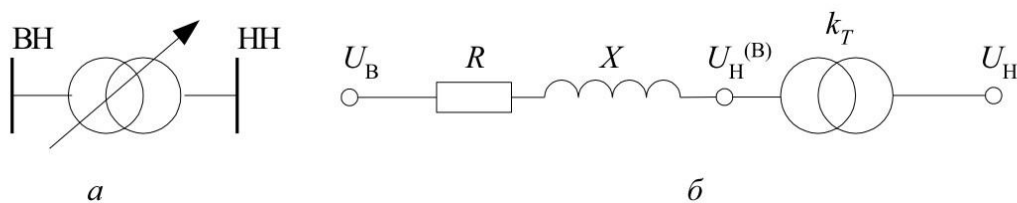


Рис 7.2 – Трансформатор з пристроєм регулювання напруги:

При виборі оптимального відгалуження необхідно розрахувати напругу з урахуванням внутрішніх втрат трансформатора:

$$U_2 = U_1/K - \Delta U_{тр}$$

де:  $U_2$  - напруга на шинах низької напруги підстанції

$U_1$  - напруга на стороні високої напруги

$K$  - коефіцієнт трансформації обраного відгалуження

$\Delta U_{\text{тр}}$  - падіння напруги в трансформаторі, приведене до сторони НН

Для точного розрахунку необхідно враховувати:

- Параметри короткого замикання трансформатора ( $uk\%$ ,  $P_x$ )
- Характер навантаження ( $\cos \varphi$ , коефіцієнт потужності)
- Температурні умови роботи обладнання
- Додаткові втрати в контактних з'єднаннях та перемикаючих пристроях

Сучасні програмні комплекси (ETAP, DIgSILENT PowerFactory, RASTR) дозволяють автоматизувати процес розрахунку та оптимізації параметрів регулювання напруги з урахуванням всіх технічних факторів та обмежень.

У сучасній електроенергетиці застосовується широкий спектр технічних засобів, призначених для управління як реактивною потужністю, так і рівнями напруги в електричних мережах. Ці пристрої забезпечують стабільність роботи енергосистеми та підтримання якості електроенергії.

Основні категорії регулюючих пристроїв:

#### 1. Обертові електричні машини:

- Синхронні генератори електростанцій – основні джерела реактивної потужності, здатні як споживати, так і генерувати реактивну потужність залежно від режиму збудження;

- Синхронні компенсатори - спеціалізовані синхронні машини без механічного навантаження, призначені виключно для регулювання реактивної потужності;

- Синхронні двигуни промислових підприємств при роботі з перезбудженням.

#### 2. Статичні реактивні елементи:

- Батареї статичних конденсаторів (БСК) - для генерації ємнісної реактивної потужності та компенсації індуктивного навантаження









*Плавне регулювання:* На відміну від ступінчастого перемикачів традиційних БСК, СКРП забезпечують безперервне регулювання реактивної потужності в широкому діапазоні від повністю ємнісного до повністю індуктивного характеру.

*Компенсація реактивної потужності:*

- Двонаправлене регулювання - генерація та споживання реактивної потужності

- Автоматичне підтримання заданого коефіцієнта потужності ( $\cos \varphi$ )

- Адаптація до характеру навантаження - індуктивного або ємнісного

*Симетрування напруги:* СКРП ефективно усувають несиметрію напруг, викликану:

- Однофазними навантаженнями великої потужності

- Несиметричними аваріями в мережі

- Дугоплавильними печами та зварювальними установками

- Тяговими підстанціями електротранспорту

*Стабілізація напруги:* Системи забезпечують підтримання напруги в заданих межах шляхом:

- Швидкої інжекції або споживання реактивної потужності

- Компенсації коливань напруги від  $\pm 2\%$  до  $\pm 8\%$

- Демпфування осциляцій в енергосистемі

## **7.2 Застосування напівпровідникових силових трансформаторів**

На сьогодні технології регулювання напруги, що існують в розподільних мережах, включаючи регулювання навантаженням електростанцій і перемикачів без збудження, не відповідають вимогам сучасних тенденцій розвитку активних мереж, а саме регулювання напруги під час процесу.

В даний час нові технології регулювання напруги, які використовує напівпровідниковий пристрій для регулювання вихідної напруги навантажувального трансформатора на рівні підстанції 6-10/0,4кВ в активній







Алгоритм комутації при нульовому струмі допоміжних тиристорних елементів. Цей метод базується на принципі синхронізації моменту вимкнення тиристора з природним переходом струму через нульове значення. Такий підхід мінімізує комутаційні втрати та електромагнітні перешкоди, оскільки відключення відбувається в момент, коли потужність, що розсіюється на напівпровідниковому переході, дорівнює нулю.

На рис. 7.3. показані графіки струмів та напруг для випадку застосування алгоритму комутації при нульовому струмі допоміжних тиристорних елементів

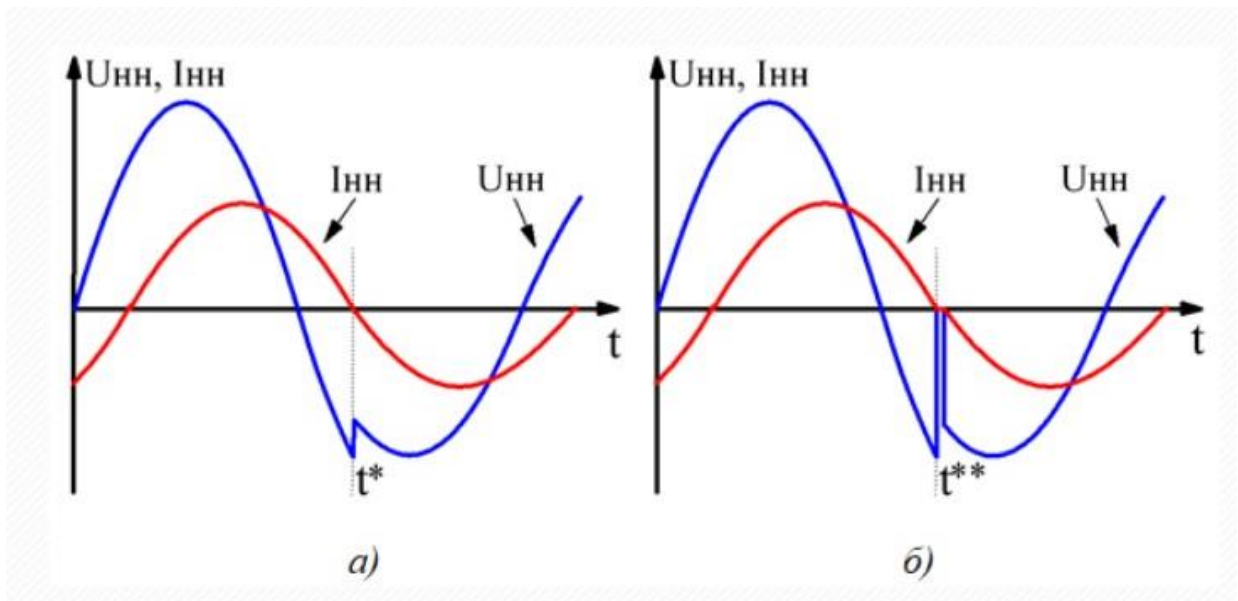


Рис. 7.3. Графіки струмів та напруг для випадку застосування алгоритму комутації при нульовому струмі допоміжних тиристорних елементів

Переваги методу нульового струму включають:

- Зниження термічних навантажень на тиристори за рахунок відсутності комутаційних перенапруг
- Мінімізація високочастотних завад у мережі живлення
- Підвищення надійності роботи силових напівпровідникових компонентів
- Зменшення електромагнітної сумісності проблем

Алгоритм комутації через застосування зворотної полярності напруги протягом визначеного часового інтервалу. Цей метод передбачає активне вимкнення тиристора шляхом подачі зворотної напруги на його керуючий

електрод протягом контрольованого періоду часу. Тривалість цього інтервалу зазвичай складає 10-50 мікросекунд, що забезпечує надійне відновлення блокуючих властивостей напівпровідникового переходу.

На рис. 7.4. показані графіки струмів та напруг для випадку застосування алгоритму комутації через застосування зворотної полярності напруги протягом визначеного часового інтервалу

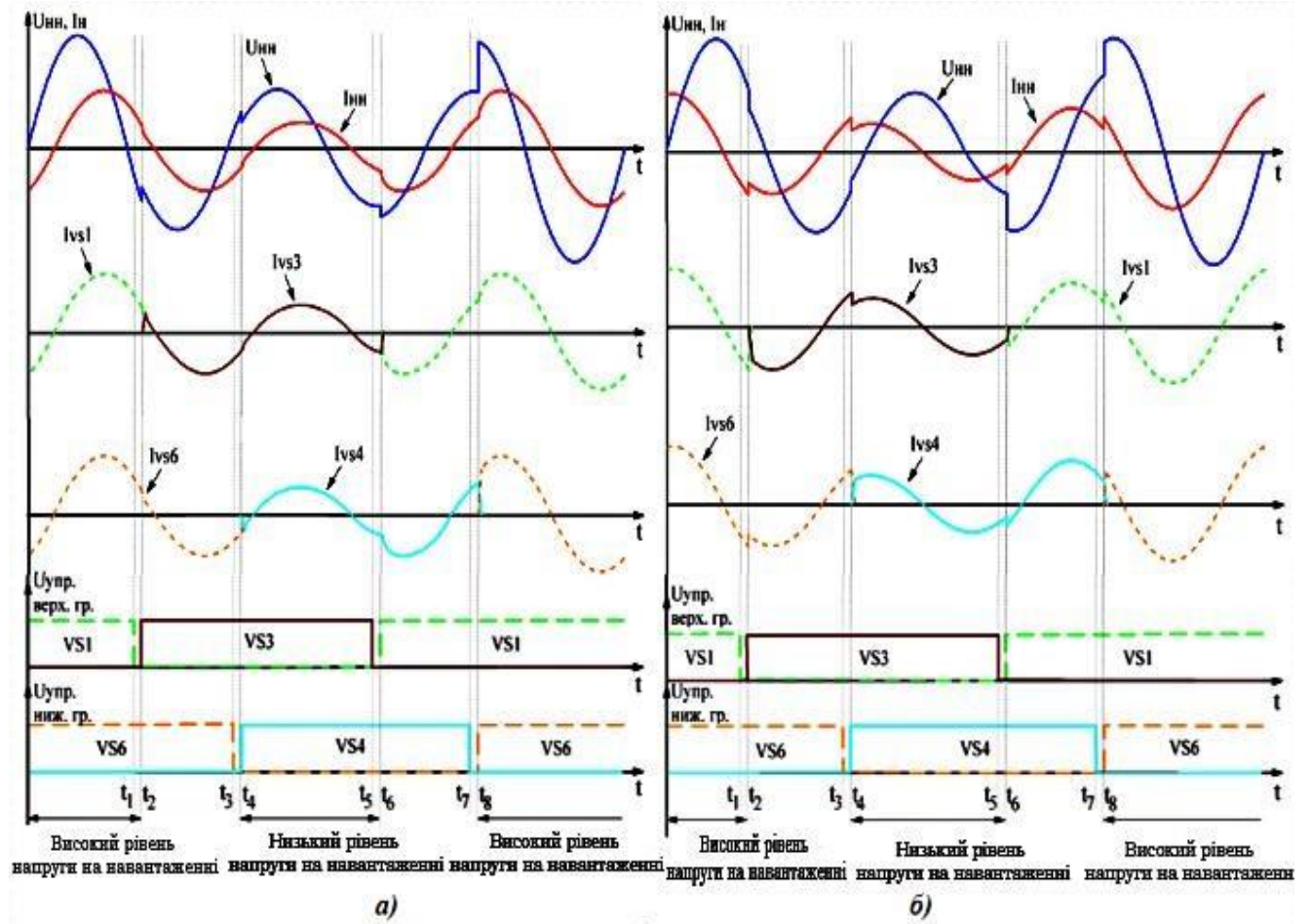


Рис. 7.4. Графіки струмів та напруг для випадку застосування алгоритму комутації через застосування зворотної полярності напруги протягом визначеного часового інтервалу

Технічні особливості реалізації:

- Формування імпульсу зворотної полярності потребує додаткових схемних рішень з використанням допоміжних конденсаторів або трансформаторів







вставляються послідовно в лінію електропередачі та здатні змінювати її ефективний реактивний опір, контролюючи таким чином потоки активної потужності.

*Паралельні компенсатори* представлені статичними варовими компенсаторами (SVC) та статичними синхронними компенсаторами (STATCOM). Вони підключаються паралельно до мережі та забезпечують динамічне регулювання реактивної потужності для стабілізації напруги в вузлах електричної мережі.

*Комбіновані системи* поєднують переваги послідовного та паралельного підключення, найяскравішим прикладом яких є об'єднаний регулятор потоків потужності (UPFC).

Швидкодія реагування сучасних систем FACTS становить 1-5 мілісекунд, що значно перевищує можливості традиційних електромеханічних регуляторів. Це дозволяє ефективно демпфувати низькочастотні коливання в енергосистемі та підвищувати межі стійкості.

Точність регулювання досягає  $\pm 1\%$  для напруги та  $\pm 2\%$  для реактивної потужності, що забезпечує високу якість електроенергії навіть при значних збуреннях у мережі.

Пристрої FACTS особливо ефективні при інтеграції відновлюваних джерел енергії, де їх здатність швидко компенсувати коливання генерації стає критично важливою. Вони також знаходять широке застосування для підвищення пропускної здатності існуючих ліній електропередачі без будівництва нових.

У розподільних мережах середньої напруги системи FACTS дозволяють реалізувати концепцію активних розподільних мереж, забезпечуючи двонаправлений потік потужності та підтримку якості електроенергії при змінному характері навантаження та розосередженої генерації.

Статичні синхронні компенсатори **\*\*СТАТКОМ\*\*** становлять одну із ключових складових технології FACTS. STATCOM (Static Synchronous Compensator) являє собою пристрій, що працює аналогічно статичному





$$S = \frac{U_c U_{st}}{X_L} \sin \alpha - j \left( \frac{U_c U_{st}}{X_L} \cos \alpha - \frac{U_c^2}{X_L} \right) = P - jQ,$$

Напруга статичного перетворювача підлягає керуванню як за амплітудою, так і за фазовим кутом, при цьому можливе незалежне регулювання в кожній із трьох фаз одночасно, що дозволяє змінювати споживану активну та реактивну потужності автономно одна від одної. Завдяки цій особливості СТАТКОМ здатен функціонувати в усіх чотирьох квадрантах характеристики потужності, проте лише протягом обмеженого часового інтервалу, оскільки споживання або генерація активної енергії спричиняє накопичення або виснаження енергії в конденсаторній батареї постійного струму. Енергія, що акумулюється в конденсаторі, знаходиться в прямо пропорційній залежності до квадрата напруги на його обкладинках.

Можливість незалежного регулювання напруги в кожній фазі надає STATCOM унікальні переваги для компенсації несиметричних навантажень та усунення негативної послідовності струмів у трифазних системах. Це досягається завдяки використанню розширених алгоритмів векторного керування, які дозволяють формувати різні амплітуди та фазові кути для кожної фази окремо. Система управління базується на швидких перетвореннях Кларка та Парка, що дозволяють розкласти трифазні величини на ортогональні складові активної та реактивної потужності в синхронній системі координат, що обертається.

Функціонування STATCOM у чотирьох квадрантах характеристики потужності означає здатність пристрою (рис. 7.9):

- Генерувати реактивну потужність при споживанні активної (I квадрант)
- Генерувати як реактивну, так і активну потужність (II квадрант)
- Споживати реактивну потужність при генерації активної (III квадрант)
- Споживати як реактивну, так і активну потужність (IV квадрант)

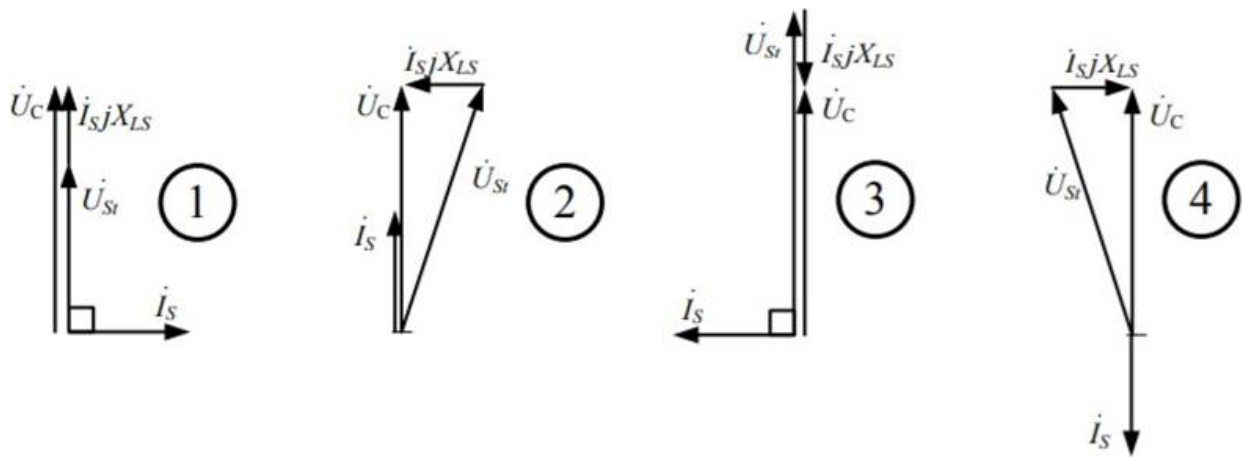


Рис. 7.9. Векторні діаграми напруг STATCOM

Ця універсальність робить STATCOM особливо ефективним для стабілізації енергосистем з високою динамікою навантажень та інтегрованими відновлюваними джерелами енергії.

Критичним фактором, що обмежує тривалість роботи STATCOM в активному режимі, є ємність конденсаторів постійного струму. Енергія, що зберігається в DC-ланці, описується формулою:

$$W = \frac{CU_{dc}^2}{2}$$

де  $C$  – ємність конденсаторної батареї,

$U_{dc}$  – напруга постійного струму.

Типова ємність DC-ланки сучасних STATCOM становить 10-50 мФ при напругах 1-10 кВ, що забезпечує енергетичний резерв для короткочасної підтримки активної потужності протягом декількох секунд.

Для подовження часу роботи в активному режимі застосовуються різні технічні рішення:

Гібридні системи з додатковими накопичувачами енергії (батареї, суперконденсатори, маховики) дозволяють значно збільшити енергетичний резерв системи.

Алгоритми балансування DC-напруги забезпечують автоматичне повернення напруги конденсаторної батареї до номінального рівня через короткочасне споживання або віддачу активної потужності.



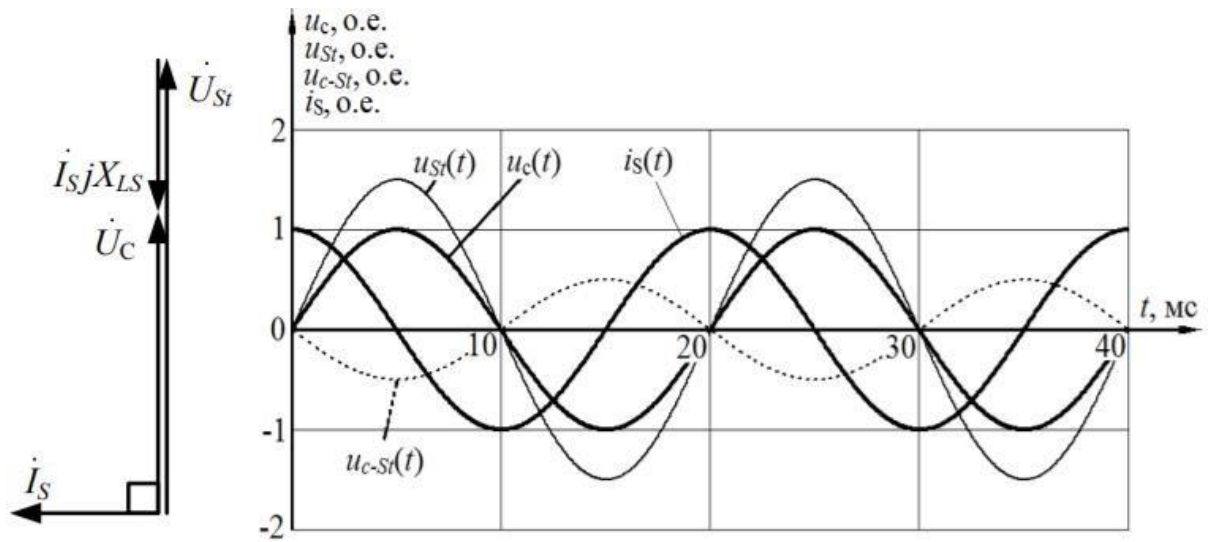


Рис. 7.12. Осцилограми напруг STATCOM, в режимі генерації реактивної потужності

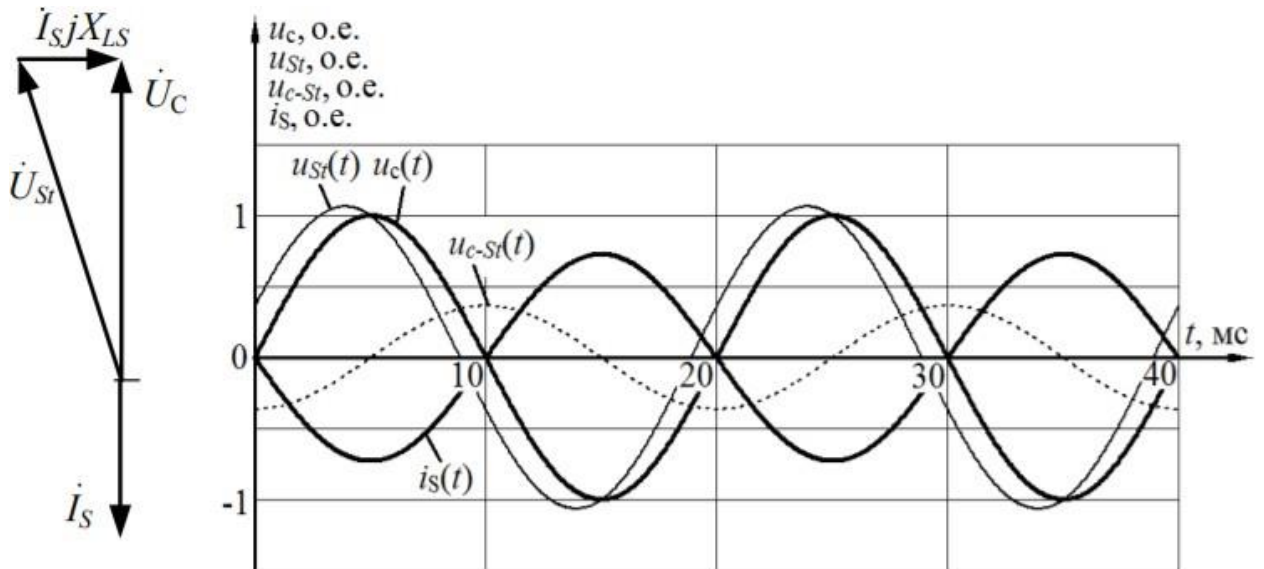


Рис. 7.10. Осцилограми напруг STATCOM, в режимі генерації активної потужності

Проведемо більш детальний аналіз чотирьохквadrантної роботи STATCOM

Функціонування STATCOM у чотирьох квадрантах характеристики потужності представляє унікальну можливість незалежного керування активною та реактивною складовими потужності, що робить цей пристрій надзвичайно гнучким інструментом управління енергосистемами.

### **I квадрант: Генерація реактивної потужності при споживанні активної**

У першому квадранті STATCOM працює як джерело реактивної потужності ( $Q > 0$ ) при одночасному споживанні активної потужності ( $P > 0$ ) з мережі. Цей режим реалізується, коли амплітуда вихідної напруги інвертора перевищує напругу мережі в точці підключення, а фазовий кут між ними становить  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ .

Фізично це означає, що STATCOM генерує ємнісний струм, компенсуючи індуктивні навантаження в мережі, водночас поповнюючи енергію своєї DC-ланки. Такий режим типовий при пуску системи або після тривалої роботи в режимі віддачі активної потужності, коли напруга конденсаторів DC-ланки знизилася нижче номінального рівня.

### **II квадрант: Генерація реактивної та активної потужності**

Другий квадрант характеризується одночасною генерацією як реактивної ( $Q > 0$ ), так і активної потужності ( $P < 0$ , тобто віддача в мережу). Цей режим досягається при амплітуді вихідної напруги, вищій за мережеву, та фазовому куті  $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ .

У цьому режимі STATCOM функціонує як синхронний генератор, віддаючи в мережу як ємнісний струм для компенсації реактивної потужності, так і активну потужність. Енергія для генерації активної потужності береться з конденсаторів DC-ланки, що призводить до поступового зниження їх напруги. Тривалість роботи в цьому режимі обмежена енергетичним запасом накопичувача.

### **III квадрант: Споживання реактивної потужності при генерації активної**

Третій квадрант передбачає споживання реактивної потужності ( $Q < 0$ ) при віддачі активної потужності в мережу ( $P < 0$ ). Реалізується при амплітуді вихідної напруги, нижчій за мережеву, та фазовому куті  $180^\circ < \varphi < 270^\circ$ .

STATCOM у цьому режимі споживає індуктивний струм, що може бути корисним для обмеження перенапруг у мережі при слабких навантаженнях, водночас віддаючи активну потужність з DC-накопичувача. Такий режим може





