

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛІШКОВ

“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Розроблення системи електропостачання заводу
з підйомно-транспортного обладнання»**

Виконав здобувач вищої освіти
ІІІ курсу, групи ЕЕ-22,
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Віталій ШУЛЬГА
« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ
« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

« ____ » _____ 2026 р.

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛЄШКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

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

Шульги Віталія Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) «Розроблення системи електропостачання заводу з підйомно-транспортного обладнання»

Development of a power supply system for a lifting and transport equipment plant»

2. Керівник роботи (проекту) Козловський Олександр Антонович, к.т.н., доц.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 2.06.2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи: Комплексне розроблення системи електропостачання заводу з підйомно-транспортного обладнання, що задовольняє сучасні критерії надійності та економічної ефективності.

1. Вступ. 2. Електричні навантаження. 3. Картограма електричних навантажень. 4. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання. 5. Компенсація реактивної потужності. 6. Трансформаторні підстанції. 7. Розрахунок струмів КЗ і вибір обладнання. 8. Спеціальний розділ. 9. Висновки. 10. Перелік посилань.

5. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальний розділ</i>	<i>доцент Н. Ю. Гарасьова</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи (проекту)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>17.04.26</i>	
2	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>20.04.26</i>	
3	<i>Картограма електричних навантажень</i>	<i>27.04.26</i>	
4	<i>Техніко-економічне обґрунтування схеми електропостачання</i>	<i>28.04.26</i>	
5	<i>Компенсація реактивної потужності</i>	<i>1.05.26</i>	
6	<i>Трансформаторні підстанції</i>	<i>4.05.26</i>	
7	<i>Розрахунок струмів КЗ і вибір обладнання</i>	<i>6.05.26</i>	
8	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>11.05.26</i>	
9	<i>Висновки</i>	<i>22.05.26</i>	
10	<i>Складання переліку бібліографічних посилань</i>	<i>25.05.26</i>	
11	<i>Оформлення пояснювальної записки роботи</i>	<i>26.05.26</i>	
12	<i>Оформлення слайдів (графічна частина роботи)</i>	<i>28.05.26</i>	

Дата видачі завдання

« 10 » « квітня » 2026 року

Підпис керівника

Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

Задання прийнято до виконання

« 10 » « квітня » 2026 року

Підпис здобувача

Віталій ШУЛЬГА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: загальний обсяг 86 с.; основний текст 75 с., 13 рис., 24 табл., 13 джерел; 1 додаток на 11 с.

Шульга, В. В. Розроблення системи електропостачання заводу з підйомно-транспортного обладнання. – Рукопис.

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

У кваліфікаційній роботі розроблено систему електропостачання заводу підйомно-транспортного обладнання з урахуванням вимог надійності, економічності та безпечної експлуатації. Визначено розрахункові електричні навантаження по цехах та заводу загалом, побудовано добові та річні графіки електроспоживання. Проведено техніко-економічне порівняння варіантів конфігурації розподільної мережі 10 кВ. Обґрунтовано потужність та місцем встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності, кількість і параметри трансформаторів цехових ТП. На основі розрахунку струмів короткого замикання здійснено вибір комутаційних апаратів, вимірювальних трансформаторів та перерізів кабельних ліній мережі 10 кВ.

У спеціальному розділі проаналізовано особливості роботи відцентрових насосних установок малої потужності та способи регулювання їхньої продуктивності з застосуванням частотно-регульованого електропривода на базі асинхронних двигунів. Обґрунтовано доцільність плавного регулювання частоти обертання як ефективного засобу енергозбереження. Проведено техніко-економічне обґрунтування застосування частотного регулювання для насосної установки потужністю 15 кВт.

Ключові слова: електропостачання заводу, розподільна мережа 10 кВ, компенсація реактивної потужності, частотне регулювання, насосні установки, енергозбереження

ABSTRACT

Qualification work: total volume 86 p.; main text: 75 p., 13 fig., 24 tabl. 13 references; 1 add. on 11 p.

Shulha, V. V. Development of a power supply system for a lifting and transport equipment plant. – Manuscript.

Bachelor's thesis in the specialisation 141 'Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics', study programme 'Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics'. – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

This thesis develops a power supply system for a lifting and transport equipment plant, taking into account the requirements of reliability, cost-effectiveness and safe operation. The calculated electrical loads for individual workshops and the plant as a whole have been determined, and daily and annual electricity consumption schedules have been drawn up. A technical and economic comparison of configuration options for the 10 kV distribution network has been carried out. The capacity and installation locations of reactive power compensation devices, as well as the number and parameters of workshop transformer substations, have been justified. Based on short-circuit current calculations, switching equipment, instrument transformers and cable cross-sections for the 10 kV network were selected.

A special section analyses the operational characteristics of low-power centrifugal pump units and methods for regulating their performance using frequency-controlled electric drives based on asynchronous motors. The feasibility of smooth speed control is justified as an effective means of energy saving. A technical and economic justification for the use of frequency control in a 15 kW pump unit has been provided.

Keywords: power supply to the plant, 10 kV distribution network, reactive power compensation, frequency control, pumping stations, energy saving

ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП	8
1. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	9
1.1 Силові навантаження в електромережі 0,4 кВ	9
1.2. Розрахунок освітлювального навантаження.....	12
1.3. Силові навантаження в мережі 10 кВ заводу.....	14
1.4. Графіки електричних навантажень.....	20
2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ І МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ ЦЕНТРАЛЬНОЇ РОЗПОДІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ 10 кВ	23
3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ.....	25
3.1. Вибір напруги і схеми приєднання заводу.....	25
3.2. Вибір схеми внутрішньої розподільної мережі.....	26
4. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	34
4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації.....	34
4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності.....	36
5. ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ.....	39
5.1. Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових підстанцій.....	39
5.2. Компоновка та місце розташування цехових трансформаторних підстанцій.....	40

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	Розроблення системи електропостачання заводу з підйомно-транспортного обладнання Development of a power supply system for a lifting and transport equipment plant				Літера	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Шульга В.В.								Д	6	86
Перевір.	Козловський О.А								ЦНТУ гр. ЕЕ-22		
Н.контр.											
Затв.	Плешков П. Г.										

6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ І ВИБІР

ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ..... 42

6.1. Розрахунок струмів КЗ у мережі 10 кВ..... 42

6.2. Вибір струмопровідних пристроїв силових мереж..... 48

6.3. Вибір високовольтного електрообладнання..... 50

7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. «ЕЛЕКТРОЗБЕРЕЖЕННЯ В НАСОСНИХ

УСТАНОВКАХ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ»..... 58

7.1. Вступ..... 58

7.2. Специфіка роботи насосів машинобудівних заводів 59

7.3. Режим роботи відцентрових насосів 60

7.4. Особливості роботи насосів при змінній частоті обертання 62

7.5. Частотно-регульований електропривод з асинхронним двигуном 66

7.6. Електрозбереження в насосних установках за допомогою ЧРП..... 69

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 74

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... 75

ДОДАТКИ..... 76

Додаток А. Розрахунок графіків електричних навантажень..... 77

Додаток Б. Розрахунок електричних навантажень для вибору магістральних ліній 10 кВ 82

						Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку промисловості електрична енергія є основою функціонування будь-якого виробництва. Від стабільності та якості електропостачання безпосередньо залежить економічна ефективність підприємства, а також безпека персоналу. Саме тому грамотне проектування систем електропостачання промислових споживачів має важливе значення. Продумана конфігурація електричних мереж дозволяє мінімізувати енерговтрати, уникнути аварійних зупинок і забезпечити ритмічний випуск продукції.

Розглянутий у проєкті завод з виробництва підйомно-транспортного обладнання є одноповерховою будівлею. У ній компактно розміщено 11 підрозділів: 9-ть виробничих цехів, адміністративний корпус та блок складів. Поруч із головним корпусом знаходяться допоміжні об'єкти: компресорна станція (4 СД з $U_{\text{ном}} = 10$ кВ, $P_{\text{ном}} = 630$ кВт), насосні станції оборотного водопостачання й очищення стічних вод, а також склад готової продукції.

Основне електричне навантаження заводу складають преси, штампувальне обладнання, металообробні верстати, зварювальні та фарбувальні лінії. Технологічний процес має таку послідовність. Металопрокат зі складів надходить до ливарного відділення та заготівельно-пресового цеху для виготовлення заготовок майбутніх деталей. Далі в механоскладальних цехах №1 та №2 на поточно-механізованих лініях здійснюється фінішна обробка деталей і первинне складання агрегатів. Після цього деталі проходять процес фарбування. У відділенні контролю та комплектації виконується завершальне складання, а також пакування готових виробів. Далі готова продукція транспортується на склад.

Підприємство відзначається високою питомою щільністю електричного навантаження та наявністю великої кількості допоміжних установок (компресорів, систем припливно-витяжної вентиляції, насосних агрегатів).

Режим роботи заводу – двозмінний. За ступенем надійності електропостачання [1] електроприймачі заводу розподіляються так: 15% належать до I-ї категорії, 75% відносяться до II-ї категорії, а решта 10% – до III-ї.

Електроживлення об'єкта передбачається від підстанції енергосистеми, яка розташована на відстані 1,0 км. Струм надперехідного короткого замикання на шинах 10 кВ цієї підстанції в максимальному та мінімальному режимах роботи енергосистеми становить 9,21 кА.

Метою роботи є комплексне проектування системи електропостачання заводу з підйомно-транспортного обладнання, що задовольняє сучасні критерії надійності та економічної ефективності.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						8

1 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Силові навантаження в електромережі до 1000 В

Визначення електричних навантажень у мережах заводу з виробництва підйомно-транспортного обладнання виконано за допомогою методу впорядкованих діаграм [2-5]. Розглянемо порядок обчислення на прикладі механоскладального цеху №1.

Максимальне розрахункове навантаження цеху

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{673,8^2 + 709,7^2} = 978,6 \text{ кВА},$$

де P_p – активна складова

$$P_p = P_{cp} \cdot k_m = 611,5 \cdot 1,1 = 673,8 \text{ кВт},$$

P_{cp} – середнє активне навантаження групи електроприймачів цеху за найбільш завантажену зміну

$$P_{cp.i} = \sum_{i=1}^n P_{cp.i} = 319,6 + 55,7 + 53,7 + 70,6 + 1,5 + 110 = 611,5 \text{ кВт},$$

$P_{cp.i}$ – середнє навантаження i -ї групи однотипних електроприймачів;

k_m – коефіцієнт максимуму навантаження

$$k_m = \sqrt{1 + \frac{4,4k_b^2 - 12,7k_b + 8,235}{(k_b + 0,05) \cdot n_{ef}^{(1,04-0,4k_b)}}} = \sqrt{1 + \frac{4,4 \cdot 0,2 - 12,7 \cdot 0,2 + 8,235}{(0,2 + 0,05) \cdot 136^{(1,04-0,4 \cdot 0,2)}}} = 1,1$$

k_b – груповий коефіцієнт використання

$$k_b = \frac{\sum_{i=1}^n P_{cp.i}}{\sum_{i=1}^n P_{bc.i}} = \frac{319,6 + 55,7 + 53,7 + 70,6 + 1,5 + 110,5}{373,7 + 96,4 + 71,6 + 82,5 + 2,6 + 82,9} = 0,2$$

$P_{bc.i}$ – встановлена потужність i -ї групи однотипних електроприймачів;

n – число однотипних груп електроприймачів ЕП з різними режимами роботи.

Ефективне число електроприймачів у групі n_{ef} залежить від

$$m = \frac{P_{bc.max}}{P_{bc.min}} = \frac{46}{1,9} = 24 \text{ шт.},$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		9

де $P_{\text{вс.мах}}$, $P_{\text{вс.мін}}$ – встановлена потужність, відповідно, найбільш та найменш потужного електроприймача цеху.

При $m \geq 3$ та $n > 193$ шт. маємо

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_{\text{н}}}{P_{\text{н.мах}}} = \frac{2 \cdot 3126}{46,0} = 136 \text{ шт.}$$

Розрахункове реактивне навантаження цеху за умови, що ефективна кількість споживачів становить $n_{\text{еф}} > 10$ приймають рівною середньому реактивному споживанню за найбільш інтенсивну зміну:

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{зм}} = 709,7 \text{ квар},$$

де $Q_{\text{зм}}$ – середнє реактивне навантаження групи електроприймачів цеху за найбільш завантажену зміну

$$Q_{\text{ср.і}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{ср.і}} = 373,7 + 96,4 + 71,6 + 82,5 + 2,6 + 82,9 = 709,7 \text{ квар.}$$

Аналогічні розрахунки було виконано для інших цехів та підрозділів заводу, у вигляді табл. 1.1.

						Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Таблиця 1.1- Розрахунок силових електричних навантажень у мережі 0,4 кВ заводу

№ п/п	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість ел. спо- живачів	Встановлена по- тужність, кВт		m	k _в	cosφ	tgφ	Середнє наванта- ження за зміну		n _с	k _м	Розрахункова потужність,		
			одного	сумарна					P _{ср} , кВт	Q _{ср} , квар			P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	Компресорна станція	16	5,5 - 15,0	174,0	3	0,65	0,80	0,76	113,7	86,1	16	1,14	129,5	86,1	155,5
2	Насосна оборотного водопостач.	34	5,5 - 45,0	870,0	8	0,80	0,75	0,88	696,0	613,8	34	1,04	724,2	613,8	949,4
3	Відділення перевірки і комплект.	26	3 - 75,0	590,0	25	0,51	0,58	1,42	298,1	422,7	16	1,23	367,4	422,7	560,1
4	Збиральний цех	150	0,8 - 28,0	766,1	35	0,34	0,69	1,04	256,7	267,9	55	1,14	293,5	267,9	397,4
5	Механоскладальний цех №1														
	Токарно-винторізні верстати	78	2,4 - 46,0	1880,0		0,17	0,65	1,17	319,6	373,7					
	Фрезерні верстати	52	7,6 - 9,8	348,0		0,16	0,50	1,73	55,7	96,4					
	Шліфувальні верстати	20	1,9 - 18,0	298,4		0,18	0,60	1,33	53,7	71,6					
	Преси	15	4,5 - 40,0	415,0		0,17	0,65	1,17	70,6	82,5					
	Кран-балка ТВ=40%	5	3,0 - 3,0	15,0		0,10	0,50	1,73	1,5	2,6					
	Вентилятори	23	7,5 - 22,0	170,0		0,65	0,80	0,75	110,5	82,9					
	Всього по цеху	193	1,9 - 46,0	3126,4	24	0,20	0,65	1,16	611,5	709,7	136	1,10	673,8	709,7	978,6
6	Термічне відділення	51	7,5 - 260,0	3433,8	35	0,68	0,80	0,75	2348,4	1770,3	26	1,09	2551,3	1770,3	3105,4
7	Склад готової продукції	26	1,1 - 30,0	138,0	27	0,62	0,79	0,77	85,4	65,4	9	1,24	106,0	71,9	128,0
8	Фарбувальний цех	53	2,2 - 110,0	2690,2	50	0,63	0,77	0,84	1704,8	1432,8	49	1,06	1815,3	1432,8	2312,6
9	Механоскладальний цех №2	209	1,4 - 60,0	2416,6	43	0,21	0,53	1,58	519,5	821,8	81	1,15	598,1	821,8	1016,4
10	Блок складів	46	0,6 - 22,0	306,5	37	0,62	0,72	0,96	190,3	181,8	28	1,10	210,0	181,8	277,8
11	Заготівельно-пресовочний цех	120	1,6 - 160,0	3279,7	100	0,23	0,68	1,08	747,0	809,3	41	1,26	942,3	809,3	1242,2
12	Зварювально-складальний цех	130	1,1 - 130,0	5035,0	118	0,36	0,60	1,35	1837,5	2480,2	77	1,10	2019,3	2480,2	3198,2
13	Адмінкорпус	71	0,1 - 15,0	120,9	150	0,65	0,80	0,74	78,0	57,6	16	1,14	89,2	57,6	106,2
14	Їдальня	49	0,8 - 41,0	439,0	51	0,61	0,97	0,24	268,2	63,9	21	1,13	304,0	63,9	310,6
15	Станція очистки в/с	70	1,2 - 11,0	286,0	9	0,68	0,80	0,75	195,8	146,9	52	1,05	205,9	146,9	252,9
	Всього на напрузі 0,4 кВ														
	силове	1244	0,1 - 260,0	23672	>3	0,42	0,71	1,00	9950,9	9930,0	182	1,04	10358,5	9930,0	14349,3
	освітлювальне												1415,8	1908,1	
	Всього по заводу на напрузі 0,4 кВ												11774,3	11838,1	16696,5

1.2 Розрахунок освітлювального навантаження

Для визначення навантажень робочого освітлення використовуємо метод питомої потужності на квадратний метр площі приміщення [2]. Розглянемо цю методику на прикладі розрахунку освітлювального навантаження/

Установлена потужність освітлювальної установки

$$P_{\text{в}} = p_{\text{пит.о}} \cdot F \cdot 10^{-3} = 18,72500 \cdot 10^{-3} = 130,5 \text{ кВт},$$

де $p_{\text{пит.о}}$ – питома потужність освітлення, кВт/м²;

F – загальна площа промислового приміщення, м².

Повне розрахункове освітлювальне навантаження:

$$S_{\text{р.ос}} = \sqrt{P_{\text{р.ос}}^2 + Q_{\text{р.ос}}^2} = \sqrt{138,9^2 + 240,5^2} = 277,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

де $P_{\text{р.ос}}$ – активна складова

$$P_{\text{р.ос}} = k_1 \cdot k_{\text{п}} \cdot P_{\text{в}} = 1,12 \cdot 0,95 \cdot 130,5 = 138,9 \text{ кВт},$$

де $k_{\text{п}}$ – коефіцієнтом попиту для освітлювальної мережі;

k_1 – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати потужності в пускорегулювальній апаратурі для ламп ДРЛ становить 1,12;

$Q_{\text{р.ос}}$ – реактивна складова

$$Q_{\text{р.ос}} = P_{\text{р.ос}} \cdot \text{tg}\varphi = 138,9 \cdot 1,73 = 240,5 \text{ квар},$$

$\text{tg}\varphi$ – коефіцієнт для ламп ДРЛ відповідає $\cos\varphi = 0,5$.

Розрахунок освітлювальних навантажень для інших підрозділів заводу подано у вигляді табл. 1.2.

						Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Таблиця 1.2 – Розрахунок освітлювальних навантажень цехах заводу

№ п/п	Назва	n, шт	F, м ²	p _о , Вт/м	cosφ	P _в , кВт	Q _в , квар	k _п	k ₁	P _{р.ос} , кВт	Q _{р.ос} , квар	S _{р.ос} , кВА
1	Компресорна станція	1	2448	15	0,5	36,7	63,6	0,7	1,12	28,8	49,9	57,6
2	Насосна оборотного водопостач.	1	2448	15	0,5	36,7	63,6	0,7	1,12	28,8	49,9	57,6
3	Відділення перевірки і комплект.	1	5510	20	0,5	110,2	190,9	0,95	1,12	117,3	203,1	234,5
4	Збиральний цех	1	6960	18	0,5	125,3	217,0	0,95	1,12	133,3	230,9	266,6
5	Механоскладальний цех №1	1	7250	18	0,5	130,5	226,0	0,95	1,12	138,9	240,5	277,7
6	Термічне відділення	1	3072	13	0,5	39,9	69,2	0,85	1,12	38,0	65,9	76,0
7	Склад готової продукції	1	1800	8	0,5	14,4	24,9	0,6	1,12	9,7	16,8	19,4
8	Фарбувальний цех	1	10080	25	1	252,0	0,0	0,95	1	239,4	0,0	239,4
9	Механоскладальний цех №2	1	5790	18	0,5	104,2	180,5	0,95	1,12	110,9	192,1	221,8
10	Блок складів	1	6642	8	0,5	53,1	92,0	0,6	1,12	35,7	61,8	71,4
11	Заготівельно-пресовочний цех	1	12000	18	0,5	216,0	374,1	0,85	1,12	205,6	356,2	411,3
12	Зварювально-збиральний цех	1	9264	20	0,5	185,3	320,9	0,95	1,12	197,1	341,5	394,3
13	Адмінкорпус	2	3528	24	0,9	84,7	41,0	0,8	1,2	81,3	39,4	90,3
14	Їдальня	1	1302	18	0,9	23,4	11,4	0,8	1,2	22,5	10,9	25,0
15	Станція очистки в/с	1	875	15	0,5	13,1	22,7	0,7	1,12	10,3	17,8	20,6
	Освітлення території	-	77747	0,3	0,5	23,3	40,4	0,7	1,12	18,3	31,7	36,6
	Всього		104253			1611,8	2220,4			1415,8	1908,1	2376,0

1.3 Силові навантаження в мережі 10 кВ заводу

При визначенні навантажень у мережі напругою понад 1000 В за розрахункові вузли приймаються шини 10 кВ трансформаторних підстанцій (ТП). Тому перед виконанням розрахунку було попередньо визначено кількість ТП, одиничну потужність трансформаторів та їх розміщення на території цехів заводу.

Потужність трансформаторів цехових ТП вибирають за розрахунковим навантаженням з урахуванням категорії електроприймачів за надійністю електропостачання та умов розміщення пристроїв компенсації реактивної потужності. Для цехів із порівняно невеликим розрахунковим навантаженням, орієнтовно 250...350 кВА, спорудження окремої ТП не завжди є доцільним. У таких випадках можливе живлення кількох близько розташованих цехів від однієї трансформаторної підстанції за умови дотримання допустимих втрат напруги, навантажувальної здатності ліній та вимог до надійності електропостачання.

Трансформаторні підстанції в проєктованій системі електропостачання заводу приймаються двотрансформаторними. Таке рішення забезпечує резервування живлення та підвищує надійність електропостачання електроприймачів, насамперед споживачів I та II категорій.

Розрахунок навантажень, вибір потужності та кількості трансформаторів, а також визначення втрат електроенергії виконано за умови повної компенсації реактивної потужності в мережі напругою до 1000 В.

Розрахунок навантажень по кожній ТП виконано в такій послідовності:

- визначалася сумарна встановлену потужність силових електроприймачів;
- розраховувалися середні активні та реактивні навантаження, а також груповий коефіцієнт використання;
- визначалося ефективне число електроприймачів, коефіцієнт максимуму та розрахункові навантаження;
- враховувалося освітлювальне навантаження, як сума розрахункових освітлювальних навантажень по окремих цехах (підрозділах);
- формувався проміжний підсумок розрахункового силового та освітлюваного навантаження;
- визначалися втрати активної та реактивної потужності в силових трансформаторах;
- формувався загальний підсумок розрахункового навантаження з урахуванням втрат у трансформаторах.

						Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Втрати потужності в силових трансформаторах:

$$\Delta P = n \left[\Delta p_{xx} + \Delta p_{kз} \cdot k_3^2 \right];$$

$$\Delta Q = n \left[\frac{i_{xx}}{100} S_{ном} + \frac{u_{кз}}{100} S_{ном} k_3^2 \right],$$

де n – кількість трансформаторів у ТП; Δp_{xx} , – втрати активної потужності трансформатора в режимі холостого ходу, кВт; $\Delta p_{кз}$ – втрати активної потужності трансформатора в режимі короткого замикання, кВт; i_{xx} – струм холостого ходу трансформатора, %; $S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА; $u_{кз}$ – напруга короткого замикання, %; k_3 – коефіцієнт завантаження трансформатора.

Навантаження в цілому по заводу визначають за тією самою методикою, що й навантаження окремих ТП. Якщо до складу розрахункового вузла входять синхронні двигуни, які працюють у режимі генерування реактивної потужності, або батареї конденсаторів для компенсації реактивної потужності, їх реактивну потужність у балансі враховують зі знаком “мінус”.

Розрахунок навантажень у мережі напругою понад 1 кВ системи електропостачання заводу наведено в табл. 1.3.

						Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Таблиця 1.3. Розрахунок силових електричних навантажень у мережі 10 кВ

№ п/п	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість ел. спо- живачів	Встановлена по- тужність, кВт		m	k _в	cosφ	tgφ	Середнє наванта- ження за зміну			k _м	Розрахункова потужність,		
			одного	сумарна					P _{ср} , кВт	Q _{ср} , квар	n _{еф}		P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	ТП-1 (2х1000 кВА)														
1	Компресорна станція														
	силове	16	5,5 - 15,0	174,0	3	0,65	0,80	0,76	113,7	86,1	16,0	1,14	129,5	86,1	155,5
	освітлювальне								36,7	63,6			28,8	49,9	
	Всього								150,4	149,7			158,3	135,9	208,7
2	Насосна оборотного водопостачання														
	силове	34	5,5 - 45,0	870,0	8	0,80	0,75	0,88	696,0	613,8	34,0	1,04	724,2	613,8	949,4
	освітлювальне								36,7	63,6			28,8	49,9	
	Всього								732,7	677,4			753,0	663,7	1003,7
3	Відділення перевірки та комплект.														
	силове	26	3,0 - 75,0	590,0	25	0,51	0,58	1,42	298,1	422,7	16,0	1,23	367,4	422,7	560,1
	освітлювальне								110,2	190,9			117,3	203,1	
	Всього								408,3	613,6			484,7	625,8	791,6
	Освітлення території								23,3	40,4			18,3	31,7	
	Всього по ТП - 1 (2х1000 кВА)														
	силове	76	3,0 - 75,0	1634,0	25	0,68	0,70	1,01	1107,8	1122,6	44,0	1,06	1174,2	1122,6	1624,5
	освітлювальне								207,0	358,5			193,1	334,5	
	батареї конденсаторів													-1200,0	
	всього												1367,3	257,1	1391,2
	втрати у трансформаторах												13,3	63,2	
	Всього на шинях 10 кВ ТП-1												1380,5	577,4	1496,4
	ТП-2 (2х1000 кВА)														
4	Збиральний цех														
	силове	150	0,8 - 28,0	766,1	35	0,34	0,69	1,04	256,7	267,9	55	1,144	293,5	267,9	397,4
	освітлювальне								125,3	217,0			133,3	230,9	
	Всього								381,9	484,9			426,8	498,8	656,5

Продовження табл. 1.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5	Механоскладальний цех №1														
	силове	193	1,9 - 46,0	3126,4	24	0,20	0,65	1,16	611,5	709,7	136	1,10	673,8	709,7	978,6
	освітлювальне								130,5	226,0			138,9	240,5	
	Всього								742,0	935,7			812,6	950,2	1250,3
13	Адмінкорпус														
	силове	71	0,1 - 15,0	120,9	150	0,65	0,80	0,74	78,0	57,6	16	1,14	89,2	57,6	106,2
	освітлювальне								84,7	41,0			81,3	39,4	
	Всього								162,7	98,6			170,5	96,9	196,1
	Всього по ТП-2 (2x1000 кВА)														
	силове	417	0,1 - 46,0	4018,4	460	0,24	0,67	1,09	946,2	1035,1	175	1,07	1012,6	1035,1	1448,0
	освітлювальне								340,5	484,0			353,4	510,7	
	батареї конденсаторів													-1200,0	
	всього												1366,0	345,9	1409,1
	втрати у трансформаторах												13,5	64,6	
	Всього на шинях 10 кВ ТП-2												1379,6	410,5	1439,3
	ТП-3, 4 (4x1000 кВА)														
6	Термічне відділення														
	силове	51	7,5 - 260,0	3433,8	35	0,68	0,80	0,75	2348,4	1770,3	26	1,09	2551,3	1770,3	3105,4
	освітлювальне								39,9	69,2			38,0	65,9	
	Всього								2388,3	1839,5			2589,4	1836,2	3174,3
7	Склад готової продукції														
	силове	26	1,1 - 30,0	138,0	27	0,62	0,79	0,77	85,4	65,4	9	1,24	106,0	71,9	128,0
	освітлювальне								14,4	24,9			9,7	16,8	
	Всього								99,8	90,3			115,6	88,7	145,7
	Всього по ТП - 3, 4 (4x1000 кВА)														
	силове	77	1,1 - 260,0	3571,8	236	0,68	0,80	0,75	2433,8	1835,7	27	1,08	2640,4	1835,7	3215,8
	освітлювальне								54,3	94,1			47,7	82,6	
	батареї конденсаторів													-1100,0	
	Всього												2688,1	818,3	2809,9
	втрати у трансформаторах												26,9	128,6	
	Всього на шинях 10 кВ ТП-3, 4												2715,0	946,9	2875,4

Продовження табл. 1.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14,0	15,0	16,0
	ТП-5, 7 (4x1000 кВА)														
8	Фарбувальний цех														
	силове	53	2,2 - 110,0	2690,2	50	0,63	0,77	0,84	1704,8	1432,8	49	1,06	1815,3	1432,8	2312,6
	освітлювальне								252,0	0,0			239,4	0,0	
	Всього								1956,8	1432,8			2054,7	1432,8	2504,9
9	Механоскладальний цех №2														
	силове	209	1,4 - 60,0	2416,6	43	0,21	0,53	1,58	519,5	821,8	81	1,15	598,1	821,8	1016,4
	освітлювальне								104,2	180,5			110,9	192,1	
	Всього								623,7	1002,3			709,0	1013,9	1237,2
	Всього по ТП - 5, 7 (4x1000 кВА)														
	силове	262	1,4 - 110,0	5106,8	79	0,44	0,70	1,01	2224,3	2254,6	93	1,07	2379,0	2254,6	3277,6
	освітлювальне								356,2	180,5			350,3	192,1	
	батерей конденсаторів													-1800,0	
	всього												2729,3	646,6	2804,8
	втрати у трансформаторах												26,8	128,2	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-5, 7												2756,1	1421,4	3101,1
	ТП-6, 8 (4x1000 кВА)														
12	Зварювально-складальний цех														
	силове	130	1,1 - 130,0	5035,0	118	0,36	0,60	1,35	1837,5	2480,2	77	1,10	2019,3	2480,2	3198,2
	освітлювальне								185,3	320,9			197,1	341,5	
	Всього								2022,8	2801,1			2216,4	2821,6	3588,0
15	Станція очистки в/с														
	силове	70	1,2 - 11,0	286,0	9	0,68	0,80	0,75	195,8	146,9	52	1,05	205,9	146,9	252,9
	освітлювальне								13,1	22,7			10,3	17,8	
	Всього								208,9	169,6			216,2	164,7	164,7
14	Ідальня														
	силове	49	0,8 - 41,0	439,0	51	0,61	0,97	0,24	268,2	63,9	21	1,13	304,0	63,9	310,6
	освітлювальне								23,4	11,4			22,5	10,9	
	Всього								291,7	75,2			326,5	74,8	334,9

Продовження табл. 1.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Всього по ТП 6, 8 (2х1000)														
	силове	252	0,8 - 130,0	5765,0	163	0,40	0,65	1,17	2301,5	2690,9	89	1,08	2484,7	2690,9	3662,6
	освітлювальне								221,8	355,0			229,9	370,2	
	батарей конденсаторів													-2400,0	
	всього												2714,6	661,1	2793,9
	втрати у трансформаторах												26,7	127,3	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-6, 8												2741,3	788,4	2852,4
	ТП-9 (2х1000 кВА)														
10	Блок складів														
	силове	46	0,6 - 22,0	306,5	37	0,62	0,72	0,96	190,3	181,8	28	1,10	210,0	181,8	277,8
	освітлювальне								53,1	92,0			22,5	10,9	
	Всього								243,4	273,8			232,5	192,7	302,0
11	Заготівельно-пресовочний цех														
	силове	120	1,6 - 160,0	3279,7	100	0,23	0,68	1,08	747,0	809,3	41	1,26	942,3	809,3	1242,2
	освітлювальне								216,0	374,1			205,6	356,2	
	Всього								963,0	1183,4			1148,0	1165,4	1635,9
	Всього по ТП - 9 (2х1000 кВА)														
	силове	166	0,6 - 160,0	3586,2	267	0,26	0,69	1,06	937,3	991,1	45	1,21	1138,7	991,1	1509,6
	освітлювальне								269,1	466,2			228,1	367,1	
	батарей конденсаторів													-1100,0	
	всього												1366,9	258,1	1391,0
	втрати у трансформаторах												13,2	63,2	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-9												1380,1	321,4	1417,0
	Всього по корпусу №200														
	силове	1250	0,1 - 260,0	23682,2	>3	0,42	0,71	1,00	9950,9	9930,0	182	1,04	10358,7	9930,0	14349,4
	освітлювальне								1448,9	1938,3			1402,6	1857,1	
	батарей конденсаторів 0,4 кВ													-8800,0	
	всього								11399,8	11868,3			11761,3	2987,1	12134,7
	втрати у трансформаторах												120,5	575,1	
	Всього по корпусу №200												11881,7	3562,3	12404,2
1	Компресорна станція (10 кВ)														
	Компресори (СД 10 кВ)	4	630.0 - 630,0	2520,0	1	0,80	-0,81	-0,72	2016,0	-1450,1	4	1,18	2373,7	-1450,0	2781,5
	Всього по заводу на шинах 10 кВ												14255,4	2112,3	14411,1

1.4 Графіки електричних навантажень

На основі типових добових графіків електричних навантажень підприємств з виробництва підйомно-транспортного обладнання побудовано зимові та літні добові графіки активної, реактивної і повної потужності. Під час побудови графіків ураховано кількість робочих і вихідних днів протягом року.

Типові графіки, що були задані у відсотках від максимального навантаження, перераховано в іменовані значення потужності для кожного ступеня графіка за співвідношеннями:

$$P_j = \frac{n_{p,j}}{100\%} P_p; \quad (1.3)$$

$$Q_j = \frac{n_{q,j}}{100\%} Q_p \quad (1.4)$$

де n_j – ордината, що відповідає j -му ступеню добового графіка електричного навантаження, %.

Розрахункові активне та реактивне навантаження робочої літньої доби:

$$P_{p,л} = k_{п,р} \cdot P_p = 0.85 \cdot 13898,8 = 11814 \text{ кВт};$$

$$Q_{p,л} = k_{п,к} \cdot Q_p = 0.85 \cdot 2106,8 = 1790,8 \text{ квар.}$$

Ступені графіків повної потужності визначають за значеннями активної та реактивної потужностей для кожного ступеня добового графіка:

$$S_j = \sqrt{P_j^2 + Q_j^2}, \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (1.5)$$

Результати розрахунку добових графіків наведено в табл. А.1-А.4. Добові графіки активної, реактивної та повної потужності показано на рис. 1.1.

На основі добових графіків побудовано річні графіки активного, реактивного та повного навантажень за тривалістю. Вихідні дані та результати розрахунку річного графіка за тривалістю наведено в табл. А.5 та на рис. 1.2.

						Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

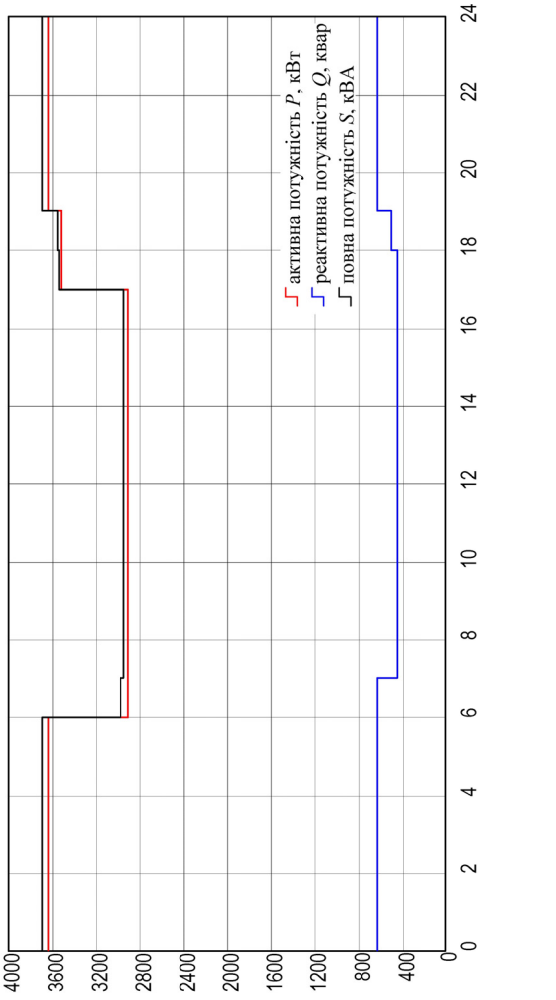
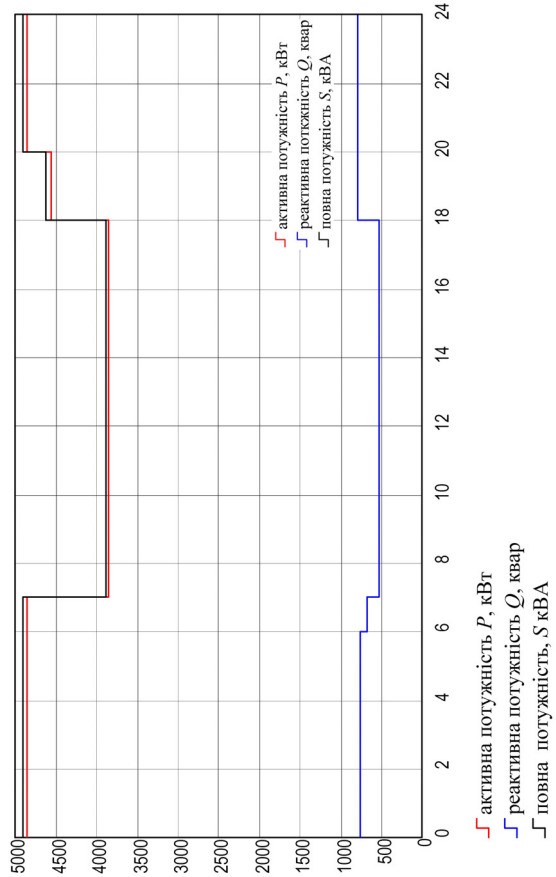
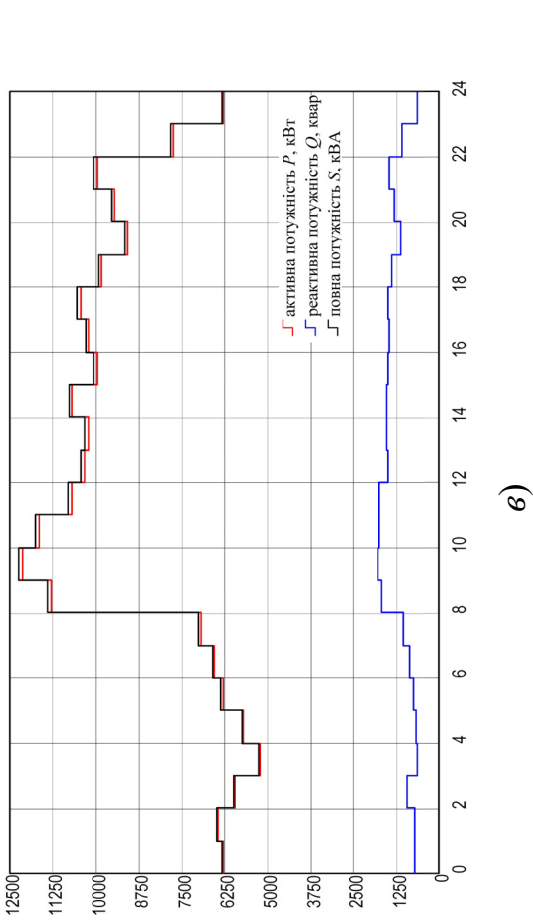
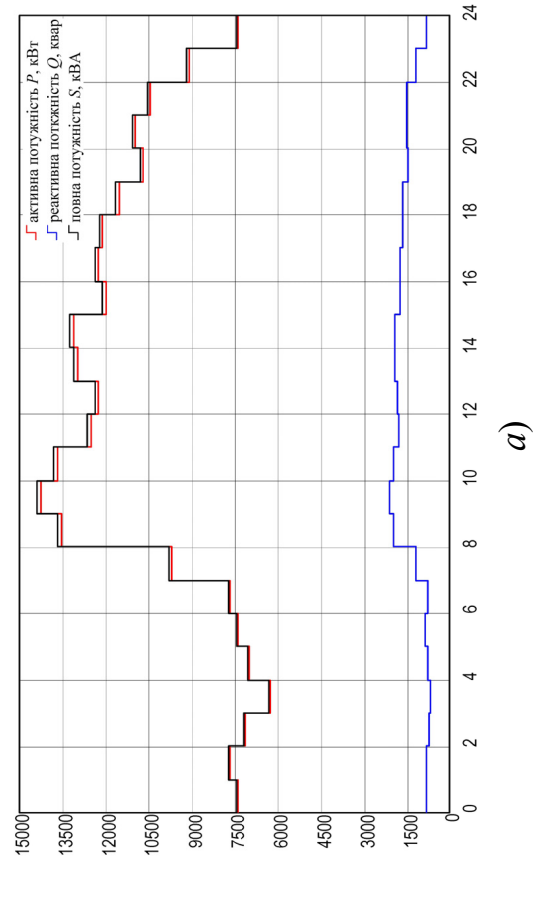


Рисунок 1.1 – Добові графіки електроспоживання сторони 10 кВ ЦРУ заводу підйомно-кранового обладнання:
а) робоча, б) вихідна зимова доба; в) робоча, г) вихідна літня доба

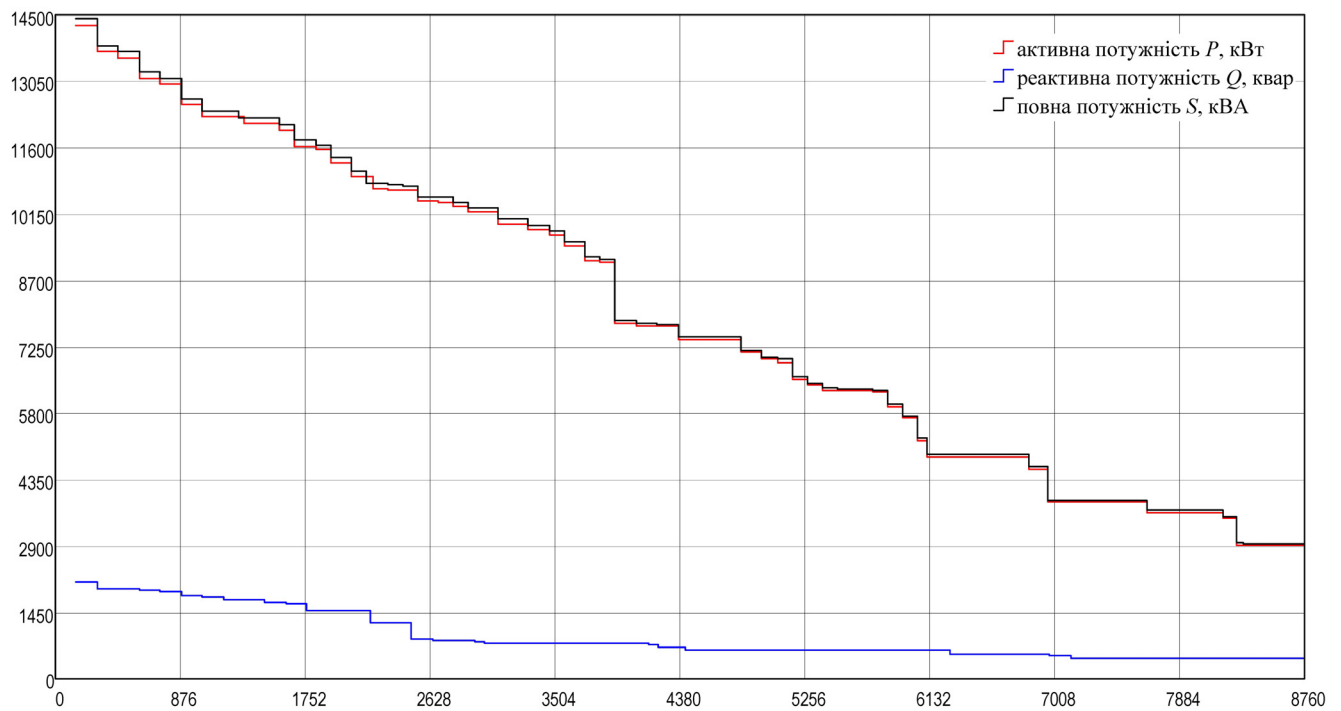


Рисунок 1.2 – Річний графік електроспоживання заводу за тривалістю

Річне споживання активної та реактивної електроенергії становить:

$$W_p = \sum_{j=1}^n \left[147P_{з.р_j} + 65P_{з.в_j} + 105P_{л.р_j} + 48P_{л.в_j} \right] = 69179,9 \text{ МВат} \cdot \text{год};$$

$$V_p = \sum_{j=1}^n \left[147Q_{з.р_j} + 65 \cdot Q_{з.в_j} + 105Q_{л.р_j} + 48Q_{л.в_j} \right] = 9606,1 \text{ Мвар} \cdot \text{год}.$$

Під час визначення річного споживання електроенергії враховано поділ року на зимовий і літній періоди, а також різницю між робочими та вихідними днями. У розрахунку прийнято: 147 зимових робочих днів, 105 літніх робочих днів, 65 зимових вихідних днів і 48 літніх вихідних днів. Загальна кількість днів становить 365.

Тривалість використання максимального навантаження визначається за виразом

$$T_M = \frac{\sqrt{W_p^2 + V_p^2}}{S_p} = \frac{\sqrt{69179,9^2 + 9606,1^2}}{14411,1} = 4846,5 \text{ год}.$$

Тривалість максимальних втрат визначається за виразом

$$\tau = \left[0,124 + \frac{T_M}{10000} \right]^2 8760 = \left[0,124 + \frac{4846,5}{10000} \right]^2 8760 = 3245,2 \text{ год}.$$

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	22

2 КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ І МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ ЦРУ 10 кВ

Для визначення оптимального розміщення ЦРУ 10 кВ та цехових ТП на генеральний план заводу наноситься картограма електричних навантажень. Для кожного цеху на генеральному плані будують коло, площа якого у прийнятому масштабі відповідає розрахунковому активному навантаженню цього цеху. У роботі прийнято масштаб $m = 1,5 \text{ кВт/мм}^2$. У межах цього кола виділяють сектор, площа якого пропорційна розрахунковому освітлювальному навантаженню $P_{\text{р.ос}}$. Радіус кола визначають за розрахунковим активним навантаженням цеху, а центральний кут сектора, за часткою освітлювального навантаження у загальному розрахунковому навантаженні.

Визначимо ці параметри для механоскладального цеху № 1:

- радіус кола

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{р.сум}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{812,6}{3,1415 \cdot 1,5}} = 13,1 \text{ мм};$$

- центральний кут α сектора

$$\alpha = 360 \frac{P_{\text{р.ос}}}{P_{\text{р}\Sigma}} = 360 \frac{138,9}{812,6} = 61,5^\circ.$$

Для інших цехів параметри картограми визначено аналогічно. Результати розрахунку наведено в табл. 2.1.

ЦРУ доцільно розміщувати поблизу умовного центра електричних навантажень (ЦЕН) заводу. Координати ЦЕН визначають за виразами:

$$x'_0 = \sum_{i=1}^n x_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i = 3816800,3 / 14805,2 = 257,8 \text{ м};$$

$$y'_0 = \sum_{i=1}^n y_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i = 2127302,6 / 14805,2 = 143,7 \text{ м}.$$

де n – кількість цехів і підрозділів заводу; x_i та y_i – координати відповідного цеху на генплані; P_i – розрахункове навантаження i -го цеха.

Отримані координати визначають розрахункове положення центра електричних навантажень. З урахуванням умов генерального плану, можливості прокладання КЛ та напрямку живлення ЦРУ приймаємо до встановлення в точці з координатами: $x_0 = 236 \text{ м}$, $y_0 = 188 \text{ м}$.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		23

Таблиця 2.1 – Розрахунок параметрів картограми електричних навантажень

№ п/п	Назва цеху, підрозділу	Розрахункові навантаження, кВт			Радіус кола, мм	Координати центру кола, м		Градусна міра кута, α	Добутки	
		P_p	$P_{p.ос}$	$P_{сум}$		x	y		$P \cdot x$, кВт·м	$P \cdot y$, квар·м
1	Компресорна станція 0,4 кВ	129,5	28,8	158,3	5,8	39	211	65,5	6174,6	33406,0
2	Компресорна станція 10 кВ	2373,7	-	2373,7	22,4	39	211	-	92574,4	500851,2
3	Насосна оборотного водопостачання	724,2	28,8	753,0	12,6	39	174	13,8	29367,6	131024,6
4	Відділення перевірки і комплектації	367,4	117,3	484,7	10,1	115	128	87,1	55736,9	62037,6
5	Збиральний цех	293,5	133,3	426,8	9,5	158	128	112,4	67437,2	54632,6
6	Механоскладальний цех №1	673,8	138,9	812,6	13,1	208	128	61,5	169023,4	104014,4
7	Термічне відділення	2551,3	38,0	2589,4	23,4	303	188	5,3	784575,1	486799,1
8	Склад готової продукції	106,0	9,7	115,6	5,0	446	210	30,1	51572,2	24282,9
9	Фарбувальний цех	1815,3	239,4	2054,7	20,9	343	155	41,9	704754,0	318474,8
10	Механоскладальний цех №2	598,1	110,9	709,0	12,3	330	118	56,3	233976,1	83664,2
11	Блок складів	210,0	35,7	245,7	7,2	486	136	52,3	119427,3	33420,0
12	Заготівельно-пресовий цех	942,3	205,6	1148,0	15,6	486	86	64,5	557917,5	98726,1
13	Зварювально-збиральний цех	2019,3	197,1	2216,4	21,7	330	80	32,0	731411,3	177311,8
14	Адміністративний корпус	89,2	81,3	170,5	6,0	180	35	171,6	30687,9	5967,1
15	Їдальня	304,0	22,5	326,5	8,3	284	22	24,8	92715,9	7182,2
16	Станція очистки стічних вод	210,0	10,3	220,3	6,8	406	25	16,8	89449,0	5507,9
	Всього			14805,2					3816800,3	2127302,6

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ

3.1 Вибір напруги і схеми приєднання заводу

Раціональність системи зовнішнього електропостачання заводу значною мірою визначається правильним вибором номінальної напруги та схеми приєднання до мережі енергосистеми. Схема електропостачання промислового підприємства повинна відповідати таким вимогам:

- забезпечувати зручність і безпеку експлуатації;
- підтримувати необхідний рівень надійності в нормальних і післяаварійних режимах;
- бути економічно доцільною за капіталовкладеннями, експлуатаційними витратами та втратами електроенергії;
- забезпечувати підвищення надійності в напрямку від нижчих рівнів системи електропостачання до вищих, тобто від цехових мереж до джерела живлення.

Для зовнішнього електропостачання заводу приймається номінальна напруга 10 кВ. Такий вибір обумовлений тим, що найближчим можливим джерелом живлення є підстанція енергосистеми 35/10 кВ, розташована на відстані близько 1 км від території заводу. За такої відстані передача електроенергії на напрузі 10 кВ є технічно достатньою та не потребує спорудження на території підприємства ГЗП 35/10 кВ. За величиною розрахункового навантаження завод відноситься до промислових споживачів середньої потужності.

Додатковим аргументом на користь напруги 10 кВ є відсутність на заводі електроприймачів із номінальною напругою 6 кВ. Крім того, за однакового переданого навантаження мережа 10 кВ забезпечує менші струми порівняно з мережею 6 кВ, що дає змогу підвищити пропускну здатність КЛ за однакового перерізу жил або зменшити втрати потужності.

Отже, зовнішнє електропостачання заводу передбачається виконати від підстанції енергосистеми 35/10 кВ кабельними лініями напругою 10 кВ з довжиною траси близько 1,0 км. На території заводу передбачається спорудження ЦРУ 10 кВ з двома секціями шин, що забезпечує можливість секціонування мережі та підвищує надійність живлення цехових трансформаторних підстанцій.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		25

3.2 Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання

Мережа внутрішнього електропостачання промислового підприємства може виконуватися за радіальною, магістральною або змішаною топологією.

У радіальних схемах електроенергія від джерела живлення передається безпосередньо до приймального пункту. Найчастіше такі схеми мають не більше двох ступенів. Одноступеневі системи оптимальні для невеликих і середніх підприємств із зосередженим навантаженням. Важливою перевагою радіальної схеми є забезпечення глибокого секціонування всієї системи електропостачання, що підвищує надійність та полегшує локалізацію пошкоджень.

Магістральні схеми застосовують за наявності великої кількості розосереджених споживачів, коли радіальні лінії економічно недоцільні. Їхня головна перевага – зменшення кількості комутаційних апаратів. Такі схеми раціонально використовувати за умови лінійного розташування підстанцій на території заводу. Кількість трансформаторів на одній магістралі залежить від їхньої потужності та вимог до надійності. Рекомендується підключати не більше 2–3 цехових трансформаторів потужністю 1000–2500 кВА.

Для споживачів будь-якої категорії застосовують схеми з двома і більше наскрізними магістралями. У нормальному режимі секції шин ТП або РП працюють роздільно. У разі аварії на одній із ліній навантаження перемикається на резервну магістраль, що залишилася в роботі.

У реальній експлуатації «чисті» радіальні або магістральні мережі зустрічаються рідко. Поєднання переваг обох видів дозволяє створити змішану систему електропостачання з найкращими техніко-економічними показниками.

З огляду на зазначене, приймаємо до розгляду такі варіанти внутрішнього електропостачання заводу:

1. Радіальна схема живлення. Передача потужності від ПС енергосистеми здійснюється по КЛ 1,0 км напругою 10 кВ. На території заводу споруджується ЦРУ, від якого цехові ТП отримують живлення за радіальним принципом із глухим приєднанням КЛ до трансформаторів (рис. 3.1).

2. Змішана схема живлення. Зовнішнє електропостачання аналогічно виконується КЛ 10 кВ довжиною 1,0 км. На території заводу зводиться ЦРУ, від якого цехові ПС підключаються подвійними магістралями, а високовольтні синхронні двигуни (СД 10 кВ) – окремими радіальними лініями. Приєднання трансформаторів до магістралей здійснюється через комутаційні апарати: вимикач навантаження та запобіжник (рис. 3.2).

Остаточне проєктне рішення приймають за результатами порівняння зведених витрат для розглянутих варіантів.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		26

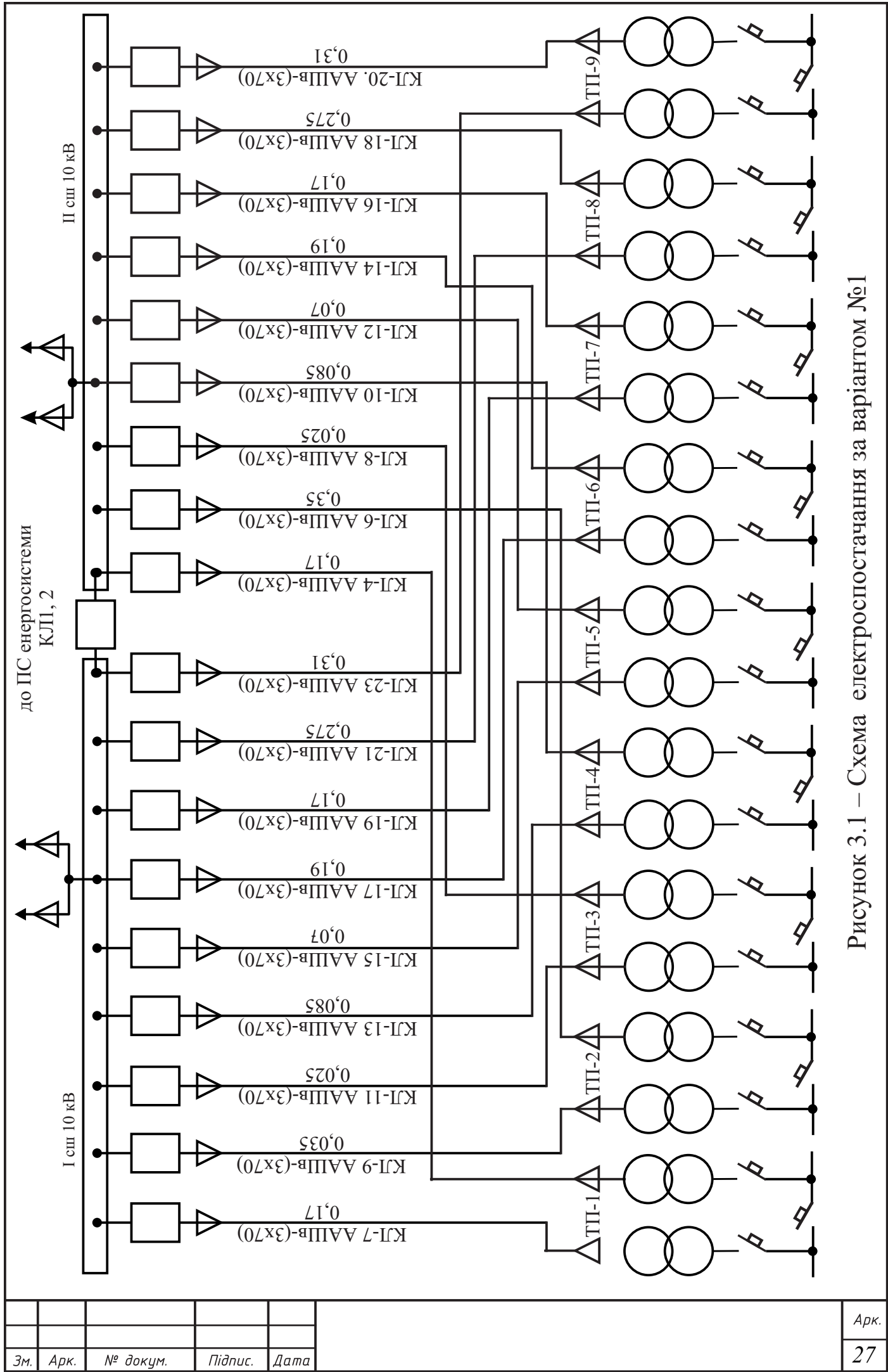


Рисунок 3.1 – Схема електропостачання за варіантом №1

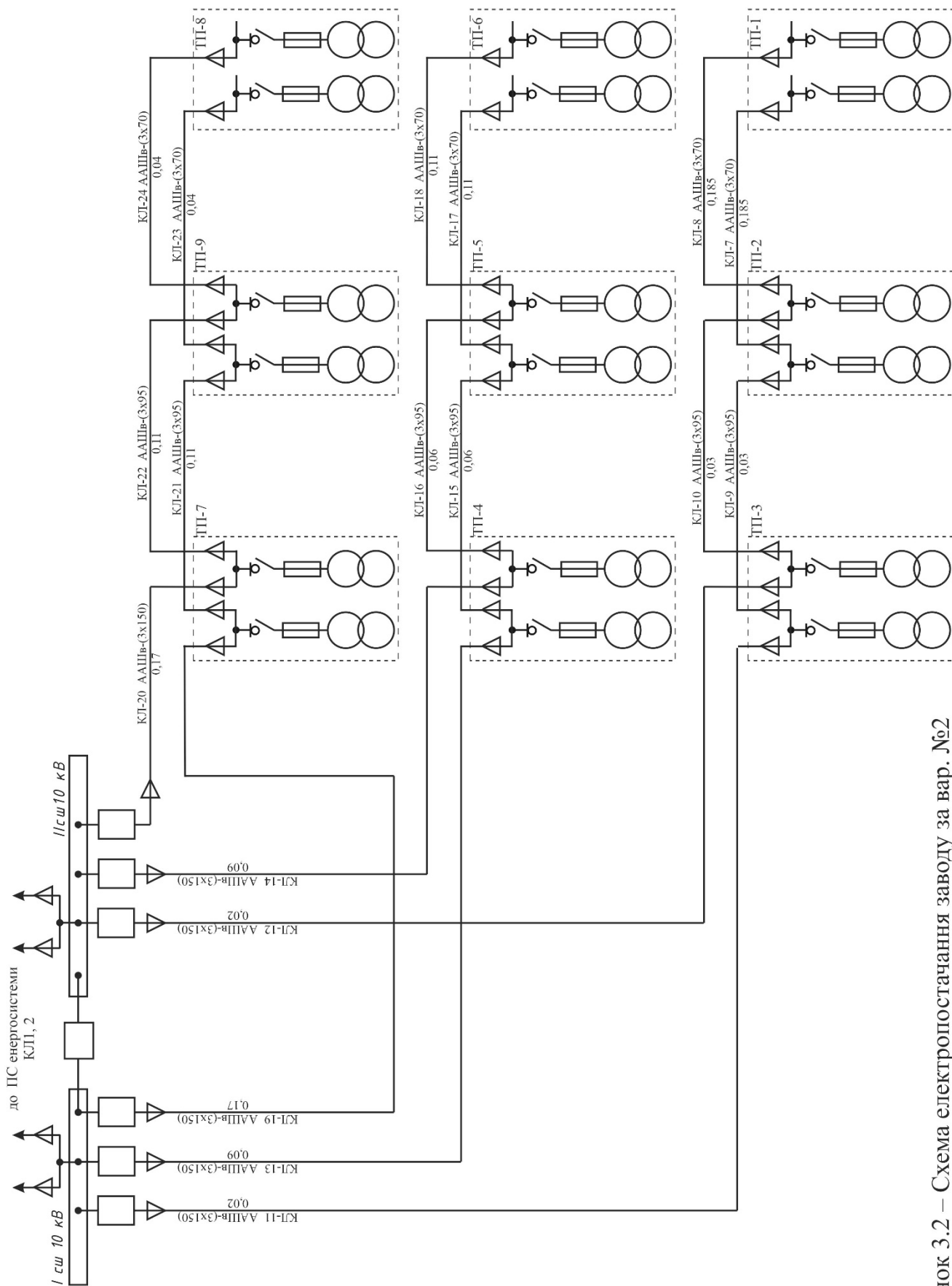


Рисунок 3.2 – Схема електропостачання заводу за вар. №2

Вибір кабельних ліній.

Розглянемо вибір кабельних ліній КЛ-7 і КЛ-8, що живлять ТП-1 (вар. № 1).

Розрахункові струми становлять:

у нормальному режимі:

$$I_{p.тп-1} = \frac{S_{p.тп1}}{n\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1496,4}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 43,2 \text{ А.}$$

у післяаварійному режимі:

$$I_{p.па} = \frac{S_{p.тп1}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1496,4}{\sqrt{3} \cdot 10} = 86,5 \text{ А.}$$

Оскільки для проєктованої системи електропостачання заводу мінімальний переріз кабельних ліній за умовою термічної стійкості становить: $F_{min} = 70 \text{ мм}^2$, то приймаємо до розгляду кабель марки ААШв-(3×70). Його тривало допустиме струмове навантаження становить: $I_{доп} = 162 \text{ А}$ згідно [1].

Допустимий струм кабельної лінії з урахуванням умов прокладання визначаємо за виразом:

$$I'_{доп} = k_{с.з} \cdot I_{доп} = 1,0 \cdot 162 = 162 \text{ А.}$$

де $k_{с.з}$ – коефіцієнт зниження допустимого струмового навантаження, який враховує прокладання поряд декількох кабелів [1]. Для КЛ, що прокладені у каналі приймаємо як для кабелів, прокладених у повітрі, тобто $k_{с.з} = 1$.

Допустимий струм перевантаження кабелю на час ліквідації післяаварійного режиму тривалістю до 6 год [1], визначаємо за виразом

$$I_{па,доп} = k_{д.а.п} \cdot I'_{доп} = 1,25 \cdot 162 = 202,5 \text{ А.}$$

де $k_{д.а.п}$ – коефіцієнт допустимого перевантаження кабелю.

Значення $k_{д.а.п} = 1,25$ приймається за умови, що коефіцієнт завантаження кабельної лінії в нормальному режимі не перевищує 0,6:

$$k_з = I_p / I'_{доп} = 43,2 / 162 = 0,25 < 0,6.$$

Таким чином, попередньо розглянутий кабель ААШв-(3×70) відповідає вимогам, що висуваються, тому приймаємо його для подальшого техніко-економічного порівняння варіанта № 1.

Вибір інших КЛ обох варіантів виконано за аналогічною методикою. Результати наведено в табл. 3.1. Для варіанта № 2 попередньо визначено навантаження магістральних ділянок кабельних ліній методом впорядкованих діаграм, результати розрахунку наведено в табл. Б.1.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	29

Таблиця 3.1 – Вибір кабельних ліній внутрішньої мережі заводу

№ вар.	№ КЛ	№ ЕП	I_p , А	Тип КЛ	$I_{\text{доп}}$, А	$k_{с.з}$	$k_{д.па}$	$I'_{\text{доп}}$, А	$k_{ап}$	$I_{па} < I_{ав.доп}$, А
1	3, 5	СД1, 2	41,0	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	1,0	41,0 < 202,5
	22, 24	СД3, 4	41,0	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	1,0	41,0 < 202,5
	4, 7	ТП1	43,2	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	86,5 < 202,5
	6, 9	ТП2	41,6	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	83,2 < 202,5
	8, 11	ТП3	41,6	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	83,1 < 202,5
	10, 13	ТП4	41,6	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	83,1 < 202,5
	12, 15	ТП5	44,8	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	89,6 < 202,5
	14, 17	ТП6	41,2	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	82,4 < 202,5
	16, 19	ТП7	44,8	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	89,6 < 202,5
	18, 21	ТП8	41,2	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	82,4 < 202,5
2	20, 23	ТП9	41,0	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	81,9 < 202,5
	3, 4	СД1, 2	41,0	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	1,0	41,0 < 202,5
	5, 6	СД3, 4	41,0	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	1,0	41,0 < 202,5
	7, 8	ТП1	43,2	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	86,5 < 202,5
	9, 10	ТП2	82,0	ААШВ-(3×95)	192	1,0	1,25	192,0	2,0	164,0 < 240,0
	11, 12	ТП3	126,9	ААШВ-(3×150)	246	1,0	1,25	246,0	2,0	253,8 < 307,5
	13, 14	ТП4	124,9	ААШВ-(3×150)	246	1,0	1,25	246,0	2,0	249,7 < 307,5
	15, 16	ТП5	81,4	ААШВ-(3×95)	192	1,0	1,25	192,0	2,0	162,8 < 240,0
	17, 18	ТП6	41,2	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	82,4 < 202,5
	19, 20	ТП7	128,6	ААШВ-(3×150)	246	1,0	1,25	246,0	2,0	257,2 < 307,5
	21, 22	ТП9	83,6	ААШВ-(3×95)	192	1,0	1,25	192,0	2,0	167,1 < 240,0
	23, 24	ТП8	41,0	ААШВ-(3×70)	162	1,0	1,25	162,0	2,0	82,4 < 202,5

Вибір схеми електропостачання

Критерієм вибору схеми електропостачання заводу є мінімум приведених витрат. Для кожного варіанта схеми приведені витрати визначають за виразом:

$$P_{в1} = E_n \cdot K + C + B \quad (3.1)$$

Для варіанта № 1:

$$P_{в1} = E_n \cdot K + C + B = 0,12 \cdot 16556,7 + 2233,9 + 369,4 = 4590,1 \text{ тис. грн.}$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень; C – поточні витрати на передавання та розподіл електроенергії, тис. грн/рік;
 K – сумарні капіталовкладення у схему електропостачання, тис. грн;
 B – вартість втрат електроенергії, тис. грн./рік.

Із розглянутих варіантів доцільним вважається той, для якого значення приведених витрат є найменшим. Порівняння виконують лише за тими елементами схеми електропостачання, які відрізняються між варіантами.

Загальна сума капіталовкладень за варіантами

Загальну суму капіталовкладень для кожного варіанта схеми електропостачання визначаємо за укрупненими показниками вартості елементів, що входять до відповідного варіанта. Результати розрахунку наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Капіталовкладення за варіантами схеми електропостачання

№ варіанта	Найменування елемента схеми	Одиниця	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн.	Вартість всього, тис. грн.
I	Шафи КРУ з високовольтними вимикачами 10 кВ	шт.	22	361,0	7942,0
	Кабельна лінія ААШВ-(3×70)	км	3,48	1441,0	5014,7
	Кабельний канал (з/б лотки)	км	0,75	4500,0	3600,0
	Всього				16556,7
II	Шафи КРУ з високовольтними вимикачами 10 кВ	шт.	10	361,0	3610,0
	Вимикач навантаження 10 кВ із запобіжником	шт.	18	45,0	810,0
	Кабельна лінія ААШВ-(3×70)	км	1,83	1441,0	2637,0
	Кабельна лінія ААШВ-(3×95)	км	0,06	1657,8	99,5
	Кабельна лінія ААШВ-(3×150)	км	0,56	2306,3	1291,5
	Кабельний канал (з/б лотки)	км	0,7	4500,0	3150,0
	Всього				11598,0

Розрахунок поточних витрат

Поточні витрати визначають укрупнено за двома складовими: амортизаційними відрахуваннями A та експлуатаційними витратами E . Для розрахунку використано норми амортизаційних відрахувань H_a і витрат на експлуатацію та обслуговування H_e , задані у відсотках від капіталовкладень.

Для шаф КРУ з високовольтними вимикачами 10 кВ поточні витрати становлять:

$$C = A + E = \frac{K_i \cdot H_a}{100} + \frac{K_i \cdot H_e}{100} = \frac{7942,0 \cdot 15}{100} + \frac{7942,0 \cdot 5}{100} = 1191,3 + 397,1 = 1588,4 \text{ тис.грн.}$$

Розрахунок поточних витрат для інших елементів обладнання за обома варіантами схеми внутрішнього електропостачання заводу виконано аналогічно. Результати наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок поточних витрат

№ вар.	Найменування елемента схеми	Норми, %		Витрати, тис. грн.			
		H_a	H_e	K	A	E	C
I	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ	15,0	5,0	7942,0	1191,3	397,1	1588,4
	Кабельна лінія ААШв-(3×70)	5,0	5,0	5014,7	250,7	250,7	501,5
	Кабельний канал (з/б лотки)	3,0	1,0	3600,0	108,0	36,0	144,0
	Разом						2233,9
II	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ	15,0	5,0	3610,0	541,5	180,5	722,0
	Вимикач навантаження із запобіжником	15,0	5,0	810,0	121,5	40,5	162,0
	Кабельна лінія ААШв-(3×70)	5,0	5,0	2637,0	131,9	131,9	263,7
	Кабельна лінія ААШв-(3×95)	5,0	5,0	99,5	5,0	5,0	9,9
	Кабельна лінія ААШв-(3×150)	5,0	5,0	1291,5	64,6	64,6	129,2
	Кабельний канал (з/б лотки)	3,0	1,0	3150,0	94,5	31,5	126,0
	Разом						1412,8

Річна вартість втрат електроенергії в схемі

Вартість втрат електроенергії в елементах схеми електропостачання визначають за діючим тарифом на електроенергію.

Розглянемо розрахунок вартості втрат електроенергії в кабельних лініях КЛ-7 і КЛ-8, які живлять ТП-1:

$$B = c_0 \Delta E_n = 11,129 \cdot 3460,2 = 38508,3 \text{ тис. грн.},$$

де c_0 – тариф на електроенергію (ОСР Кіровоградобленерго), грн/кВт·год;

ΔE_n – навантажувальні втрати електроенергії, кВт·год

$$\Delta E_n = \Delta P_{n,kl} \cdot \tau = 1,1 \cdot 3245,2 = 3460,2 \text{ кВт},$$

$\Delta P_{n,kl}$ – навантажувальні втрати активної потужності в кабельних лініях

$$\Delta P_{n,kl} = \Delta p_{kl} \cdot L \cdot k_z^2 = 44 \cdot 0,34 \cdot 0,27^2 = 1,1 \text{ кВт},$$

$\Delta p_{пл}$ – питомі втрати активної потужності в кабельній лінії при повному навантаженні, кВт/км; L – довжина кабельної лінії, км; k_z – коефіцієнт завантаження кабельної лінії.

Розрахунок вартості втрат електроенергії для інших кабельних ліній за обома варіантами виконано аналогічно. Результати наведено в табл. 3.4.

Результати техніко-економічного обґрунтування розглянутих варіантів схеми внутрішнього електропостачання заводу наведено в табл. 3.5.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					32

Таблиця 3.4 – Розрахунок вартості втрат електроенергії

№ вар	Назва ЕП	Номер КЛ	Тип КЛ	Δp , кВт/км	k_3	L_{Σ} , км	Δp , кВт	ΔE , кВт·год	B , грн.
I	Кабельна лінія	3, 5	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,440	1,2	4030,0	44850,1
		22, 24	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,380	1,1	3480,5	38734,2
		4, 7	ААШВ-(3×70)	44	0,27	0,340	1,1	3460,2	38508,3
		6, 9	ААШВ-(3×70)	44	0,26	0,070	0,2	659,1	7334,8
		8, 11	ААШВ-(3×70)	44	0,26	0,050	0,1	469,7	5227,2
		10, 13	ААШВ-(3×70)	44	0,26	0,170	0,5	1597,0	17772,6
		12, 15	ААШВ-(3×70)	44	0,28	0,140	0,5	1529,7	17024,2
		14, 17	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,380	1,1	3512,8	39094,0
		16, 19	ААШВ-(3×70)	44	0,28	0,340	1,1	3715,0	41344,4
		18, 21	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,550	1,6	5084,3	56583,4
		20, 23	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,620	1,7	5658,0	62967,7
Разом									369441,06
II	Кабельна лінія	3, 4	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,380	1,1	3480,5	38734,2
		5, 6	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,440	1,2	4030,0	44850,1
		7, 8	ААШВ-(3×70)	44	0,27	0,370	1,2	3765,5	41906,1
		9, 10	ААШВ-(3×95)	50	0,43	0,060	0,5	1774,9	19752,5
		11, 12	ААШВ-(3×150)	56	0,52	0,040	0,6	1934,9	21533,1
		13, 14	ААШВ-(3×150)	56	0,51	0,180	2,6	8429,0	93806,2
		15, 16	ААШВ-(3×95)	50	0,42	0,120	1,1	3500,9	38961,5
		17, 18	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,220	0,6	2033,7	22633,4
		19, 20	ААШВ-(3×150)	56	0,52	0,340	5,2	16884,3	187905,2
		21, 22	ААШВ-(3×95)	50	0,44	0,220	2,1	6760,3	75235,4
		23, 24	ААШВ-(3×70)	44	0,25	0,080	0,2	739,5	8230,31
Разом									593548,05

Таблиця 3.5 – Результати техніко-економічного обґрунтування варіантів схеми електропостачання

Показники	Од. вим.	Варіант	
		1	2
Капіталовкладення	тис. грн.	16556,7	11598,0
Поточні витрати	тис. грн.	2233,9	1412,8
Вартість втрат електроенергії	тис. грн.	369,4	593,5
Приведені витрати	тис. грн.	4590,1	3398,1

Порівняємо приведені витрати за розглянутими варіантами:

$$П_{в1} = 4590,1 > П_{в2} = 3398,1, \text{ тис. грн.};$$

Оскільки приведені витрати для варіанта № 2 є меншими, до подальшого проектування приймаємо схему електропостачання заводу за варіантом № 2.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					33

4 КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації

Сумарне споживання по заводу:

- активної потужності:

$$P_p = P_{н.вн} + P_{н.нн} + \Delta P_{тр} = 2016 + 12233,3 + 145,5 = 14393,8 \text{ кВт};$$

де $P_{н.вн}$ – високовольтне навантаження (див. табл. 1.3), кВт;

$\Delta P_{тр}$ – сумарні втрати активної потужності в цехових трансформаторах:

$$\Delta P_{тр} = \sum \Delta P_{тр.i} = 16,3 + 16,3 + 31,8 + 32,5 + 32,3 + 16,3 = 145,5 \text{ кВт};$$

$P_{н.нн}$ – навантаження на стороні 0,4 кВ

$$P_{н.нн} = \sum P_{тп.i} = 1367,3 + 13820,6 + 2719,9 + 2761,8 + 2746,7 + 1383,2 = 12232,3 \text{ кВт};$$

- реактивної потужності:

$$Q_p = Q_{н.вн} + Q_{н.нн} + \Delta Q_{тр} = 0 + 11787,1 + 709,2 = 12496,4 \text{ квар};$$

де $Q_{н.вн}$ – високовольтне навантаження;

$\Delta Q_{тр}$ – втрати реактивної потужності у цехових трансформаторах:

$$\Delta Q_{тр} = \sum \Delta Q_{тр.i} = 79,4 + 79,3 + 155,4 + 158,4 + 157,3 + 79,4 = 709,2 \text{ квар}.$$

$Q_{н.вн}$ – низьковольтне навантаження (див. табл. 1.3), квар;

$$Q_{н.нн} = \sum Q_{тп.i} = 1457,1 + 1625,2 + 2073,7 + 2605,1 + 3218,4 + 1437,5 = 11787,1 \text{ квар};$$

Економічно доцільний перетік реактивної потужності з мережі енергосистеми до мережі заводу:

$$Q_e = P_p \cdot \text{tg}\varphi_{св} = 14393,9 \cdot 0,15 = 2159,1 \text{ квар}.$$

$\text{tg}\varphi_e$ – економічно обґрунтоване значення коефіцієнта реактивної потужності, що характеризує допустимий перетік реактивної потужності з мережі енергосистеми до мережі заводу; приймаємо $\text{tg}\varphi_e = 0,15$.

Мінімальна кількість трансформаторів цехових ТП:

$$N_0 = P_n / (k_3 \cdot S_{тр.ном}) = 12232,3 / (0,7 \cdot 1000) = 17,5;$$

де $k_3 = 0,7$ – коефіцієнт завантаження трансформаторів за даними табл. 1.3.

Приймаємо $N_0 = 18$ шт.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					34

Проаналізуємо варіанти компенсації реактивної потужності за різної кількості трансформаторів у цехових ТП: $N = N_0$, $N = N_0 + 1$, $N = N_0 + 2$.

Варіант І. Реактивна потужність, яка може перетікати з мережі 10 кВ до мережі 0,4 кВ через цехові трансформатори, визначається за виразом:

$$Q_1 = \sqrt{(n \cdot S_{\text{тр.ном}} \cdot k_3)^2 - P_{\text{н}}^2} = \sqrt{(18 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 12232,3^2} = 3021,9 \text{ квар.}$$

Потужність пристроїв компенсації реактивної потужності, що необхідно встановити в мережі 0,4 кВ, знаходимо з умови балансу реактивної потужності на шинах цехових ТП:

$$Q_{\text{кн}} = Q_{\text{н}} - Q_1 = 11787,1 - 3021,9 = 8765,3 \text{ квар.}$$

До встановлення приймаємо пристрої компенсації реактивної потужності загальною потужністю $Q_{\text{ку.нн}} = 8800$ квар (4×275, 4×450, 2×550, 8×600 квар).

$$\text{Уточнене значення } Q_1 = Q_{\text{н}} - Q_{\text{ку.нн}} = 11787,4 - 8800 = 2987,1 \text{ квар.}$$

Потужність ПКРП, які потрібно встановити у мережі 10 кВ

$$Q_{\text{сд.вн}} = Q_{\text{р}} - Q_{\text{кн}} - Q_{\text{е}} = 12496,4 - 8765,3 - 2159,1 = 1572 \text{ квар.}$$

Оскільки $Q_{\text{сд.вн}} > 0$, то для компенсації реактивної потужності на стороні 10 кВ насамперед використовуємо СД, що встановлені на КС.

Максимальна реактивна потужність, яку можуть генерувати синхронні двигуни в режимі перезбудження, становить:

$$Q_{\text{max}} = n \cdot \alpha \cdot Q_{\text{ном}} / \eta = 4 \cdot 1,21 \cdot 0,327 / 0,938 = 1688 \text{ квар,}$$

де n – кількість СД; α – коефіцієнт максимального перевантаження СД за реактивною потужністю; $Q_{\text{ном}}$ – номінальна реактивна потужність СД.

Оскільки:

$$Q_{\text{сд}} = 1688 > Q_{\text{кв}} = 1572 \text{ квар.}$$

тому встановлення конденсаторних установок у мережі 10 кВ не потрібне.

Результати розрахунку ПКРП для інших варіантів наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Баланс реактивної потужності у СЕП заводу

Показники	Варіант		
	1	2	3
Потужність КУ 0,4 кВ, квар	8800,0	7250,0	5650,0
Потужність генерована СД 10 кВ, квар	1450,0	1580,0	1688,0
Потужність КУ 10 кВ	0,0	1500,0	3000,0
Споживання реактивної потужності із енергосистеми, квар	2159,1	2159,1	2159,1
Всього за умовою балансу, квар	87,3	7,3	0,7

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування ПКРП

Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності виконується на основі техніко-економічного порівняння можливих варіантів. Основним критерієм вибору є мінімальне значення приведених витрат.

Варіант І. Розрахункові приведені витрати на компенсацію реактивної потужності визначаються за виразом:

$$\begin{aligned} PB_1 &= E_n \cdot (K_{\text{ку.нн}} + K_{\text{ку.вн}} + K_{\text{тп}}) + (\Delta P_{\text{ку.нн}} + \Delta P_{\text{ку.вн}} + \Delta P_{\text{тп}}) \cdot c_0 \cdot \tau + B_{\text{сд.1}} = \\ &= 0,32 \cdot (5251,8 + 0 + 0) + (39,6 + 0 + 5,35) \cdot 11,129 \cdot 10^{-3} \cdot 3245,2 + 1,03 = \\ &= 3305,0 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

де E – сумарний коефіцієнт річних відрахувань:

$$E = p_n + H_a + H_e = 0,12 + 0,05 + 0,15 = 0,32$$

$K_{\text{ку.нн}}$ – вартість низьковольтних комплектних конденсаторних (ККУ):

$$K_{\text{ку.нн}} = \sum N_{\text{ку.нн.і}} \cdot K_{\text{ку.нн.і}} = 4 \cdot 147,6 + 4 \cdot 265,4 + 2 \cdot 330,3 + 8 \cdot 367,4 = 5251,8 \text{ тис. грн.}$$

$N_{\text{ку.нн.і}}$ – кількість ККУ відповідної потужності, тис. грн.;

$K_{\text{ку.нн.і}}$ – вартість однієї ККУ відповідної потужності;

$\Delta P_{\text{тп}}$ – активні втрати потужності, зумовлені передаванням реактивної потужності через трансформатори цехових ТП:

$$\Delta P_{\text{тп}} = Q_{\text{п}}^2 \cdot R_{\text{ек}} / U_{\text{ном}}^2 = 2987,1^2 \cdot 6 \cdot 10^{-5} / 10^2 = 5,35 \text{ кВт,}$$

де $R_{\text{ек}}$ – еквівалентний опір всіх цехових трансформаторів

$$R_{\text{ек}} = (\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2) / (N_{\text{тр}} \cdot S_{\text{тр.ном}}^2) = (10,8 \cdot 10^2) / (18 \cdot 1000^2) = 6 \cdot 10^{-5} \text{ кОм.}$$

Втрати активної потужності у конденсаторах низьковольтних ККУ

$$\Delta P_{\text{кн}} = \Delta P_{\text{пит}} \cdot Q_{\text{ку.нн}} = 0,0045 \cdot 8800 = 39,6 \text{ кВт.}$$

Витрати, пов'язані з генерацією реактивної потужності СД:

$$B_{\text{сд1}} = B_0 + B_1 \cdot Q + B_2 \cdot Q^2 = 0 + 531,8 \cdot 1,45 + 122,8 \cdot 1,45^2 = 1,03 \text{ тис. грн./рік}$$

де B_0 – витрати на встановлення тиристорного регулятора збудження. Оскільки сучасні синхронні двигуни зазвичай комплектуються регуляторами збудження, додаткові витрати на їх встановлення не враховуються;

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		36

B_1, B_2 – питомі витрати на 1 Мвар реактивної потужності, що генерується групою з чотирьох однакових синхронних двигунів:

$$B_1 = c_0 \left[\frac{D_1}{Q_{\text{ном}}} + \frac{2 \cdot D_2 \cdot Q_{\text{пр}}}{Q_{\text{ном}}^2 \cdot n} \right] = 11,129 \left[\frac{5,16}{0,327} + \frac{2 \cdot 4,72 \cdot 1,45}{0,327^2 \cdot 4} \right] = 531,8 \text{ грн. / Мвар};$$

$$B_2 = c_0 \frac{D_2}{n \cdot Q_{\text{ном}}^2} = 11,129 \frac{4,72}{4 \cdot 0,327^2} = 122,8 \text{ грн./Мвар}^2.$$

Розрахунок приведених витрат для другого та третього варіантів компенсації реактивної потужності виконується за аналогічною методикою. Отримані результати наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Визначення приведених витрат на компенсацію реактивної потужності у СЕП заводу

№ п/п	Параметр	Одиниця вимір.	Номер варіанту компенсації реактивної потужності		
			1	2	3
1	$N_{\text{тр}}$	шт.	18	19	20
2	$R_{\text{ек}} \cdot 10^{-5}$	кОм	6,0	5,68	5,4
3	$\Delta P_{\text{ку.нн}}$	кВт	39,6	32,6	25,4
4	$\Delta P_{\text{ку.вн}}$	кВт	0,0	4,5	9,0
5	$\Delta P_{\text{тп}}$	кВт	5,35	11,7	20,3
6	$K_{\text{ку.нн}}$	тис. грн.	5251,8	4314,3	3301,9
7	$K_{\text{ку.вн}}$	тис. грн.	0,0	1177,2	2382,0
8	$K_{\text{ктп}}$	тис. грн.	0,0	1182,4	2003,8
9	$B_{\text{сд}}$	тис. грн.	1,03	1,13	1,26
9	$ПВ$	тис. грн.	3305,0	3899,2	4436,9

Порівняємо отримані значення приведених витрат для розглянутих варіантів компенсації реактивної потужності:

$$ПВ_1 = 3305,0 < 3899,2 < ПВ_3 = 4436,9 \text{ тис. грн.}$$

Отже, найменше значення річних приведених витрат відповідає першому варіанту. Тому саме цей варіант компенсації реактивної потужності приймається для подальшого розгляду.

Розподіл потужності низьковольтних ККУ визначається з урахуванням навантаження окремих цехових ТП, рівня реактивної потужності споживачів,

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					37

втратах у мережі і проводиться наступним чином. Реактивне навантаження, яку потрібно компенсувати у мережі 0,4 кВ ТП 1, 2 (I вар.):

$$Q_1 = \sqrt{(n \cdot S_{\text{тр.ном}} \cdot k_3)^2 - P_n^2} = \sqrt{(2 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 1366,9^2} = 302,8 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{ку.нн}} = Q_n - Q_p = 1358,1 - 302,8 = 1055,3 \text{ квар.}$$

Для встановлення на стороні 0,4 кВ приймаємо низьковольтні ККУ сумарною потужністю: $Q_{\text{ку.нн}} = 1100$ квар. Для цього передбачено встановлення двох комплектних конденсаторних установок типу УКРМ-0,4-550/9-50-УЗ.

Розрахунок для інших цехових ТП виконується за аналогічною методикою. Отримані результати наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Вибір кількості, потужності та місця встановлення ККУ

№ ТП	$N_{\text{тр}}$, шт.	P_p , кВт	Q_p , квар	Q_n , квар	$Q_{\text{ку.нн}}$, квар	$N_{\text{ку}}$	Тип КУ	$\Sigma Q_{\text{ку.нн}}$, квар	S , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Варіант I									
1	2	1367,3	1457,1	301,0	1156,2	2	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	1200,0	1391,2
2	2	1366,3	1545,9	305,2	1240,7	2	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	1200,0	1409,1
3, 4	4	2688,1	1918,3	783,7	1134,6	4	УКРМ 0,4-275/7-25-УЗ	1100,0	2809,9
5, 7	4	2729,3	2446,6	625,3	1821,4	4	УКРМ 0,4-450/7-50-УЗ	1800,0	2804,8
6, 8	4	2714,4	3061,1	687,0	2374,1	4	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	2400,0	2793,9
9	2	1366,9	1358,1	302,8	1055,3	2	УКРМ 0,4-550/9-50-УЗ	1100,0	1391,0
Всього	18	12232,3	11787,1	3004,9	8782,3	18		8800	
Варіант II									
ТП1	2	1367,3	1457,1	301,0	1156,2	2	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	1200	1391,2
ТП2	2	1366,3	1545,9	305,2	1240,7	2	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	1200	1409,4
ТП3, 4	4	2688,1	1918,3	783,7	1134,6	4	УКРМ 0,4-275/7-25-УЗ	1100	2809,9
ТП5, 7	5	2729,3	2446,6	2191,1	255,5	1	УКРМ 0,4-250/5-50-УЗ	250	3503,5
ТП6, 8	4	2714,4	3061,1	687,0	2374,1	4	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	2400	2793,8
ТП9	2	1366,9	1358,1	302,8	1055,3	2	УКРМ 0,4-550/9-50-УЗ	1100	1391,0
Всього	18	12232,3	11787,1	4570,7	7216,4			7250	
Варіант III									
ТП1	2	1367,3	1457,1	301,0	1156,2	2	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	1200	1391,2
ТП2	2	1366,3	1545,9	305,2	1240,7	2	УКРМ 0,4-600/9-50-УЗ	1200	1409,4
ТП3, 4	4	2688,1	1918,3	783,7	1134,6	4	УКРМ 0,4-275/7-25-УЗ	1100	2809,9
ТП5, 6	5	2729,3	2446,6	2191,1	255,5	1	УКРМ 0,4-250/5-50-УЗ	250	3503,5
ТП7, 8	5	2714,4	3061,1	2209,5	851,6	4	УКРМ 0,4-200/5-25-УЗ	800	3532,8
ТП9	2	1366,9	1358,1	302,8	1055,3	2	УКРМ 0,4-550/9-50-УЗ	1100	1391,0
Всього	20	12232,3	11787,1	6093,3	5693,9			5650	

5 ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ

5.1 Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових підстанцій

У розподільних мережах напругою 10 кВ заводу передбачено встановлення двотрансформаторних цехових підстанцій. Таке рішення обґрунтоване специфікою виробництва – основне навантаження заводу складають електроприймачі II-ї категорії надійності, а сам завод працює у двозмінному режимі. Додатковим аргументом також є відсутність складського резерву силового обладнання.

Загальна кількість трансформаторів та їхня номінальна потужність взаємопов'язані. Оскільки розрахункове навантаження заводу S_p фіксоване, то необхідна кількість трансформаторів прямо залежить від обраного номіналу однієї комплектної трансформаторної підстанції (КТП). Для двотрансформаторних підстанцій, що живлять переважно споживачів I-ї категорії, цей показник приймається на рівні 0,65-0,7, а для цехів зі споживачами II-ї категорії, де застосовується взаємне резервування трансформаторів, оптимальний діапазон завантаження становить 0,7-0,8.

Спираючись на рекомендації та фактичні розрахункові навантаження, для живлення цехових споживачів приймаємо 9 підстанцій. Кожна з яких комплектується двома трансформаторами з одиничною потужністю 1000 кВ·А, тобто загалом намічаємо до встановлення приймається 18 трансформаторів.

Однак, описаний вище спрощений підхід може бути недостатньо ефективним з економічної точки зору. Це пов'язано з тим, що завод виходить на своє максимальне розрахункове навантаження не одразу після введення в експлуатацію, а нарощує його поступово. З огляду на це, необхідно перевірити попередній вибір більш точним методом питомої щільності електричного навантаження.

Згідно цієї методики на першому етапі визначаємо щільність навантаження

$$s_0 = S_p / F = 12404,2 / 104253 = 0,12 \text{ кВ} \cdot \text{А} / \text{м}^2.$$

де F – сумарна площа виробничих приміщень.

Згідно рекомендаціями, якщо питома щільність навантаження не перевищує $s_0 < 0,2 \text{ кВ} \cdot \text{А} / \text{м}^2$ то економічно доцільна одинична потужність трансформатора складає $S_{e.\text{ном}} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

На другому етапі, по $S_{e.\text{ном}}$, визначаємо необхідну кількість трансформаторів

$$N_{\text{тр}} = S_p / (k_{\text{з.тр}} / S_{e.\text{ном}}) = 12404,2 / (0,7 \cdot 1000) = 17,7 \text{ од.}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		39

Округливши отриманий результат до найближчого цілого, отримуємо 18 одиниць. Таким чином, перевірка повністю підтвердила коректність попереднього вибору.

На третьому етапі вибору трансформаторів виконуємо перевірку на здатність витримувати допустимі післяаварійні перевантаження:

$$S_{н.т} \cdot k_{п} > S_{п.а}; \quad (5.1)$$

де $k_{п}$ – коефіцієнт аварійного перевантаження трансформаторів, приймаємо 1,4 згідно [1]; $S_{п.а}$ – розрахункове навантаження в післяаварійному режимі.

Детальні результати розрахунків та перевірки для кожної цехової підстанції наведено в табл. 5.1. Проведений аналіз підтверджує, що оливні трансформатори типу ТМГ-1000/10/0,4 забезпечать споживачів необхідною електроенергією з урахуванням дозволених режимів перевантаження.

5.2 Компоновка та місце розташування цехових трансформаторних підстанцій

Оптимальне місце розміщення КТП безпосередньо залежить від генерального плану заводу, а також від величини та характеру розподілу електричних навантажень. Головним принципом проектування є максимальне наближення джерела живлення до споживачів. Саме тому КТП доцільно встановлювати всередині виробничих приміщень, безпосередньо у ЦЕН. Таке рішення дає змогу суттєво зменшити довжину ліній 0,4 кВ, що автоматично знижує втрати потужності та електроенергії. Крім того, це відкриває шлях до застосування надійніших та зручніших в експлуатації конструктивних рішень: магістральних (ШМА) та розподільчих (ШРА) комплектних шинопроводів.

На території заводу більшість підстанцій розташовується в робочих зонах, якнайближче до найбільш потужного технологічного обладнання. Зокрема, у зварювально-складальному, заготівельно-пресовому та механоскладальному №1 цехах передбачено встановлення звичайних внутрішньоцехових КТП. Фарбувальне відділення належить до вибухонебезпечної зони класу В-1а, а дільниці термічної обробки та перевірки з комплектацією класифікуються як пожежонебезпечні зони П-Па. Зважаючи на такі умови, розміщувати електрообладнання відкрито не можна, тому КТП для цих підрозділів винесено в ізольовані, спеціально призначені приміщення.

Просторове компонування вбудованих та внутрішньоцехових підстанцій вибирається індивідуально, з врахуванням ряду факторів, серед яких архітектурно-будівельні обмеження, конфігурація виробничих цехів, розташування технологічних ліній. Окрема увага приділяється питанням температурних режимів роботи електрообладнання підстанцій, а також жорсткому дотриманню норм пожежної та електричної безпеки.

						Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Таблиця 5.1 – Вибір трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій

№ ТП	Споживач	Категорія ЕП за надійністю електропостачання	S_p , кВт	$k_{зд}$	$k_{з.ав}$	$S_{p.т.}$, кВА	Число та марка трансформаторів, кВА	$k_{п}$	$S_{тр.ном} \cdot k_{п} > S_{п.а}$
1	Компресорна станція	II							
	Насосна оборотного водопостачання	II							
	Відділення перевірки та комплектування	II							
	Разом по ТП №1		1391,2	0,70	1,39	695,6	2×ТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 ≈ 1391,2
2	Збиральний цех	II							
	Адмінкорпус	III							
	Механоскладальний цех №1	II							
	Разом по ТП №2		1409,1	0,70	1,41	704,6	2×ТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 ≈ 1409,1
3, 4	Термічне відділення	I, II							
	Склад готової продукції	III							
	Разом по ТП №3, 4		2809,9	0,70	1,40	702,5	4×ТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 > 1404,9
5, 7	Фарбувальний цех	II							
	Механоскладальний цех №2	II							
	Разом по ТП №5, 7		2804,8	0,70	1,40	701,2	4×ТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 > 1400,2
6, 9	Зварювально-збиральний цех	II							
	Станція очистки в/с	II							
	Їдальня	I, II							
	Разом по ТП №6, 9		2793,9	0,70	1,40	698,5	4×ТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 > 1397,0
8	Блок складів	III							
	Заготівельно-пресовочний цех	II							
	Всього по ТП №8		1391,0	0,70	1,39	695,5	2×ТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 ≈ 1391,0

6 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ І ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів КЗ у мережі 10 кВ

Розрахунок струмів КЗ виконується з метою вибору та перевірки електроапаратів і КЛ. При перевірці провідників і апаратів на динамічну та термічну стійкість розрахунковим видом КЗ є трифазне коротке замикання. Детальний розрахунок у відносних базисних одиницях [7, 8] виконано для однієї магістральної лінії в максимальному режимі роботи енергосистеми, для решти схеми розрахунок наведено в табл. 6.1.

Розрахункова схема однієї системи шин системи електропостачання заводу представлена на рис. 6.1, а її схема звміщення - на рис.6.2.

За базисні величини прийнято: напругу $U_6 = 10,5$ кВ; потужність $S_6 = 500$ МВ·А. Базисний струм визначається за формулою:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{cp}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55,0 \text{ кА};$$

Параметри схеми заміщення (II сш. 10 кВ):

- опір енергосистеми

$$x_{c*} = \frac{S_6}{\sqrt{3}I_{кз.с.мах} \cdot U_{cp}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 9,21 \cdot 10,5} = 5,97 \text{ в.о.};$$

- кабельних ліній:

КЛ-2:

$$r_{кл2*} = \frac{r_{0,кл2}}{n} \cdot l_{кл2} \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = \frac{0,1}{2} \cdot 1,0 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,454 \text{ в.о.};$$

$$x_{кл2*} = x_{0,кл2} \cdot l_{кл2} \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,0462 \cdot 1,0 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,42 \text{ в.о.};$$

де n – число паралельних кабелів у фазі;

$x_{0,кл2}$ – питомий індуктивний опір кабельної лінії:

$$x_{0,кл2} = \frac{1}{n} \cdot \omega L = \frac{1}{2} 2\pi \cdot f_m \cdot L = \pi \cdot 50 \cdot 0,294 \cdot 10^{-3} = 0,046 \text{ Ом/км};$$

L – розрахункова питома індуктивність кабелю [9], мГн/км;

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	42

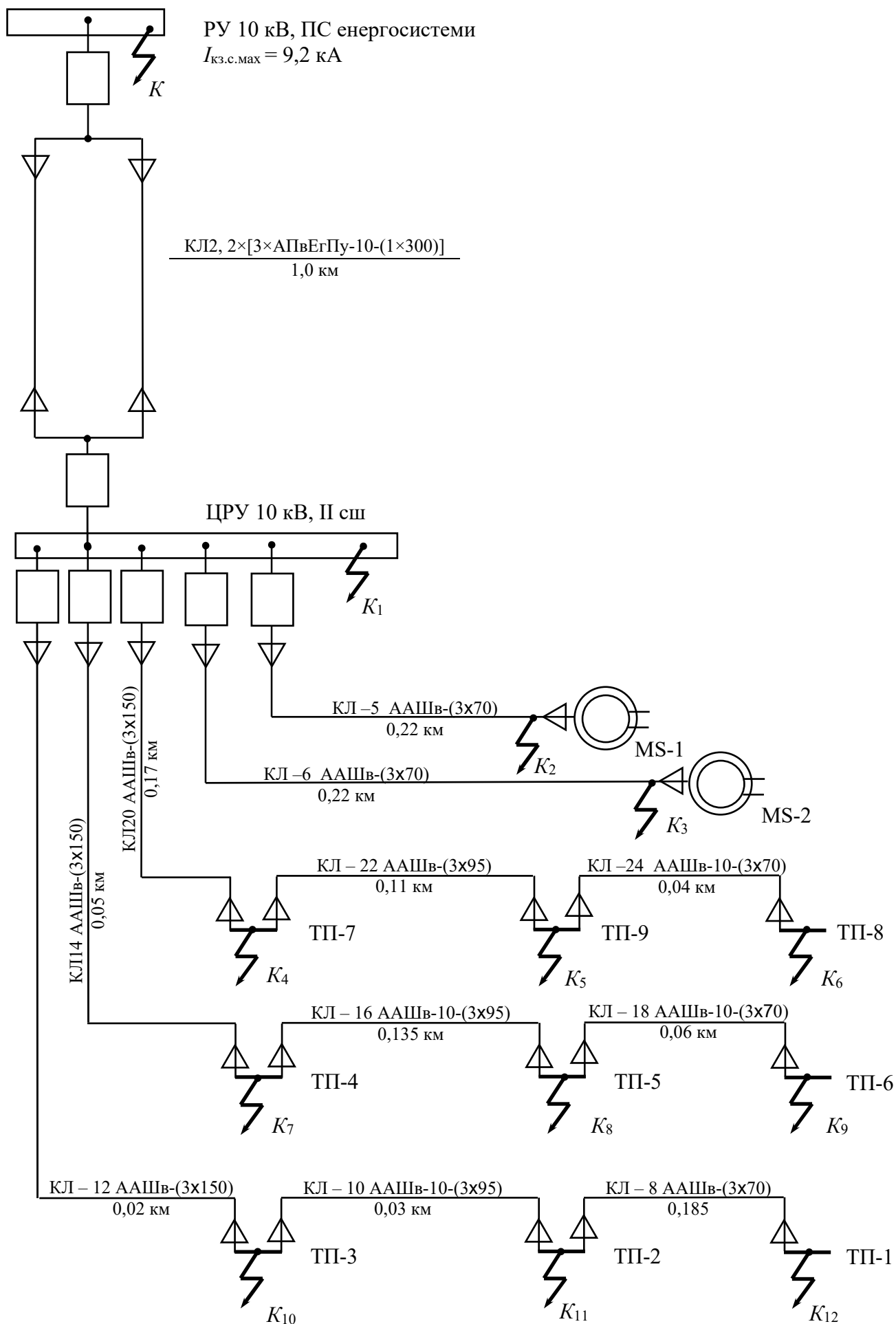


Рисунок 6.1 – Розрахункова схема системи електропостачання заводу (II сш. 10 кВ)

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	43

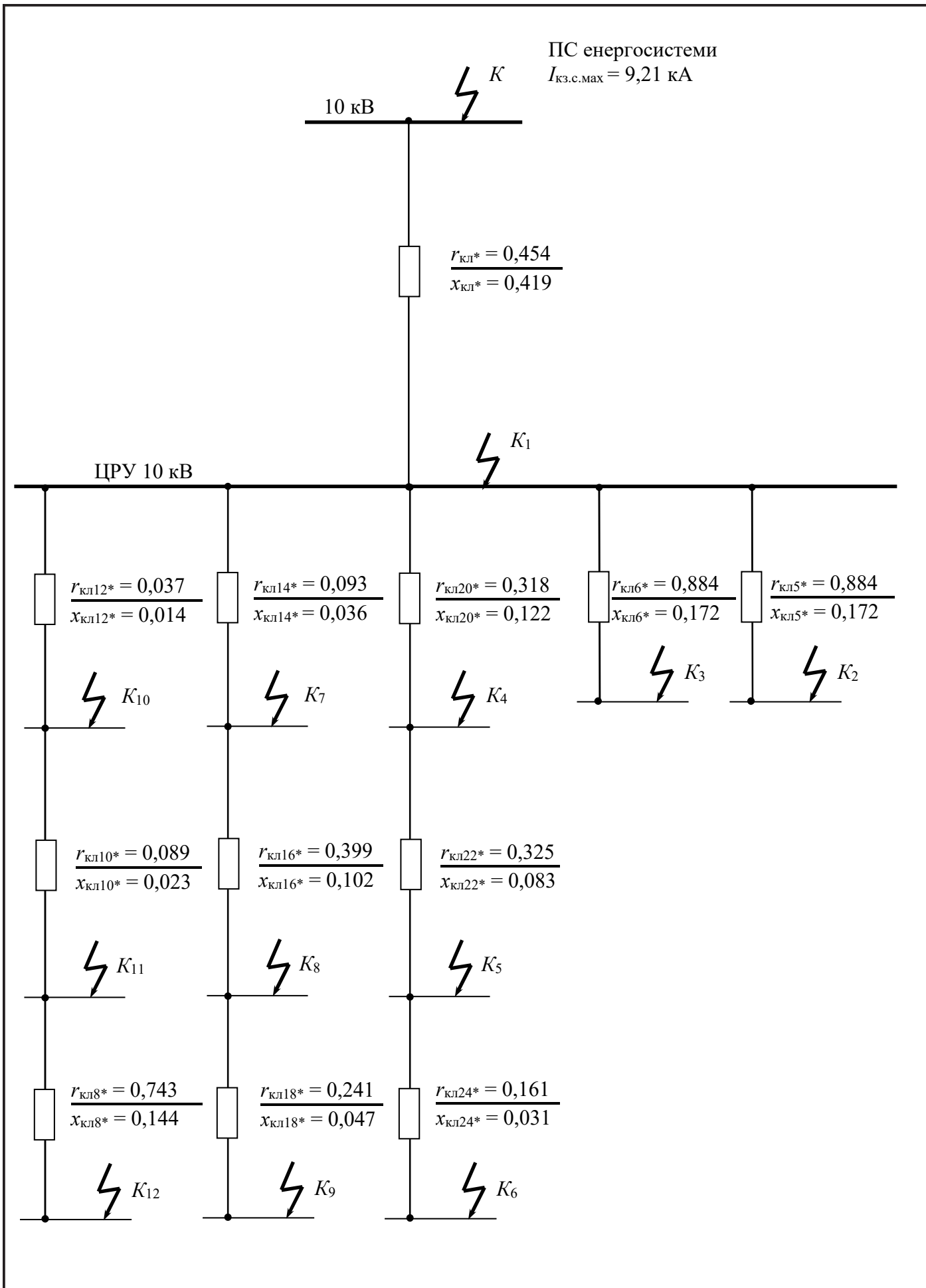


Рисунок 6.2 – Схема заміщення СЕП заводу (II сш. 10 кВ)

						Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

КЛ-12:

$$r_{\text{кл}12*} = r_{0.\text{кл}12} \cdot l_{\text{кл}12} \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,206 \cdot 0,02 \frac{1000}{10,5^2} = 0,037 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{кл}12*} = x_{0.\text{кл}12} \cdot l_{\text{кл}12} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,079 \cdot 0,02 \cdot \frac{500}{10,5^2} = 0,014 \text{ в.о.};$$

КЛ-10:

$$r_{\text{кл}10*} = r_{0.\text{кл}10} \cdot l_{\text{кл}10} \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,326 \cdot 0,03 \frac{1000}{1035^2} = 0,089 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{кл}10*} = x_{0.\text{кл}10} \cdot l_{\text{кл}10} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,083 \cdot 0,03 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,023 \text{ в.о.};$$

КЛ-8:

$$r_{\text{кл}8*} = r_{0.\text{кл}} \cdot l_{\text{кл}8} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,443 \cdot 0,185 \frac{1000}{10,5^2} = 0,743 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{кл}8*} = x_o \cdot l_{\text{кл}8} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,086 \cdot 0,185 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,144 \text{ в.о.};$$

де $x_{0.\text{кл}}$, $r_{0.\text{кл}}$ – відповідно, питомий індуктивний та активний опори КЛ, Ом/км;
 l - довжина КЛ, км;

Результуючий опір у колі КЗ:

- точка K_1 :

$$r_{\text{рез}1*} = r_{\text{кл}2*} = 0,454 \text{ в.о.}; \quad x_{\text{рез}1*} = x_{\text{с*}} + x_{\text{кл}2*} = 5,97 + 0,419 = 6,389 \text{ в.о.};$$

$$z_{\text{рез}1*} = \sqrt{r_{\text{рез}1*}^2 + x_{\text{рез}1*}^2} = \sqrt{0,454^2 + 6,389^2} = 6,405 \text{ в.о.};$$

- точка K_{10} :

$$r_{\text{рез}10*} = r_{\text{рез}1*} + r_{\text{кл}12*} = 0,454 + 0,037 = 0,491 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{рез}10*} = x_{\text{рез}1*} + x_{\text{кл}12*} = 6,389 + 0,014 = 6,404 \text{ в.о.};$$

$$z_{\text{рез}10*} = \sqrt{r_{\text{рез}10*}^2 + x_{\text{рез}10*}^2} = \sqrt{0,491^2 + 6,404^2} = 6,422 \text{ в.о.};$$

- точка K_{11} :

$$r_{\text{рез}11*} = r_{\text{рез}10*} + r_{\text{кл}10*} = 0,491 + 0,089 = 0,58 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{рез}11*} = x_{\text{рез}10*} + x_{\text{кл}10*} = 6,404 + 0,023 = 6,426 \text{ в.о.};$$

$$z_{\text{рез}11*} = \sqrt{r_{\text{рез}11*}^2 + x_{\text{рез}11*}^2} = \sqrt{0,58^2 + 6,426^2} = 6,452 \text{ в.о.};$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		45

- точка K_{12} :

$$r_{\text{рез}12*} = r_{\text{рез}11*} + r_{\text{кл}8*} = 0,58 + 0,743 = 1,323 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{рез}12*} = x_{\text{рез}11*} + x_{\text{кл}8*} = 6,426 + 0,144 = 6,57 \text{ в.о.};$$

$$z_{\text{рез}12*} = \sqrt{r_{\text{рез}12*}^2 + x_{\text{рез}12*}^2} = \sqrt{1,323^2 + 6,57^2} = 6,702 \text{ в.о.}$$

Ударні коефіцієнти:

$$k_{\text{уд}1} = 1 + e^{(-0,01/T_{a1})} = 1 + e^{(-0,01/0,0032)} = 1,043;$$

$$k_{\text{уд}10} = 1 + e^{(-0,01/T_{a10})} = 1 + e^{(-0,01/0,0032)} = 1,043;$$

$$k_{\text{уд}11} = 1 + e^{(-0,01/T_{a11})} = 1 + e^{(-0,01/0,0032)} = 1,043;$$

$$k_{\text{уд}12} = 1 + e^{(-0,01/T_{a12})} = 1 + e^{(-0,01/0,0031)} = 1,041;$$

де T_a – час затухання аперіодичної складової струму КЗ:

$$T_{a1} = \frac{x_{\text{рез}1}}{\omega \cdot r_{\text{рез}1}} = \frac{6,389}{314,16 \cdot 0,454} = 0,0032 \text{ с}; \quad T_{a10} = \frac{x_{\text{рез}10}}{\omega \cdot r_{\text{рез}10}} = \frac{6,404}{314,16 \cdot 0,491} = 0,0032 \text{ с};$$

$$T_{a11} = \frac{x_{\text{рез}11}}{\omega \cdot r_{\text{рез}11}} = \frac{6,426}{314,16 \cdot 0,58} = 0,0032 \text{ с}; \quad T_{a12} = \frac{x_{\text{рез}12}}{\omega \cdot r_{\text{рез}12}} = \frac{6,57}{314,16 \cdot 1,323} = 0,0031 \text{ с}.$$

Надперехідний струм:

$$I_1'' = \frac{E_*'' \cdot I_6}{z_{\text{рез}1*}} = \frac{1 \cdot 55,0}{6,452} = 8,58 \text{ кА}; \quad I_{10}'' = \frac{E_*'' \cdot I_6}{z_{\text{рез}10*}} = \frac{1 \cdot 55,0}{6,422} = 8,52 \text{ кА};$$

$$I_{11}'' = \frac{E_*'' \cdot I_6}{z_{\text{рез}11*}} = \frac{1 \cdot 55,0}{6,452} = 8,52 \text{ кА}; \quad I_{12}'' = \frac{E_*'' \cdot I_6}{z_{\text{рез}12*}} = \frac{1 \cdot 55,0}{6,702} = 8,2 \text{ кА};$$

Ударні струми

$$i_{\text{уд}1} = \sqrt{2} k_{\text{уд}1} \cdot I_1'' = \sqrt{2} \cdot 1,043 \cdot 8,58 = 12,66 \text{ кА};$$

$$i_{\text{уд}10} = \sqrt{2} k_{\text{уд}10} \cdot I_{10}'' = \sqrt{2} \cdot 1,043 \cdot 8,56 = 12,63 \text{ кА};$$

$$i_{\text{уд}11} = \sqrt{2} k_{\text{уд}11} \cdot I_{11}'' = \sqrt{2} \cdot 1,043 \cdot 8,52 = 12,57 \text{ кА};$$

$$i_{\text{уд}12} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}12} \cdot I_{12}'' = \sqrt{2} \cdot 1,041 \cdot 8,2 = 12,07 \text{ кА}.$$

Початкове значення періодичної складової струму КЗ, що генерується СД:

$$I_{\text{сд}}'' = \frac{n \cdot E_{\text{сд}}'' \cdot I_{2.\text{ном}}}{x_{\text{д}}''} = \frac{2 \cdot 1,08 \cdot 0,043}{0,129} = 0,72 \text{ кА};$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		46

де n – кількість синхронних двигунів;

E''_{*cd} – надперехідна ЕРС СД:

$$E''_{cd*} = \sqrt{(U_{*(0)} \cos \varphi_1)^2 + (U_{*(0)} \sin \varphi_1 + I_{*(0)} x''_{*d})^2} = \sqrt{(1 \cdot 0,8118)^2 + (1 \cdot 0,584 + 1 \cdot 0,129)^2} = 1,08$$

x''_{*d} – повздовжній надперехідний опір СД:

$$x''_{*d} = \frac{1}{I_{n*}} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{п*}}{I_{п*}} \right)^2} = \frac{1}{7,6} \sqrt{1 - \left(\frac{1,5}{7,6} \right)^2} = 0,129;$$

$I_{2ном}$ – номінальний струм СД:

$$I_{2.ном} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{ном} \cdot \eta} = \frac{0,695}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,94} = 42,7 \text{ А.}$$

Ударний коефіцієнт СД визначаємо за кривими [7, 8], $k_{уд} = 1,91$. Ударний струм у місці КЗ від СД

$$i_{уд.сд} = \sqrt{2} k_{уд.сд} \cdot I''_{сд} = \sqrt{2} \cdot 1,91 \cdot 0,72 = 1,97 \text{ кА.}$$

Сумарні струми КЗ у відповідних розрахункових точках:

$$I''_{1\Sigma} = I''_1 + I''_{сд} = 8,58 + 0,72 = 9,3 \text{ кА}; \quad I''_{10\Sigma} = I''_{10} + I''_{сд} = 8,56 + 0,72 = 9,28 \text{ кА};$$

$$I''_{11\Sigma} = I''_{11} + I''_{сд} = 8,52 + 0,72 = 9,24 \text{ кА}; \quad I''_{12\Sigma} = I''_{12} + I''_{сд} = 8,20 + 0,72 = 8,92 \text{ кА};$$

$$i_{1.уд\Sigma} = i_1 + i_{уд.сд} = 12,66 + 1,97 = 14,63 \text{ кА}; \quad i_{10.уд\Sigma} = i_{10} + i_{уд.сд} = 12,63 + 1,97 = 14,6 \text{ кА};$$

$$i_{11.уд\Sigma} = i_{11} + i_{уд.сд} = 12,57 + 1,97 = 14,54 \text{ кА}; \quad i_{12.уд\Sigma} = i_{12} + i_{уд.сд} = 12,07 + 1,97 = 14,04 \text{ кА.}$$

Таблиця 6.1 – Розрахунок струмів КЗ у мережі 10 кВ заводу

Точка КЗ	$r_{0.кл},$ Ом/км	$x_{0.кл},$ Ом/км	$l,$ км	$r_{кл},$ В.О.	$x_{кл},$ В.О.	$r_{рез},$ В.О.	$x_{рез},$ В.О.	$z_{рез},$ В.О.	$T_a,$ с	k_y	$I'',$ кА	$i_{уд},$ кА	$I''_{\Sigma},$ кА	$i_{\Sigma уд},$ кА
K_1	0,0645	0,0375	1,000	0,585	0,340	0,585	6,310	6,337	0,0032	1,043	8,68	12,79	9,40	14,76
K_2	0,443	0,086	0,220	0,884	0,172	1,469	6,482	6,646	0,0031	1,040	8,27	12,17	8,99	14,14
K_3	0,443	0,086	0,220	0,884	0,172	1,469	6,482	6,646	0,0031	1,040	8,27	12,17	8,99	14,14
K_4	0,206	0,079	0,170	0,318	0,122	0,903	6,432	6,495	0,0032	1,042	8,47	12,47	9,19	14,44
K_5	0,326	0,083	0,110	0,325	0,083	0,910	6,393	6,458	0,0032	1,042	8,51	12,55	9,23	14,52
K_6	0,443	0,086	0,040	0,161	0,031	1,071	6,424	6,513	0,0031	1,041	8,44	12,43	9,16	14,40
K_7	0,206	0,079	0,050	0,093	0,036	0,678	6,346	6,382	0,0032	1,042	8,62	12,70	9,34	14,67
K_8	0,326	0,083	0,135	0,399	0,102	1,078	6,448	6,537	0,0031	1,041	8,41	12,39	9,13	14,36
K_9	0,443	0,086	0,060	0,241	0,047	1,319	6,495	6,627	0,0031	1,041	8,30	12,21	9,02	14,18
K_{10}	0,206	0,079	0,020	0,037	0,014	0,622	6,325	6,355	0,0032	1,043	8,65	12,76	9,37	14,73
K_{11}	0,326	0,083	0,030	0,089	0,023	0,711	6,347	6,387	0,0032	1,042	8,61	12,69	9,33	14,66
K_{12}	0,443	0,086	0,185	0,743	0,144	1,454	6,492	6,653	0,0031	1,040	8,27	12,16	8,99	14,13

									Арк.	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата						
									47	

6.2 Вибір кабельних ліній

Виконаємо вибір кабельних ліній КЛ-1 і КЛ-2, за допомогою яких завод приєднується до енергосистеми.

Розрахунковий струм у КЛ становить

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{14411,1}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 396,2 \text{ А.}$$

Попередньо приймаємо до прокладання дві паралельні кабельні лінії, кожна з яких виконана трьома одножильними кабелями з алюмінієвими жилами (А), ізоляцією зі зшитого поліетилену (Пв) та посиленою поліетиленовою оболонкою (Пу): АПвЕгПу-10-(1×300). Тривало допустиме струмове навантаження однієї кабельної лінії становить $I_{доп} = 414 \text{ А}$ [9, 10], а втрати потужності $\Delta P_{кз} = 51,4 \text{ кВт/км}$.

Допустимий струм КЛ з урахуванням поправочних коефіцієнтів

$$I'_{доп} = k_{г.пр} \cdot k_{т.гр} \cdot k_{м.в} \cdot k_{в.гр} \cdot I_{доп} = 1,01 \cdot 1,04 \cdot 1,03 \cdot 0,9 \cdot 414 = 403,1 \text{ А.}$$

де $k_{г.пр}$ – поправочний коефіцієнт, що враховує глибину прокладання кабелю в ґрунті. Для глибини прокладання 0,9 м приймаємо $k_{г.пр} = 1,01$ з [9, 10];

$k_{т.гр}$ – поправочний коефіцієнт, що враховує температуру ґрунту на заданій глибині. Для температури ґрунту 15 °С у найтепліший місяць року (червень) приймаємо $k_{т.гр} = 1,04$ відповідно з [9, 10];

$k_{м.в}$ – поправочний коефіцієнт, що враховує міжфазну відстань між одножильними кабелями. За умови прокладання кабелів в одній площині, при міжфазній відстані 200 мм і транспозиції екранів приймаємо $k_{м.в} = 1,03$ згідно з [9, 10];

$k_{в.гр}$ – поправочний коефіцієнт, що враховує групове прокладання кабельних ліній. За відстані між групами кабелів 800 мм приймаємо $k_{в.гр} = 0,9$ з [10].

Перевіряємо вибрані кабельні лінії за умовою роботи в нормальному режимі:

$$I_p = 396,2 < I'_{доп} = 2 \cdot 403,1 = 806,2 \text{ А.}$$

Коефіцієнт завантаження однієї кабельної лінії в нормальному режимі роботи визначаємо за виразом:

$$k_3 = \frac{I_p}{n \cdot I'_{доп}} = \frac{396,2}{2 \cdot 403,1} = 0,49.$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		48

У післяаварійному режимі, при вимкненні однієї з паралельних КЛ, живлення електроприймачів забезпечується кабельною лінією, що залишилася в роботі. У цьому випадку умова допустимого струмового навантаження має вигляд:

$$I'_{\text{доп}} = 2 \cdot 403,1 = 806,1 > I_{\text{па}} = 792,4 \text{ А.}$$

Отже, вибрані КЛ забезпечують живлення електроприймачів як у нормальному, так і в післяаварійному режимі роботи без перевантаження.

Перевірку кабелю АПвЕгПу-10-(1×300) на термічну стійкість виконуємо за еквівалентним струмом КЗ, приведеним до тривалості 1 с [9, 10]:

$$I_{\text{т.доп}} = \frac{I_{1\text{с}}}{\sqrt{t_{\text{від}}}} = \frac{28,2}{\sqrt{2,1}} = 19,46 \text{ кА};$$

де I_1 – допустимий струм короткого замикання кабелю тривалістю 1 с за початкової температури алюмінієвої жили 60 °С.

З урахуванням двох паралельних кабельних ліній допустимий термічний струм для однієї фази становить:

$$I'_{\text{т.доп}} = 2 \cdot 19,46 = 38,9 \text{ кА.}$$

Перевіряємо умову термічної стійкості:

$$I'' = 9,3 < I'_{\text{т.доп}} = 38,9 \text{ кА.}$$

Отже, попередньо вибрані дві паралельні кабельні лінії, кожна з яких виконана трьома одножильними кабелями АПвЕгПу-10-(1×300), задовольняють умову термічної стійкості та можуть бути прийняті до подальшого розгляду.

Попередній вибір типу оболонки та перерізу КЛ, якими живляться цехові трансформаторні підстанції, було виконано в р. 3.1 роботи, табл. 3.2. Тому далі виконуємо перевірку вибраних КЛ за умовою термічної стійкості до дії струму КЗ.

Мінімальний переріз жили кабелю, що відповідає умові термічної стійкості

$$F_{\text{min}} = \frac{1}{C} \sqrt{B_{\kappa}} = \frac{1}{100} \cdot \sqrt{47,1 \cdot 1000} = 68,6 \text{ мм}^2;$$

де B_{κ} – термічний імпульс струму короткого замикання

$$B_{\kappa} = I_{\text{п.о}}^2 (t_{\text{відк}} + T_{\text{а.1}}) = 9,3^2 (0,542 + 0,0031) = 47,1 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$t_{\text{відк}}$ – час вимкнення КЗ:

$$t_{\text{відк}} = t_{\text{в.ч}} + t_{\text{рз}} = 0,042 + 2,0 = 2,042 \text{ с};$$

$t_{\text{с.с}}$ – ступінь селективності, приймаємо 0,5 с.

Отже, для розподільчої мережі 10 кВ заводу приймаємо до прокладання кабелі, що мають перерізом струмопровідних жил не менше 70 мм².

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					49

6.3 Вибір високовольного електрообладнання

6.3.1. Вибір вимикачів

Розглянемо детальний вибір лінійного високовольного вимикача РУ 10 кВ живлячої ГЗП. Попередньо приймаємо високовольний вакуумний вимикач типу ВР1-10-20/1000УЗ. Проводимо перевірку вибраного вимикача за такими умовами:

- напругою розподільної установки

$$U_{\text{уст}} = 10 \text{ кВ} = U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ};$$

- номінальним струмом

$$I_p = 396,2 \text{ А} < I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А};$$

- струмом післяаварійного режиму

$$I_{\text{па}} = 792,4 \text{ А} < I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А};$$

- вимикаючою здатністю симетричного струму відключення

$$I_{\text{пт}} \approx I'' = 9,2 \text{ кА} < I_{\text{вим.ном}} = 20 \text{ кА};$$

де $I_{\text{вим.ном}}$ – номінальний струм вимикання високовольного вимикача, кА;

- можливістю відключення аперіодичної складової струму КЗ:

$$i_{\text{ат}} = 4,6 \text{ кА} < i_{\text{а.ном}} = 8,5 \text{ кА},$$

$i_{\text{ат}}$ – аперіодична складова струму КЗ для моменту часу τ

$$i_{\text{а.}\tau} = \sqrt{2} I'' \cdot e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 9,21 \cdot e^{-0,052/0,005} = 4,6 \text{ кА};$$

τ – мінімальний час від початку КЗ до моменту розмикання дугогасних контактів вимикача:

$$\tau = t_{\text{з.мін}} + t_{\text{в.ч.в}} = 0,01 + 0,042 = 0,052 \text{ с};$$

$t_{\text{з.мін}}$ – мінімальний час дії РЗ, приймаємо 0,01 с;

$t_{\text{в.ч.в}}$ – власний час відключення вимикача, не більше 42 мс [4];

$i_{\text{а.ном}}$ – номінальне значення аперіодичної складової струму КЗ вимикача

$$i_{\text{а.ном}} = \sqrt{2} \frac{\beta_n}{100} I_{\text{вим.ном}} = \sqrt{2} \cdot \frac{33\%}{100} \cdot 20 = 8,5 \text{ кА},$$

β_n – нормований вміст аперіодичної складової, %;

- електродинамічною стійкістю:

$$I'' = 9,21 \text{ кА} < I_{\text{п.0}} = 20 \text{ кА};$$

$$i_{\text{уд}} = 23,7 \text{ кА} < i_{\text{дин}} = 52 \text{ кА};$$

$I_{\text{п.0}}$ – діюче значення періодичної складової струму КЗ у момент часу $\tau = 0$, кА;

					Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	

$i_{уд}$ – ударний струм на шинах 10 кВ РУ ГЗП енергосистеми

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} \cdot I'' = \sqrt{2} \left(1 + e^{\frac{0,01}{0,05}} \right) 9,21 = 23,7 \text{ кА};$$

- термічною стійкістю:

$$B_k = 177,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} < I_{т.ном}^2 \cdot t_{т.н} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

B_k – термічний імпульс

$$B_k = I''^2 (t_{відк} + T_a) = 9,21^2 \cdot (2,042 + 0,05) = 177,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

$I_{т.ном}$ – середньоквадратичне значення струму вимикача за час його протікання $t_{т.ном}$ кА.

Отже, вакуумний вимикач типу ВР1-10-20/1000УЗ відповідає умовам вибору за номінальною напругою, тривалим робочим струмом, вимикаючою здатністю, електродинамічною та термічною стійкістю. Отже, вимикач ВР1-10-20/1000УЗ приймаємо до встановлення в РУ-10 кВ ГЗП.

Окремий вибір ввідних вимикачів ЦРУ-10 кВ заводу не проводиться, оскільки їх струмові навантаження менші порівняно зі навантаженням вимикачів РУ-10 кВ ГЗП, а значення струмів КЗ на шинах ЦРУ-10 кВ та РУ-10 кВ ГЗП практично однакові. Тому для ввідних приєднань ЦРУ-10 кВ приймаємо вакуумні вимикачі типу ВР1-10-20/1000УЗ.

Вибір секційного вимикача ЦРУ 10 кВ проводимо за аналогічною методикою, порядок вибору представлено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Вибір секційного вимикача ЦРУ 10 кВ заводу

Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_p = 396,2 \text{ А}$	$I_{ном} = 630 \text{ А}$
$I_{па} = 396,2 \text{ А}$	$I_{ном} = 630 \text{ А}$
$I_{пт} \approx I'' = 9,3 \text{ кА}$	$I_{вим.ном} = 20 \text{ кА}$
$i_{a.т} = \sqrt{2} I'' e^{-\tau/T_a}$ $= \sqrt{2} \cdot 9,3 \cdot e^{-0,052/0,0032} \approx 0 \text{ кА}$	$i_{a.ном} = \sqrt{2} (1 + \beta_n) I_{дин}$ $= \sqrt{2} (1 + 0,33) 20 = 36,8 \text{ кА}$
$I'' = 9,41 \text{ кА}$	$I_{дин} = 20 \text{ кА}$
$i_{уд} = 14,6 \text{ кА}$	$i_{дин} = 52 \text{ кА}$
$B_k = I''^2 (t_{відк} + T_a) =$ $= 9,3^2 (1,542 + 0,0032) = 133,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{н.т}^2 \cdot t_{т.н} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

де t_B – повний час відключення секційного вимикача:

$$t_B = t_{B.ч} + t_{рз.мах} = 0,042 + 1,5 = 1,542 \text{ с.}$$

У цілому, попередньо вибраний вимикач ВР1-10-20/630У3 відповідає всім умовам вибору, отже приймається до встановлення.

Окремий вибір лінійних вимикачів ЦРУ 10 кВ заводу не проводився, оскільки режим роботи їх легший ніж секційного вимикача, крім того ВР1-10-20/630У3 йде першим у каталозі, тому приймаємо його у якості лінійного.

6.3.2 Вибір високовольтних запобіжників

Вибір запобіжників проводиться за конструктивним виконанням, номінальною напругою, номінальним струмом, струмом плавкої вставки, номінальною вимикаючою здатністю та умовами встановлення.

Попередньо приймаємо до встановлення запобіжник серії ПКТ103-10 з номінальним струмом патрона.

Попередньо вибираємо, запобіжник серії ПКТ103-10 з номінальним струмом патрона $I_{п.ном} = 100 \text{ А}$ та струмом плавкої вставки $I_{п.вс} = 80 \text{ А}$.

Перевірка вірності вибору запобіжника представлено в табл. 6.3.

Розрахунковий струм:

$$I_p = \frac{S_{p.тп1}}{n\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1391,2}{2\sqrt{3} \cdot 10} = 40 \text{ А.}$$

Післяаварійний струм запобіжника

$$I_{па} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1396,4}{\sqrt{3} \cdot 10} = 80 \text{ А.}$$

де S_p – розрахункова потужність споживачів ТП №1, кВ·А.

Таблиця 6.3 – Вибір запобіжників

Розрахункові параметри	Каталожні дані
$U_{дій} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{макс} = 12 \text{ кВ}$
$I_p = 40 \text{ А}$	$I_{пв.ном} = 80 \text{ А}$
$I_{мах} = 80, \text{ А}$	$I_{пв.ном} = 80 \text{ А}$
$I'' = 10,0 \text{ кА}$	$I_{вим.ном} = 12,5 \text{ кА}$

Отже, запобіжник типу ПКТ103-10 з номінальним струмом патрона 100 А, струмом плавкої вставки 80 А та граничним струмом вимкнення 12,5 кА відповідає умовам вибору, тому приймається до встановлення.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		52

6.3.3 Вибір вимикачів навантаження

Вибір вимикачів навантаження виконано за номінальною напругою, номінальним струмом, струмом відключення навантаження, термічною та електродинамічною стійкістю, а також за умовами встановлення.

Попередньо приймаємо до розгляду вимикач типу ВНР-10/400-10зУЗ. Вибір вимикача навантаження представлено у табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Вибір вимикача навантаження

Розраховані параметри	Каталожні характеристики
$U_{\text{дій}} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{\text{max}} = 12 \text{ кВ}$
$I_p = 40 \text{ А}$	$I_{\text{відкл.ном}} = 400 \text{ А}$
$I_{\text{па}} = 80 \text{ А}$	$I_{\text{max}} = 800 \text{ А}$
$i_{\text{уд}} = 14,8 \text{ кА}$	$i_{\text{дин.ном}} = 25 \text{ кА}$
$B_k = I^2 (t_b + T_a) = 9,3^2 (0,008 + 0,0032) = 1 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k = I_{\text{н.т}}^2 \cdot t_{\text{т.н}} = 10^2 \cdot 1 = 100 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

де $I_{\text{відкл.ном}}$ – номінальний струм відключення, А; t_b – середній час спрацювання запобіжника, приймаємо 0,008 [4, 5].

Отже, вимикач навантаження типу ВНРп-10/400-10зУЗ відповідає умовам вибору та перевірки, з огляду на це приймається до встановлення.

6.3.4. Вибір трансформаторів власних потреб

До категорії найбільш критичних споживачів у системі власних потреб ЦРУ 10 кВ належать ланцюги оперативного струму, апаратура телемеханіки та зв'язку, а також мережі аварійного освітлення.

Оскільки сумарне електроспоживання цих систем є відносно невеликим, живлення для них організовують від низьковольтної мережі 0,4 кВ. Джерелом напруги у цьому випадку слугують спеціальні знижувальні трансформатори – трансформатори власних потреб (ТВП).

Потужність ТВП розраховується на базі сумарного навантаження споживачів. Під час обчислень обов'язково беруться до уваги коефіцієнти одночасної роботи та фактичного завантаження приладів.

Розподільні установки, що працюють без постійного оперативного персоналу комплектуються двома трансформаторами власних потреб, потужність кожного з яких визначається з умови:

$$S_{\text{тр.ном}} \geq S_p;$$

де S_p – розрахункове навантаження, кВА.

Розрахунок навантаження власних потреб ЦРУ заводу виконано у табл. 6.5.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		53

Таблиця 6.5 – Навантаження власних потреб ЦРУ 10 кВ заводу

Споживач	Встановлена потужність ЕП, кВт		cosφ	Сумарна потужність	
	одиниці	сумарна		$P_{\text{вп}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{вп}}, \text{квар}$
Обігрів шаф КРУ	1×18	18	1,0	18	0,0
Обігрів шаф РЗА	1×18	18	1,0	18	0,0
Обігрів, освітлення, венти- ляція приміщення ЗРУ	—	7	1,0	7	0,0
Споживання оперативними колами	—	2	1,0	2,0	0,0
Всього				45,0	0

Розрахункове навантаження ТВП:

$$S_{\text{вп.р}} = k_{\text{п}} \sqrt{P_{\text{вп}}^2 + Q_{\text{вп}}^2} = 0,8 \sqrt{45^2 + 0^2} = 36 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

де $k_{\text{с}}$ – коефіцієнт попиту, приймаємо 0,8.

Отже, приймаємо до встановлення трансформатори ТМ-40/10:

$$S_{\text{тр.ном}} = 40 > S_{\text{р}} = 36 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

6.3.5 Вибір трансформаторів струму

Вибір трансформаторів струму (ТС) лінійної комірки розподільного пристрою 10 кВ ГЗП енергосистеми здійснюється за такими параметрами: номінальна напруга, струм первинного кола, вторинне навантаження у відповідному класі точності – з подальшою перевіркою на динамічну та термічну стійкості.

Попередньо вибираємо до розгляду трансформатор струму серії ТЛК-10/1000. Перевірка правильності попереднього вибору проведено у табл. 6.6.

У табл. 6.6 представлені наступні параметри

Z_2 – вторинне навантаження ТС, приймаємо $Z_2 = r_2$.

Опір з'єднувальних проводів (попередньо):

$$r'_{\text{пров}} = Z_{2\text{ном}} - r_{\text{прил}} - r_{\text{кон}} = 0,4 - 0,006 - 0,05 = 0,344 \text{ Ом};$$

$r_{\text{прил}}$ – опір приладів приєднаних увімкнених у коло ТС:

$$r_{\text{прил}} = S_{\text{прил}} / I_{2\text{ном}}^2 = 0,15 / 5^2 = 0,006 \text{ Ом};$$

де $r_{\text{кон}}$ – опір контактів, приймаємо 0,05 Ом (приладів менше чотирьох);

$S_{\text{прил}}$ – споживана вимірювальними приладами потужність, В · А (табл. 6.7).

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					54

Таблиця 6.6 – Вибір трансформатору струму лінійної комірki ПС енергосистеми

Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
$I_p = 396,3 \text{ А}$	$I_{1.ном} = 1000 \text{ А}$
$I_{па} = 792,6 \text{ А}$	$I_{1.ном} = 1000 \text{ А}$
Клас точності 0,5S	0,5S
$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} \cdot I'' = \sqrt{2} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,05}} \right) 9,21 = 23,7 \text{ кА}$	$i_{дин} = 81 \text{ кА}$
$B_k = I''^2 (t_{відк} + T_a) = 9,21^2 \cdot (2,042 + 0,05) = 177,5$	$B_k = I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 31,5^2 \cdot 3 = 2978, \text{кА}$
$Z_2 = 0,129 \text{ Ом}$	$Z_{2ном} = 0,4 \text{ Ом}$

Таблиця 6.7 – Вторинне навантаження ТС лінійної комірki ПС енергосистеми

Прилад	Тип	Навантаження фази, В·А		
		А	В	С
Амперметр	Е-377	0,1	-	0,1
Лічильник електроенергії	NIK 2307 ART.102.0.15	0,05	-	0,05
Всього		0,15	-	0,15

Переріз з'єднувальних проводів (попередньо):

$$s' = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{роз}}{r'_{пров}} = \frac{0,0175 \times 10,4}{0,338} = 0,54 \text{ мм}^2;$$

де l – довжина монтажних проводів:

$$l = \sqrt{3} \cdot l_{роз} = \sqrt{3} \cdot 6 = 10,4 \text{ м};$$

Згідно ПУЕ умовою міцності струмопровідних кіл приймаємо $s = 2,5 \text{ мм}^2$.

Отже, опір монтажних проводів складе

$$r_{пр} = \frac{\rho \cdot l_{роз}}{s_{пров}} = \frac{0,0175 \cdot 10,4}{2,5} = 0,073 \text{ Ом};$$

Остаточне вторинне навантаження трансформатора струму:

$$Z_2 = r_{пр} + r_{прил} + r_k = 0,073 + 0,006 + 0,05 = 0,129 \text{ Ом}.$$

Таким чином, трансформатор струму ТЛК-10-3/1000 відповідає всім критеріям вибору тому приймаємо його до встановлення.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					55

Процедура підбору ТС для шаф ЦРУ 10 кВ заводу здійснюється за аналогічною методикою. У кожній ввідній комірці передбачено встановлення лічильників NIK 2303 ARPT.120.0.15 для технічного обліку електроенергії, а також амперметрів типу Е-377. Сумарно ці прилади створюють фазне навантаження опором 0,129 Ом на вторинні кола ТС кожної комірки, аналогічно до приладів лінійних комірок 10 кВ ПС енергосистеми.

Вибір трансформаторів струму для всіх комірок ЦРУ 10 кВ представлено у вигляді табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Вибір трансформаторів струму ЦРУ заводу 10 кВ

Умова вибору	Од. вим.	Місце встановлення ТС			
		Ввідні шафи	Секційний вимикач	Лінійні шафи (КЛ 11-14, 19,20)	Лінійні шафи (КЛ 3,4, 12,14)
$U_{уст} < U_{ном}$	кВ	$10,0 < 10,0$	$10,0 < 10,0$	$10,0 < 10,0$	$10,0 < 10,0$
$I_p < I_{ном}$	А	$396,2 < 800$	$396,2 < 400$	$128,6 < 300$	$41 < 50$
$I_{ав} < I_{ном}$	А	$792,4 < 800$	$396,2 < 400$	$257,2 < 300$	$41 < 50$
Клас точності	-	1,0	1,0	1,0	1,0
$i_{уд} < i_{дин}$	кА	$23,7 < 81$	$14,63 < 81$	$14,63 < 52$	$14,63 < 52$
$B_{к.р} < B_{к.н}$	кА ² ·с	$184 < 31.5^2 \cdot 3 = 2977$	$133,6 < 2977$	$48,3 <$	$48,3 < 10^2 \cdot 3 = 300$
$Z_2 < Z_{ном}$	Ом	$0,129 < 0,6$	$0,127 < 0,6$	$0,129 < 0,6$	$0,129 < 0,6$
Тип ТС		ТЛК-10-3/800/5	ТЛК-10-3/400/5	ТЛК-10-3/300/5	ТЛК-10-2/50/5

6.3.6. Вибір трансформаторів напруги

Перелік контрольно-вимірювальних приладів, що підлягають установці в розподільному пристрої 10 кВ заводу визначено з урахуванням рекомендацій [1, 9, 10]. Оскільки передбачається оснащення ЦРУ 10 кВ комірками серії КУ-10Ц, для роботи в їхньому складі приймаємо до перевірки трансформатори напруги (ТН) типу НАМІ-10.

Розрахунок повного вторинного навантаження на ТН зведено у табл. 6.9, а вибір представлено в табл. 6.10.

Таблиця 6.9 – Вторинне навантаження ТН

Прилад	Тип	S, В·А	Кількість приладів	Загальна споживана потужність, В·А
Лічильник електроенергії	NIK 2303 ARPT.120.0.15	4	6	24
Вольтметр	Е377	2	1	2
Всього				26

Таблиця 6.10 – Вибір трансформатора напруги 10 кВ

Умова вибору	Од. вим.	Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{уст} \leq U_{ном}$	кВ	$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$
Схема з'єднань	-	$Y_0/Y_0/\Delta_0$	$Y_0/Y_0/\Delta_0$
Клас точності	-	1,0	1,0
$S_p \leq S_{ном}$	В·А	$S_p = 26$	$S_{ном} = 150$

Як свідчать результати перевірки, попередньо обраний трансформатор напруги повністю відповідає всім технічним вимогам. З огляду на це, приймаємо його до встановлення НАМІ-10-66УЗ.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		57

7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. «ЕЛЕКТРОЗБЕРЕЖЕННЯ В НАСОСНИХ УСТАНОВКАХ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ»

7.1 Вступ

Сучасний етап розвитку світової та вітчизняної економіки нерозривно пов'язаний із вирішенням проблем енергозбереження та підвищення енергоефективності. Зростання вартості енергоресурсів, виснаження традиційних джерел енергії та погіршення екологічної ситуації зумовлюють нагальну потребу в оптимізації процесів споживання електричної енергії в усіх галузях промисловості. За статистичними даними, на частку електроприводів припадає понад 60% усієї виробленої у світі електроенергії, причому значну частину цього обсягу (від 20% до 30%) споживають саме турбомеханізми – насоси, вентилятори та компресори.

У системах водопостачання, водовідведення, тепlopостачання та в різноманітних технологічних процесах насосні установки є основними споживачами електричної енергії. Історично склалося так, що більшість цих установок проектувалася з орієнтацією на максимальне (пікове) навантаження, яке в реальних умовах експлуатації виникає лише протягом короткого проміжку часу. В інший час насоси працюють в умовах недовантаження, а їхня продуктивність регулюється традиційними, вкрай неефективними методами – за допомогою дроселювання (часткового перекриття напірної засувки) або байпасування перепуску частини рідини назад у всмоктувальний трубопровід). При дроселюванні електродвигун насоса продовжує споживати з мережі потужність, близьку до номінальної, а надлишкова енергія просто розсіюється у вигляді гідравлічних втрат (нагрівання рідини, підвищений знос запірної арматури). Такий підхід призводить до колосальних втрат електроенергії, які в масштабах країни вимірюються мільярдами кіловат-годин щорічно.

Саме тому перехід від нерегульованого електропривода з механічним регулюванням потоку до систем із частотно-регульованим приводом (ЧРП) є одним із найважливіших стратегічних напрямків енергозбереження. Застосування перетворювачів частоти дозволяє плавно змінювати продуктивність насоса відповідно до реальної потреби технологічного процесу, зводячи гідравлічні втрати до мінімуму і забезпечуючи економію електроенергії на рівні 30–50%.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		58

7.2 Специфіка роботи насосів машинобудівних заводів

Насосні агрегати за потужністю ділять на три групи: великі агрегати, потужністю понад 500 кВт; промислові агрегати та насосні станції централізованого водопостачання, потужністю 50-300 кВт; масові установки потужністю 2-50 кВт, до яких належать насоси з подачею 12-1000 м³/год і напором 20-80 м вод. ст. [10]. Насоси малої та середньої потужності є найбільш масовим сегментом насосного обладнання. Незважаючи на порівняно невелику одиничну потужність, їх сумарна кількість на машинобудівних заводах є істотною, що робить їхній сукупний внесок у загальне енергоспоживання надзвичайно вагомим.

Специфіка машинобудівних підприємств полягає в тому, що насосне обладнання тут інтегроване безпосередньо в технологічні процеси виготовлення, обробки та збирання деталей, а вимоги до роботи насосів диктуються робочими циклами верстатів, конвеєрів, спеціалізованих ліній і змінними графіками роботи цехів.

Насоси малої та середньої потужності застосовуються у таких технологічних процесах і системах заводів машинобудування:

- подачі мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). На ділянках механічної обробки (токарні, фрезерні, шліфувальні верстати з ЧПУ, обробні центри) відцентрові насоси забезпечують безперервну подачу МОР у зону різання. Витрата та тиск рідини повинні чітко відповідати режиму обробки: наприклад, чорнова обробка вимагає великого об'єму для відведення тепла, тоді як глибоке свердління чи чистова обробка вимагають стабільно високого тиску для ефективного вимивання стружки;

- гідравлічні преси та ковальсько-штампувальне обладнання. Насосні станції створюють робочий тиск у гідросистемах. Ці процеси характеризуються яскраво вираженою циклічністю: короткочасні піки максимального навантаження (робочий хід преса) чергуються з тривалими паузами на завантаження/вивантаження заготовок. При використанні нерегульованого приводу насос під час пауз працює в холосту, скидаючи надлишковий тиск через редуційні клапани, що призводить до нагрівання оливи та величезних втрат енергії;

- мийні станції та лінії знежирення. Перед збиранням, зварюванням або фарбуванням деталі обов'язково проходять очищення. Насоси тут подають спеціальні миючі розчини під тиском через форсунки. Оскільки габарити деталей та необхідний ступінь очищення змінюються залежно від партії, потреба в напорі та продуктивності мийної установки також є змінною;

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						59

- у фарбувальних камерах насоси забезпечують роботу систем гідрофільтрації (водяних завіс) для вловлювання часток фарби.

- локальне технологічне охолодження. Забезпечення циркуляції холодоагенту для охолодження індукційних та термічних печей, зварювальних порталів, а також систем змащування великих редукторів і прокатних станів.

У цілому, робота насосів на машинобудівних заводах характеризується «рваною» динамікою, що залежить від номенклатури деталей та поточного завантаження верстатного парку. Традиційне використання нерегульованих приводів із механічним дроселюванням потоку або використанням байпасних (перепускних) ліній у таких умовах є вкрай неефективним. Це не лише спричиняє значні перевитрати електроенергії, але й пришвидшує механічний знос обладнання, руйнування запірної арматури та піноутворення МОР.

7.3 Режими роботи насосів

Робота будь-якої насосної установки нерозривно пов'язана з трубопровідною мережею, на яку вона працює. Режим роботи насоса визначається точкою перетину двох характеристик: напірної характеристики самого насоса $H = f(Q)$ та характеристики гідравлічної мережі $H_c = f(Q)$. Складність експлуатації полягає в тому, що характеристика мережі або потреба у витраті рідини Q ніколи не буває постійною величиною.

Для промислового підприємства, зокрема машинобудівного, режим водоспоживання визначається графіком роботи виробництва, чисельністю персоналу за змінами, характером технологічних процесів і роботою допоміжних систем. За двозмінного режиму роботи добовий графік водоспоживання (рис. 7.1) має виражене зростання після 6:00, що пов'язано з підготовкою виробництва до роботи, санітарно-побутовим споживанням персоналу та запуском технологічного обладнання. Пік водоспоживання спостерігається у період I-ї зміни, приблизно з 8:00 до 11:00, після чого можливе незначне зниження, пов'язане з обідньою перервою або зменшенням інтенсивності окремих операцій. У другій половині дня, зокрема з 16:00 до 20:00, водоспоживання знову підвищене, але дещо нижчим, ніж у першій зміні. Після завершення основного виробничого процесу, орієнтовно після 20:00, споживання поступово зменшується. У нічний час, з 00:00 до 6:00, воно наближається до мінімального рівня і визначається переважно роботою чергових служб, залишковими технологічними потребами, підживленням окремих систем та фоновими витоками у мережі.

					Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	

Для кількісної оцінки нерівномірності водоспоживання використовують спеціальні коефіцієнти.

Коефіцієнт добової нерівномірності $k_{\text{доб}}$ враховує зміну споживання в різні дні тижня або сезони, а коефіцієнт годинної нерівномірності $k_{\text{год}}$ показує відношення максимальної годинної витрати до середньої за добу. Часто відношення максимальної витрати до мінімальної $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ може досягати значень 3:1, 4:1 і навіть більше.

Якщо в системі встановлено насос, розрахований на максимальну продуктивність Q_{max} без можливості регулювання швидкості, то в періоди спаду водоспоживання (наприклад, до $0,5Q_{\text{max}}$) тиск у магістралі різко зростає. Це пояснюється тим, що робоча точка зміщується вліво по характеристиці насоса в зону високих напорів. Наслідки такої роботи вкрай негативні:

- виникає значний надлишковий тиск, що призводить до розривів трубопроводів, пошкодження запірної арматури та сантехнічного обладнання у споживачів;
- різко зростають непродуктивні витоки води (об'ємні втрати) через нещільності з'єднань, оскільки витоки прямо пропорційні тиску в системі;
- насос споживає електроенергію на створення непотрібного напору, витрачаючи її марно.

З представленого типового графіку на рис .7.1 видно, що в режимі 100% навантаження насоси працює не більше 10% часу, тоді як основну частину часу (70-80%) він працює в зоні 70-90% від номінальної продуктивності. Цей факт є головним обґрунтуванням необхідності впровадження регульованого електропривода.

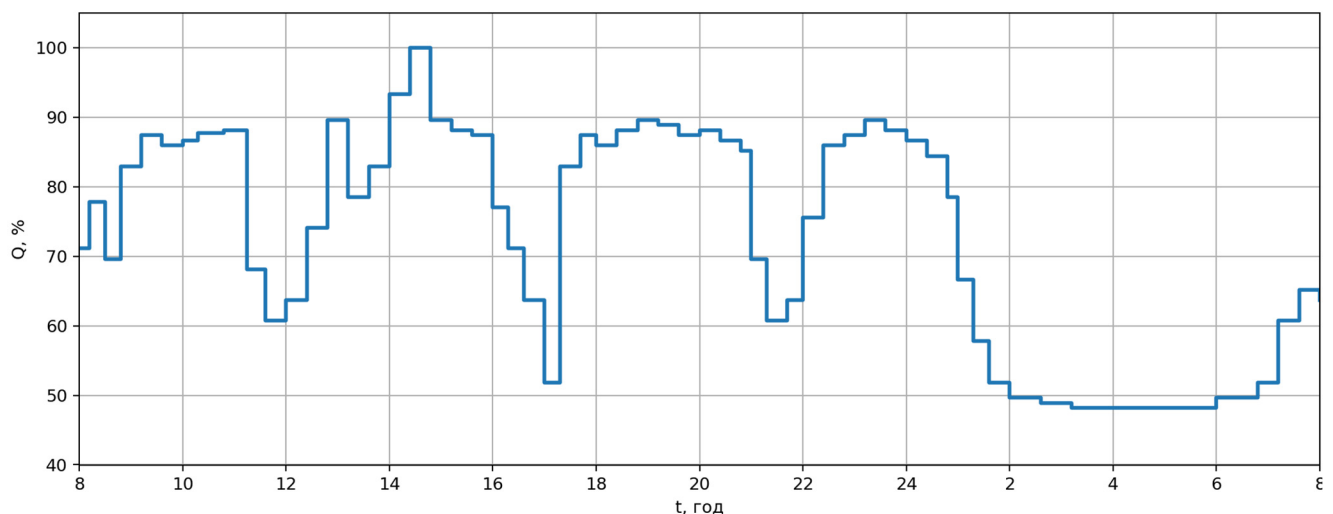


Рисунок 7.1 – Типовий добовий графік водоспоживання підприємства

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					61

7.4 Особливості роботи насосів при змінній частоті обертання

Зміна частоти обертання робочого колеса відцентрового насоса є найбільш термодинамічно та гідравлічно обґрунтованим способом регулювання його продуктивності. На відміну від штучного введення додаткового гідравлічного опору (дроселювання), зміна швидкості обертання призводить до зміни власних характеристик насоса, що безпосередньо впливає на всі його робочі параметри: подачу (витрату), напір, споживану потужність та ККД.

Перерахунок характеристик насоса з однієї частоти на іншу в ідеалізованих умовах здійснюється за допомогою законів аерогідродинамічної подібності, які в теорії лопатевих машин називаються формулами приведення. Якщо n_1 та n_2 – початкова та змінена частоти обертання робочого колеса відповідно, то основні робочі параметри змінюються за такими залежностями:

$$Q_1 / Q_2 = n_1 / n_2; \quad (7.1)$$

$$H_1 / H_2 = (n_1 / n_2)^2; \quad (7.2)$$

$$N_1 / N_2 \approx (n_1 / n_2)^3; \quad (7.3)$$

$$M_1 / M_2 \approx (n_1 / n_2)^3, \quad (7.4)$$

де Q – подача насоса; H – напір; N – споживана потужність на валу; M – крутний момент опору.

Рівність у формулах (7.3) та (7.4) є наближеною, оскільки при одночасній зміні подачі Q і напору H відбувається також зміна загального ККД насоса. Найважливішою з точки зору енергоефективності є кубічна залежність потужності (7.3). Вона показує, що навіть незначне зниження швидкості обертання веде до різкого падіння споживання електроенергії. Наприклад, якщо технологічний процес дозволяє знизити подачу на 20% ($Q_2 = 0,8Q_1$), то частота обертання також зменшиться до 80% ($n_2 = 0,8n_1$). Споживана потужність при цьому складе $N_2 = (0,8)^3 N_1 = 0,512N_1$, тобто знизиться майже на 49%.

Однак, слід зазначити, що формули приведення (7.1)–(7.4) можна застосовувати у чистому вигляді лише в окремих випадках: наприклад, при роботі одиночного насоса виключно на подолання динамічного опору трубопроводу. У реальних промислових системах, де присутній протитиск (геометрична висота підйому рідини або тиск у резервуарі), параметри насоса залежать не лише від його власної характеристики, але й від характеристики мережі, на яку він працює.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					62

Напірна характеристика відцентрового насоса при змінній частоті обертання описується квадратичною залежністю:

$$H = H_{\Phi} \left(n_2 / n_{\text{ном}} \right)^2 - S_{\Phi} Q^2, \quad (7.5)$$

де H_{Φ} і S_{Φ} – фіктивні параметри насоса (напір при нульовій подачі та внутрішній гідравлічний опір насоса); n_2 та $n_{\text{ном}}$ – поточне (змінне) і номінальне значення частоти обертання відповідно.

Аналіз рівняння (7.5) показує, що гідравлічні втрати в самому насосі $S_{\Phi} Q^2$ при одній і тій самій подачі не залежать від частоти обертання. Це означає, що при зміні швидкості напірні характеристики насоса залишаються подібними паралельними кривими, які лише зміщують своє положення по вертикалі в координатах Q - H .

Мережа трубопроводів, у свою чергу, описується характеристикою:

$$H_c = H_{\Pi} + S_c Q^2, \quad (7.6)$$

де H_{Π} – статична складова напору (протитиск), зумовлена роботою інших насосів або геометричним перепадом висот; S_c – гідравлічний опір мережі.

Перетин характеристик насоса (рис. 7.2) криві 1, 2, 3 при частотах n_1, n_2, n_3 з незмінною характеристикою трубопроводу (крива 4) визначає положення робочих точок (a_1, a_2, a_3). З графіка сумісної роботи видно, що робочі точки зміщуються по характеристиці мережі плавно, без виникнення зон надлишкового тиску, які є характерними для дроселювання.

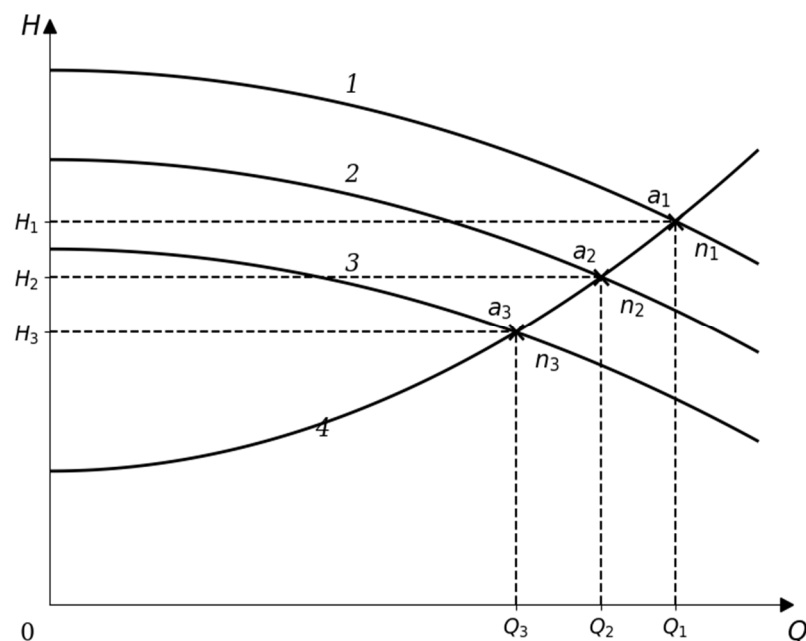


Рисунок 7.2 – Графік сумісної роботи насоса, що працює зі змінною частотою обертання, і трубопроводу

Оцінимо як фактично змінюється подача та потужність при наявності протитиску H_{Π} . Сумісним розв'язанням рівнянь (7.5) і (7.6) отримаємо залежність зміни подачі насоса від його частоти обертання:

$$Q = Q_6 \sqrt{\frac{(n / n_{\text{ном}})^2 - (H_{\Pi} / H_{\Phi})}{1 - (H_{\Pi} / H_{\Phi})}}, \quad (7.7)$$

де Q_6 – базисне значення подачі. У відносних одиницях це рівняння має вигляд:

$$Q^* = \sqrt{\frac{(n^*)^2 - H_{\text{і}}^*}{1 - H_{\text{і}}^*}}, \quad (7.8)$$

де $Q^* = Q / Q_6$, $n^* = n / n_{\text{ном}}$, $H_{\text{і}}^* = H_{\text{і}} / H_{\Phi}$.

Графіки на рис. 7.3 (згідно з рівнянням 7.8) доводять ключову тезу: прямо пропорційна залежність зміни подачі від частоти обертання ($Q \sim n$) спостерігається виключно при $H_{\Pi} = 0$. Чим більший статичний напір у системі, тим різкіше падає продуктивність насоса навіть при незначному зменшенні обертів.

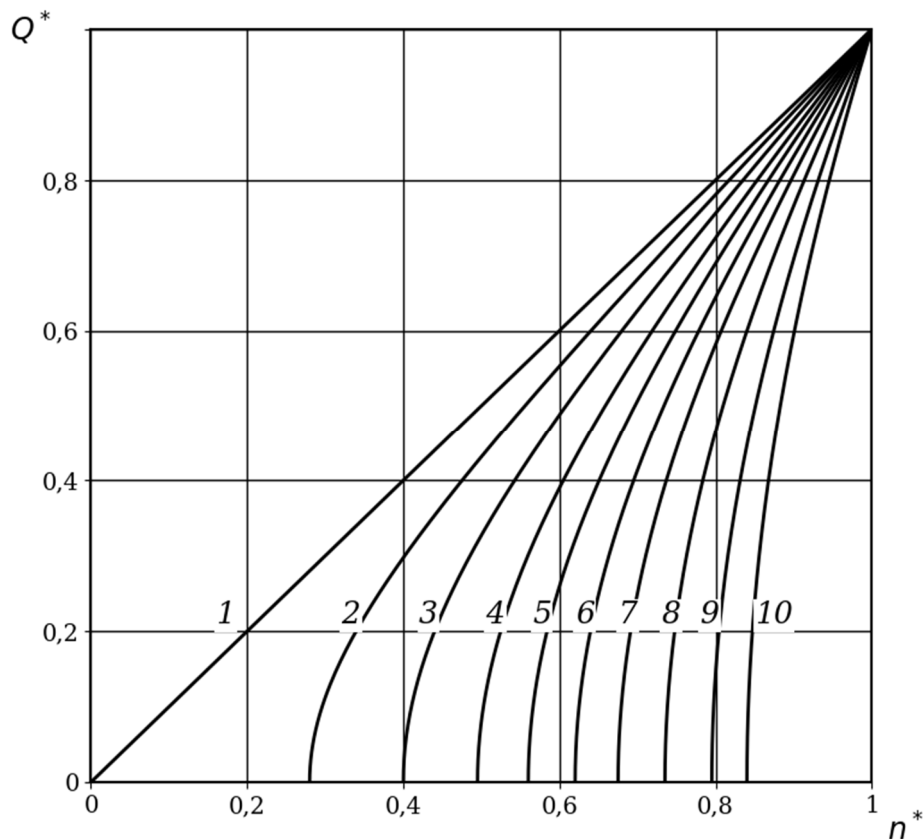


Рисунок 7.3 – Зміна подачі насоса залежно від частоти обертання при різних значеннях відносного статичного напору

Енергетичні показники приводу залежать від споживаної потужності. Потужність N пов'язана з моментом опору M_c виразом $M_c = 975 \frac{N}{n}$. Для оцінки реальної зміни потужності при регулюванні необхідно врахувати зміну ККД η . Зміна ККД насоса залежно від частоти обертання визначається за перетвореною формулою Муді:

$$\eta = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{НОМ}}}{(n^*)^{0.36}}, \quad (7.9)$$

Із (7.9) слідує, що при зниженні частоти обертання відносно номінальної, ККД насоса також зменшується, що вносить свої корективи у кінцеве значення спожитої електроенергії. Використовуючи залежності подачі, напору та ККД, отримуємо комплексний графік зміни відносної споживаної потужності N^* залежно від відносної швидкості обертання n^* для різних систем:

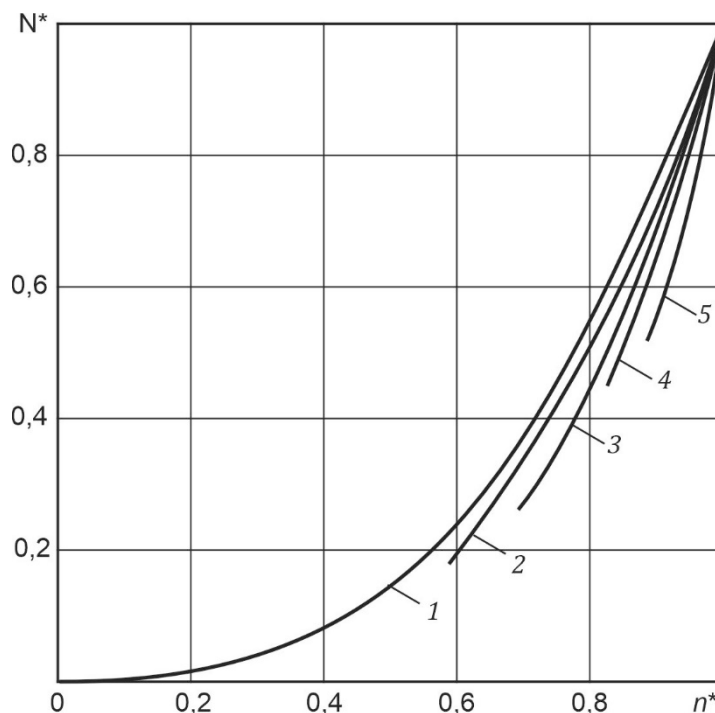


Рисунок 7.4 – Зміна споживаної насосом потужності в залежності від частоти обертання при різних значеннях H_{Π} / H_{Φ}

Графіки зміни потужності показують, що реальна залежність потужності від частоти обертання тим більше відрізняється від «ідеальної» кубічної параболи (7.3), чим більше відношення статичного напору до фіктивного (H_{Π} / H_{Φ}). Тільки в системах без статичного підйому рідини ($H_{\Pi} = 0$, крива 1 на рис. 7.11) потужність

строго пропорційна кубу частоти. Проте, навіть за наявності великого статичного напору (наприклад, крива 4, де $H_{\Pi} / H_{\Phi} = 0,64$), зменшення частоти обертання з 1.0 (номінал) до 0,8 призводить до падіння споживаної потужності N^* майже до рівня 0,4 (тобто на 60%). Ця обставина доводить, що при будь-яких параметрах трубопровідної мережі перехід на змінну частоту обертання гарантує істотне зниження споживання електроенергії порівняно з роботою двигуна на прямій мережі (50 Гц) з дроселюванням потоку засувкою, де потужність залишалася б на рівні 85-95% від номіналу.

Теоретичний аналіз механічних та напірних характеристик показує, що застосування регульованого електропривода формує нову, енергоефективну парадигму керування насосними установками. Неприпустимість розрахунку робочих параметрів шляхом простого перерахунку за формулами приведення (через наявність статичного напору мережі) не відмінює загального правила: усунення надлишкового напору ΔH , який неминуче виникає при дроселюванні, та зміщення робочої точки вниз по кривій опору мережі (паралельний зсув характеристики насоса $Q - H$, призводить до стрімкого, нелінійного падіння споживаного крутного моменту M_c і потужності N . Завдяки цьому забезпечується підтримання мінімально необхідного напору на виході насосної установки у всьому діапазоні зміни подачі, що зводить енергоспоживання насоса до можливого фізичного мінімуму.

7.5 Частотно-регульований електропривод з асинхронним двигуном

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна безпосередньо визначається частотою напруги мережі живлення. Відповідно, плавне регулювання швидкості найефективніше реалізується саме шляхом зміни частоти струму статора. Водночас обертальний момент на валу двигуна залежить від магнітного потоку в повітряному зазорі, який є прямо пропорційним напрузі живлення та обернено пропорційним її частоті. Це означає, що для збереження номінального навантажувального моменту при зміні швидкості, напруга має пропорційно адаптуватися до нової частоти. Тому для роботи асинхронного привода в режимі постійного моменту в широкому діапазоні швидкостей застосовують джерело живлення (перетворювач), здатне одночасно регулювати амплітуду напруги та частоту, підтримуючи незмінним відношення:

$$U/f = \text{const}, \quad (7.10)$$

де U – напруга мережі живлення; f – частота.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		66

Найбільш поширеним методом формування такої напруги є використання перетворювачів з проміжною ланкою постійного струму. Процес передбачає початкове перетворення мережевої змінної напруги 50 Гц у постійну за допомогою випрямляча, з подальшим її інвертуванням назад у змінну. Варто зазначити, що в сучасних топологіях як частота, так і діюче значення вихідної напруги регулюються безпосередньо інвертором за допомогою алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Базова структура частотно-регульованого привода включає некерований випрямляч, ланку постійного струму, автономний інвертор, електричну машину (асинхронну або синхронну) та мікропроцесорну систему керування. Для стабілізації випрямленої напруги, а також для зниження рівня вищих гармонік і згладжування пульсацій, у проміжній ланці обов'язково застосовуються дроселі та конденсаторні батареї (рис. 7.5).

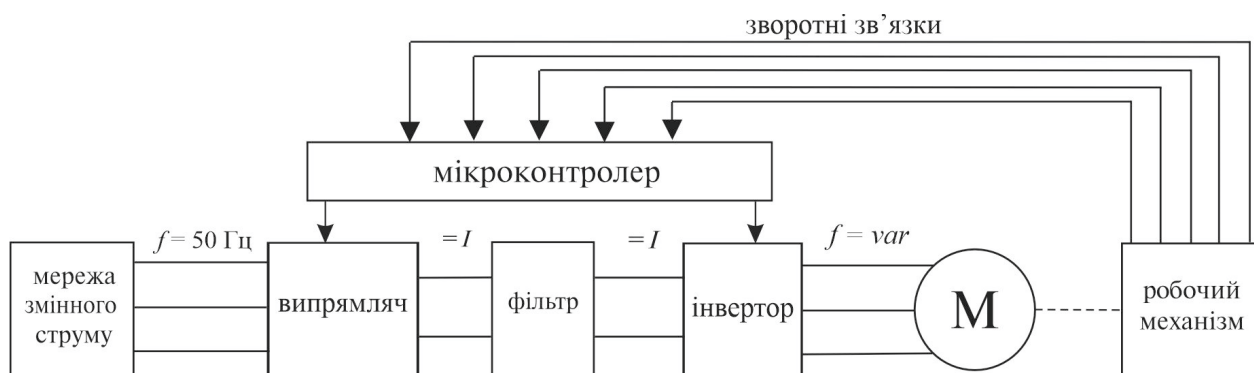


Рисунок 7.5 – Блок-схема частотно-регульованого привода

Сьогодні масове виробництво перетворювачів частоти для електроприводів на базі сучасних силових транзисторів (передусім, IGBT-модулів) освоєно практично всіма провідними електротехнічними корпораціями світу. Незважаючи на величезний асортимент існуючих на ринку моделей та їхнє функціональне розмаїття, побудова їхньої силової частини майже завжди базується на одній і тій самій класичній топології (рис. 7.6).

Представлена типова схема ПЧ працює за принципом подвійного перетворення електроенергії. Спочатку змінна напруга живлення через вхідний комутаційний апарат системи управління $КА$ надходить на трифазний мостовий некерований (нерегульований) випрямляч B , де перетворюється на постійну, після чого її пульсації ефективно згладжуються реакторами та конденсаторами LC фільтра Φ ланки постійного струму в ланці постійного струму. Звідти стабілізована напруга подається трифазний мостовий автономний інвертор напруги AIH із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), який за допомогою силових

напівпровідникових елементів формує на статорі двигуна *АД* змінну напругу із необхідними для регулювання швидкості амплітудою та частотою. Для безпечної зупинки привода передбачено блок динамічного гальмування, що розсіює надлишкову енергію генераторного режиму, запобігаючи небезпечному зростанню напруги на конденсаторах. Усім процесом керує система управління на базі мікроконтролера *МК*, яка через формувачі керуючих імпульсів *ФІ* задає алгоритм перемикання транзисторів інвертора, а також безперервно контролює стан обладнання через вузол захисту *ВЗ* для забезпечення надійної експлуатації.

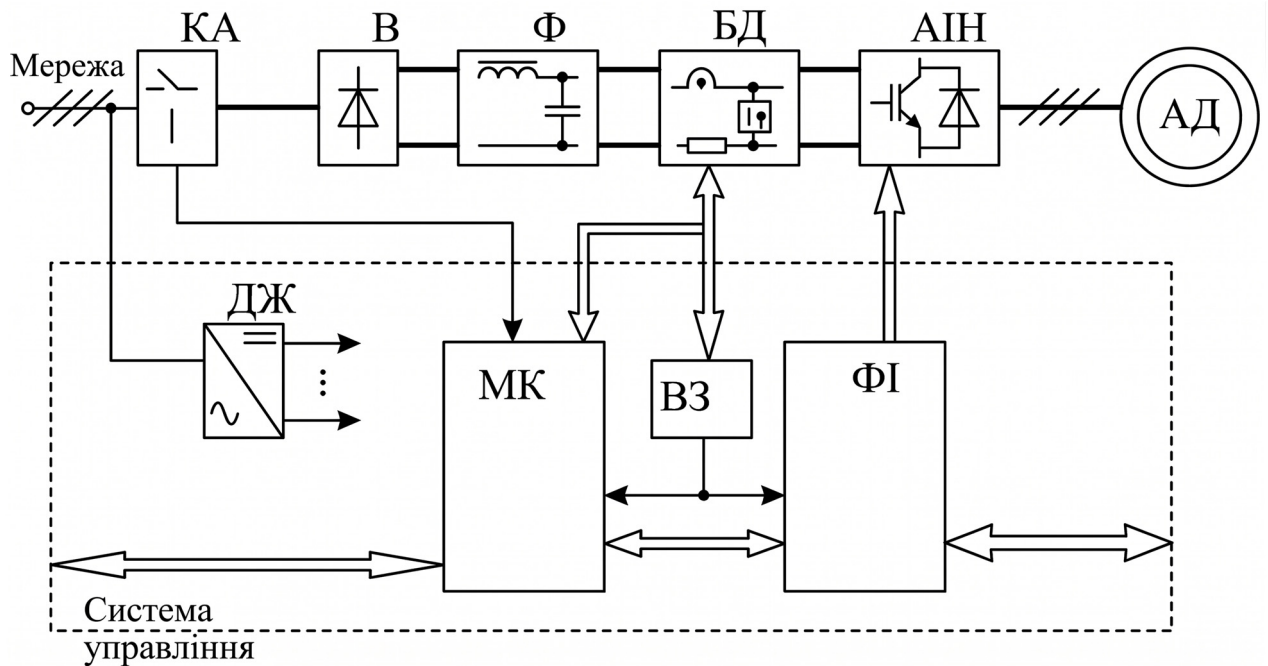


Рисунок 7.6 – Типова структурна схема ПЧ

Визначальний вплив на експлуатаційні характеристики сучасних перетворювачів частоти має їхня система керування – реалізовані математичні алгоритми (зокрема, векторне або скалярне керування) та мікропроцесорна база. Саме мікроконтролер формує динамічні та регульовальні показники привода, розширює його функціонал і забезпечує легку інтеграцію в комплексні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП).

Комплексна ефективність впровадження частотно-регульованого електропривода на базі IGBT-інверторів із мікропроцесорним керуванням забезпечує низку експлуатаційних переваг:

- суттєве енерго- та ресурсозбереження;
- розвантаження живлячої мережі за рахунок мінімізації споживання реактивної потужності (коефіцієнт потужності $\cos\phi$ наближається до одиниці);

- подовження терміну служби електродвигунів, а також механічного й гідравлічного обладнання (завдяки плавному пуску та усуненню ударних навантажень);
- глибоку автоматизацію та оптимізацію технологічних процесів (наявність вбудованих ПД-регуляторів, підтримка промислових мереж зв'язку);
- інтелектуальну обробку аварійних ситуацій, включаючи безпечне відключення та функцію автоматичного повторного включення (АПВ); дотримання норм електромагнітної сумісності (ЕМС) та придушення індустриальних перешкод (завдяки застосуванню ЕМС-фільтрів та мережевих дроселів);
- багаторівневий швидкодіючий захист двигуна та перетворювача від перевантажень, струмів короткого замикання та неприпустимих коливань напруги;
- ефективну реалізацію різних режимів гальмування (наприклад, динамічне гальмування або рекуперація енергії в мережу).

Варто зазначити, що кожна з цих задач може мати декілька технічних рішень, які визначають специфіку схемотехнічного та апаратного виконання силової частини конкретної моделі перетворювача.

Провідні світові виробники електротехніки пропонують спеціалізовані серії перетворювачів частоти, оптимізовані саме для керування відцентровими насосами у загальнопромисловому виконанні. Наприклад, компанія Danfoss випускає визнану на ринку лінійку VLT AQUA Drive FC 202, яка має потужні вбудовані функції каскадного керування та надійний захист від сухого ходу. У корпорації АВВ для подібних завдань створена серія ACQ580, спеціально орієнтована на інфраструктуру водопостачання та водовідведення. Schneider Electric пропонує для цих цілей лінійку Altivar Process (зокрема ATV630), що забезпечує глибоку інтеграцію в системи автоматизації рідинних процесів, а Siemens успішно впроваджує серію SINAMICS G120X. Важливою перевагою всіх цих пристроїв є те, що вони вже «з коробки» містять готові програмні макроси для відцентрових насосів (ПД-регулювання тиску, режим сну, очищення робочого колеса), що суттєво скорочує час на їх налаштування та введення в експлуатацію.

7.6 Електрозбереження в насосних установках за допомогою ЧРП

Енергетична ефективність насосної установки визначається загальним ККД:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{пч}}, \quad (7.11)$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						69

де η_n – ККД насоса; $\eta_{дв}$ – ККД асинхронного електродвигуна; $\eta_{п}$ – ККД механічної передачі (якщо двигун з'єднаний з валом насоса напряму через співвісну муфту, зазвичай приймають $\eta_{п} \approx 1$); $\eta_{пч}$ – ККД перетворювача частоти.

Застосування ПЧ дещо знижує ККД самого електроприводу (оскільки ККД ПЧ становить близько 96-98%), однак загальний системний ККД зростає в рази за рахунок колосального зниження гідравлічних втрат у трубопроводі та запірній арматурі.

При проектуванні енергоощадних систем на базі ЧРП важливо враховувати обмеження, зумовлені фізикою процесу. Рівняння залежностей справедливі лише до тих пір, поки напір, який розвиває насос, не зрівняється зі статичним напором (протиском) системи. Коли $H = H_{п}$, подача насоса стає рівною нулю ($Q = 0$).

Частота обертання, при якій це відбувається, називається граничною $n_{тр}$ і визначається за формулою:

$$n_{тр} = n_{ном} \sqrt{H_{п} / H_{ф}}, \quad (7.12)$$

Значення $n_{тр}$ є критичною межею між робочим (корисним) і неробочим режимами насоса. Якщо частота обертання, що задається перетворювачем частоти, опускається нижче граничної ($n < n_{тр}$), зворотний клапан насосної установки закривається.

У цьому стані насос продовжує споживати активну електроенергію з мережі (долаючи механічне тертя в сальниках, підшипниках та гідравлічний опір обертання колеса в рідині), але не виконує жодної корисної роботи (подача відсутня, ККД = 0%). Вся спожита електрична енергія перетворюється на тепло, нагріваючи рідину в корпусі насоса, що може призвести до його закипання та виходу з ладу ущільнень.

Тому сучасні системи автоматики ЧРП обов'язково програмуються на обмеження мінімальної робочої частоти (так званий «режим сну» або нижня уставка ПІД-регулятора) на рівні, трохи вищому за $n_{тр}$, щоб унеможливити марнотратне витрачання електроенергії у режимі закритої засувки.

Розрахунок економії електроенергії базується на порівнянні спожитої енергії W (кВт·год) за певний розрахунковий період (наприклад, за рік) при традиційному (дросельному) і частотному методах регулювання.

Енергія, спожита при дроселюванні

$$W_{dr} = \sum_{i=1}^n P_{dr}(Q_i) \cdot t_i, \quad (7.13)$$

						Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Енергія, спожита при частотному регулюванні

$$W_{ch} = \sum_{i=1}^n P_{ch}(Q_i) \cdot t_i, \quad (7.14)$$

де Q_i – задана витрата на i -му ступені графіка навантаження;

P_{dr} , P_{ch} – потужність, споживана з мережі при відповідному способі регулювання; t_i – тривалість роботи в даному режимі (в годинах).

Сумарна річна економія електроенергії становить:

$$\Delta W = W_{dr} - W_{ch}. \quad (7.15)$$

Враховуючи сучасний тариф на електроенергію для промислових споживачів, можна легко розрахувати економічний ефект у грошовому еквіваленті:

$$E_e = \Delta W \cdot c_0. \quad (7.16)$$

Визначимо величину економії електроенергії для типового насоса, встановленого в насосній станції оборотного водопостачання, за рахунок заміни системи дроселювання на частотне регулювання.

Вихідні дані: потужність двигуна 15 кВт; номінальний ККД 92%, номінальна частота обертання 1430 об/хв, час роботи 15 год/добу, кількість робочих діб у році: 252 дні, діаграма відносної витрати (*a*) та P – Q діаграма (*б*) представлені на рис. 7.7.

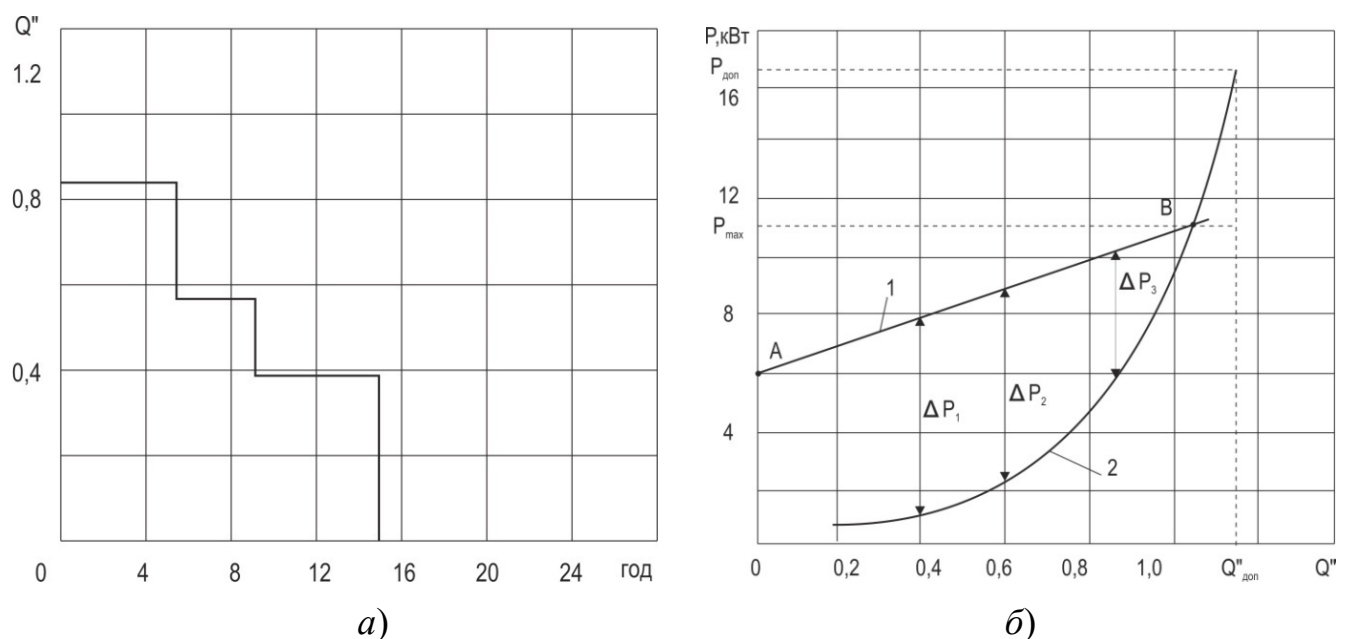


Рисунок 7.7 – Діаграми:

a) відносної витрати води; *б*), P – Q діаграма насосу

При виборі двигунів для насосів зазвичай вводяться коефіцієнти запасу, тому максимальна потужність, що віддається двигуном при повністю відкритій дросельній засувці ($Q^* = 1$), становить:

$$P_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{k_3} = \frac{15}{1,35} = 11 \text{ кВт},$$

(при повністю закритій засувці споживання зменшується приблизно до 6 кВт).

Необхідна мінімальна потужність ПЧ розраховується з 10% запасом:

$$P_{\text{ПЧ}} = 1,1 P_{\text{макс}} = 1,1 \cdot 11 = 12,1 \text{ кВт}.$$

Для ефективного керування приймаємо спеціалізований перетворювач частоти загальнопромислового виконання Danfoss VLT AQUA Drive FC 202 (табл. 7.1.) на номінальну потужність 15 кВт. Актуальна ринкова вартість такого ПЧ (для стандартної комплектації 131F6641) становить орієнтовно 112763 грн.

Таблиця 7.1 – Основні технічні характеристики Danfoss VLT AQUA Drive FC 202

Потужність двигуна, кВт	Напруга живлення	Номінальний вихідний струм, А	Струм перевантаження впродовж 1 хв, А	Маса ПЧ
15	380-480 В	32	35,2	14,2 кг

За діаграмою $Q(t)$ визначаємо значення зниження споживаної потужності для кожного з часових інтервалів:

$$\Delta P_1 = 3,3 \text{ кВт}, \Delta P_2 = 5,8 \text{ кВт}, \Delta P_3 = 6,2 \text{ кВт}.$$

Електроенергія, зекономлена за один робочий цикл (добу):

$$\Delta W_{\text{ц}} = \Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 = 3,3 \cdot 5,5 + 5,8 \cdot 3 + 6,2 \cdot 6,5 = 75,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Річна економія електроенергії:

$$\Delta W_{\text{річ}} = \Delta W_{\text{ц}} \cdot T_p = 75,9 \cdot 252 = 19127 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

де T_p – кількість робочих діб у році.

Капітальні витрати на впровадження B_k складаються з вартості самого пристрою B_{k1} та вартості пусконаладжувальних робіт (приймаємо 5% від вартості ПЧ, B_{k2}):

$$B_k = B_{k1} + B_{k2} = 112763 + (0,05 \cdot 112763) = 118401,15 \text{ грн}.$$

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					72

Річні експлуатаційні витрати на обслуговування обладнання (приймаємо 5% від вартості):

$$B_e = 0,05 \cdot 112763 = 5638,15 \text{ грн/рік.}$$

Річна фінансова економія від зниження споживання електроенергії:

$$E_{\text{ек}} = \Delta W_{\text{рік}} \cdot c_0 = 19127 \cdot 11,129 = 212864,38 \text{ грн/рік}$$

Простий термін окупності проєкту визначається як відношення капітальних інвестицій до чистого річного фінансового результату:

$$T_{\text{ок}} = \frac{B_k}{E_{\text{грн}} - B_e} = \frac{118401,15}{212864,38 - 5638,15} \approx 0,57 \text{ років}$$

Окрім прямої економії електроенергії, впровадження ЧРП дає ряд супутніх (непрямих) економічних і технологічних ефектів, які часто перевищують економію на струмі:

1. *Зниження витоків води.* Автоматична підтримка мінімально необхідного тиску в системі (без надлишку) суттєво зменшує об'єм води, що втрачається через зношені труби та стики. Зниження тиску на 1 бар може зменшити витoki на 10-15%, що дає величезну економію самого ресурсу (води), на підготовку та перекачування якого вже було витрачено кошти;

2. *Збільшення ресурсу обладнання.* Плавний пуск і зупинка двигуна усувають пускові струми (які можуть перевищувати номінальні в 6-7 разів), що значно подовжує термін служби ізоляції двигуна і зменшує знос контакторної апаратури. Усуваються механічні удари на валу і муфтах;

3. *Відсутність гідравлічних ударів.* Плавна зміна швидкості обертання колеса насоса запобігає виникненню гідроударів у трубопроводах, які зазвичай руйнують запірну арматуру, зворотні клапани і самі труби. Це кардинально зменшує витрати на ремонтні роботи та ліквідацію аварій;

4. *Автоматизація технологічного процесу.* ЧРП дозволяє створити повністю замкнену, автоматичну систему регулювання за допомогою зворотного зв'язку (наприклад, від датчика тиску, температури, витратоміра). Це зменшує потребу у втручанні оперативного персоналу (людський фактор).

Отже, завдяки високому тарифу на електроенергію для промислових споживачів, модернізація насосної установки окупається всього за ~7 місяців активної експлуатації. ПЧ Danfoss VLT AQUA Drive FC 202 (15 кВт) спеціально розроблені для керування відцентровими насосами та містять вбудовані функції каскадного керування, захисту від сухого ходу та ПД-регулювання тиску.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					73

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі виконано проектування системи електропостачання заводу з підйомно-транспортного обладнання.

Розрахунок електричних навантажень по окремих цехах і заводу в цілому, виконано за методом впорядкованих діаграм. Сумарне розрахункове навантаження на шинах 10 кВ ЦРУ склало 13,92 МВт активної та 12,5 Мвар реактивної потужності. Добові графіки навантажень побудовано на основі типових залежностей із диференціацією режимів споживання для робочих і вихідних днів у зимовий та літній періоди.

зовнішнє електропостачання заводу передбачається виконати від ПС енергосистеми по КЛ 10 кВ з довжиною траси 1,0 км. На території заводу передбачається спорудження ЦРУ 10 кВ з двома секціями шин.

Для організації розподільної мережі 10 кВ заводу було проаналізовано два варіанти:

1) радіальна схема з глухим приєднанням кабельних ліній до трансформаторів цехових ТП;

2) змішана схема, в якій живлення цехових ТП здійснюється по двійних наскрізних магістралях з підключенням через вимикачі навантаження із запобіжниками, а живлення СД 10 кВ здійснюється радіальними лініями.

За результатами техніко-економічного порівняння обґрунтовано доцільність подальшої розробки другого варіанта.

У результаті аналізу режимів реактивної потужності, виявилось, що доцільні генерація реактивної потужності СД 10 кВ компресорної станції, та установка КУ номінальною напругою 0,4 кВ серій УКРМ-0,4 потужністю 275-600 квар.

Розрахунок струмів КЗ у мереж 10 кВ проведено у відносних базисних одиницях для максимального режиму роботи енергосистеми. На основі отриманих результатів проведений вибір електрообладнання і КЛ 10 кВ.

У спеціальному розділі роботи проаналізовано принципи роботи та експлуатаційні режими відцентрових насосних установок малої потужності, а також методи регулювання їхньої продуктивності із застосуванням частотно-регульованого електропривода на базі асинхронних двигунів. Обґрунтовано технічну та економічну доцільність використання плавного регулювання частоти обертання ротора як засобу забезпечення суттєвої економії електроенергії.

Загалом кваліфікаційна робота відповідає встановленим технічним і економічним вимогам. □ □ □ □ □

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						74

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
2. Васи́леґа П. О. Електропостачання: підручник. Суми: Сумський державний університет, 2019. 521 с.
3. Бурбело М. Й., Бірюков О. О., Мельничук Л. М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 204 с.
4. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський та ін. М-во освіти і науки України, Центральнoукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. 274 с.
5. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій. Вінниця: ВНТУ, 2009. 194 с.
6. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування. Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. 153 с.
7. Півняк Г. Г., Винославський В. М., Рибалко А. Я., Несен Л. І. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів./ За ред. Г. Г. Півняка. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002.
8. Перехідні процеси в системах електропостачання: / М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець. Харків: ТОВ «В справі», 2016. 260 с.
9. Технічні характеристики: АПВЕРПу-10 1х300. Електронний ресурс. URL: <https://www.yuzhcable.info/edata/mrr/100105100010000300>. Остання дата звернення 22.05.26 р.
10. Слові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу від 6 до 35 кВ. Каталог. Харків: ПАТ Південькабель. 132 с.
11. Енергозбереження в промисловості. Частина 1 / А. В. Праховник, О. М. Суходоля, С. П. Денисюк, В. В. Прокопенко. К.: НТУУ «КПІ», 2011. 517 с.
12. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. К.: Кондор, 2005. 408 с.
13. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роб. для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад.: П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш та ін.]; М-во освіти і науки України, Центральнoукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. 80 с.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		75

ДОДАТКИ

Додаток А.

Розрахунки графіків електричних навантажень

Таблиця А.1 – Розрахунок добових графіків активної, реактивної повної потужностей робочої зимової доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{p.p,j}$, %	$P_{з.p,j}$, кВт	$n_{q.p,j}$	$Q_{з.p,j}$, вар	$S_{з.p,j}$, кВА
1	0 – 1	52,0	7412,8	38,0	802,7	7456,1
2	1 – 2	54,0	7697,9	39,0	823,8	7741,9
3	2 – 3	50,0	7127,7	35,0	739,3	7165,9
4	3 – 4	44,0	6272,4	32,0	675,9	6308,7
5	4 – 5	49,0	6985,1	36,0	760,4	7026,4
6	5 – 6	52,0	7412,8	41,0	866,0	7463,2
7	6 – 7	54,0	7697,9	36,0	760,4	7735,4
8	7 – 8	68,0	9693,7	57,0	1204,0	9768,2
9	8 – 9	95,0	13542,6	93,0	1964,4	13684,4
10	9 – 10	100,0	14255,4	100,0	2112,3	14411,0
11	10 – 11	96,0	13685,2	93,0	1964,4	13825,5
12	11 – 12	88,0	12544,8	84,0	1774,3	12669,6
13	12 – 13	86,0	12259,6	86,0	1816,6	12393,5
14	13 – 14	91,0	12972,4	90,0	1901,1	13111,0
15	14 – 15	92,0	13115,0	91,0	1922,2	13255,1
16	15 – 16	84,0	11974,5	82,0	1732,1	12099,2
17	16 – 17	86,0	12259,6	82,0	1732,1	12381,4
18	17 – 18	85,0	12117,1	79,0	1668,7	12231,5
19	18 – 19	81,0	11546,9	77,0	1626,5	11660,9
20	19 – 20	75,0	10691,6	70,0	1478,6	10793,3
21	20 – 21	77,0	10976,7	71,0	1499,7	11078,6
22	21 – 22	73,0	10406,4	71,0	1499,7	10514,0
23	22 – 23	64,0	9123,5	57,0	1204,0	9202,6
24	23 – 24	52,0	7412,8	40,0	844,9	7460,8

Таблиця А.2 – Розрахунок добових графіків активної, реактивної і повної потужностей вихідної зимової доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{p.v,j}$, %	$P_{з.v,j}$, кВт	$n_{q.v,j}$	$Q_{з.v,j}$, вар	$S_{з.v,j}$, кВА
1	0 – 1	34,0	4846,8	36,0	760,4	4906,1
2	1 – 2	34,0	4846,8	36,0	760,4	4906,1
3	2 – 3	34,0	4846,8	36,0	760,4	4906,1
4	3 – 4	34,0	4846,8	36,0	760,4	4906,1
5	4 – 5	34,0	4846,8	36,0	760,4	4906,1
6	5 – 6	34,0	4846,8	36,0	760,4	4906,1
7	6 – 7	34,0	4846,8	32,0	675,9	4893,7
8	7 – 8	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
9	8 – 9	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
10	9 – 10	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
11	10 – 11	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
12	11 – 12	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
13	12 – 13	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
14	13 – 14	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
15	14 – 15	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
16	15 – 16	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
17	16 – 17	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
18	17 – 18	27,0	3849,0	25,0	528,1	3885,0
19	18 – 19	32,0	4561,7	37,0	781,6	4628,2
20	19 – 20	32,0	4561,7	37,0	781,6	4628,2
21	20 – 21	34,0	4846,8	37,0	781,6	4909,4
22	21 – 22	34,0	4846,8	37,0	781,6	4909,4
23	22 – 23	34,0	4846,8	37,0	781,6	4909,4
24	23 – 24	34,0	4846,8	37,0	781,6	4909,4

Таблиця А.3 – Розрахунок добових графіків активної, реактивної повної потужностей робочої літньої доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{p.p,j}, \%$	$P_{л.p,j}$, кВт	$n_{q.p,j}$	$Q_{л.p,j}$, вар	$S_{л.p,j}$, кВА
1	0 – 1	52,0	6300,9	39,0	700,2	6339,7
2	1 – 2	53,0	6422,1	40,0	718,2	6462,1
3	2 – 3	49,0	5937,4	51,0	915,7	6007,6
4	3 – 4	43,0	5210,3	36,0	646,4	5250,3
5	4 – 5	47,0	5695,0	38,0	682,3	5735,8
6	5 – 6	52,0	6300,9	42,0	754,1	6345,9
7	6 – 7	54,0	6543,2	48,0	861,8	6599,7
8	7 – 8	57,0	6906,7	57,0	1023,4	6982,2
9	8 – 9	93,0	11268,9	93,0	1669,8	11391,9
10	9 – 10	100,0	12117,1	100,0	1795,5	12249,4
11	10 – 11	96,0	11632,4	98,0	1759,5	11764,7
12	11 – 12	88,0	10663,0	98,0	1759,5	10807,2
13	12 – 13	85,0	10299,5	82,0	1472,3	10404,2
14	13 – 14	84,0	10178,4	84,0	1508,2	10289,5
15	14 – 15	88,0	10663,0	84,0	1508,2	10769,2
16	15 – 16	82,0	9936,0	82,0	1472,3	10044,5
17	16 – 17	84,0	10178,4	81,0	1454,3	10281,7
18	17 – 18	86,0	10420,7	82,0	1472,3	10524,2
19	18 – 19	81,0	9814,8	76,0	1364,5	9909,2
20	19 – 20	75,0	9087,8	62,0	1113,2	9155,7
21	20 – 21	78,0	9451,3	72,0	1292,7	9539,3
22	21 – 22	82,0	9936,0	80,0	1436,4	10039,3
23	22 – 23	64,0	7754,9	60,0	1077,3	7829,4
24	23 – 24	52,0	6300,9	35,0	628,4	6332,1

Таблиця А.4 – Розрахунок добових графіків активної, реактивної і повної потужностей вихідної літньої доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{p.p,j}, \%$	$P_{л.в,j}$, кВт	$n_{q.в,j}$	$Q_{л.в,j}$, вар	$S_{л.в,j}$, кВА
1	0 – 1	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
2	1 – 2	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
3	2 – 3	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
4	3 – 4	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
5	4 – 5	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
6	5 – 6	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
7	6 – 7	24,0	2908,1	35,0	628,4	2975,2
8	7 – 8	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
9	8 – 9	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
10	9 – 10	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
11	10 – 11	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
12	11 – 12	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
13	12 – 13	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
14	13 – 14	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
15	14 – 15	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
16	15 – 16	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
17	16 – 17	24,0	2908,1	25,0	448,9	2942,5
18	17 – 18	29,0	3514,0	25,0	448,9	3542,5
19	18 – 19	29,0	3514,0	28,0	502,7	3549,7
20	19 – 20	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
21	20 – 21	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
22	21 – 22	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
23	22 – 23	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0
24	23 – 24	30,0	3635,1	35,0	628,4	3689,0

Таблиця А.5 – Розрахунок річних графіків за активної, реактивної та повної потужностей

№ п/п	Потужність P_j , кВт	Тривалість ступеня $T_{p,j}$, год	Потужність Q_j , квар	Тривалість ступеня $T_{q,j}$, год	Потужність S_j , кВт·А	Тривалість ступеня $T_{s,j}$, год
1	2	3	4	5	6	7
1	14255,4	147	2112,3	147	14411,0	147
2	13685,2	147	1964,4	147	13825,5	147
3	13542,6	147	1964,4	147	13684,4	147
4	13115,0	147	1922,2	147	13255,1	147
5	12972,4	147	1901,1	147	13111,0	147
6	12544,8	147	1816,6	147	12669,6	147
7	12259,6	147	1774,3	147	12393,5	147
8	12259,6	147	1732,1	147	12381,4	147
9	12117,1	147	1732,1	147	12249,4	105
10	12117,1	105	1668,7	147	12231,5	147
11	11974,5	147	1626,5	147	12099,2	147
12	11632,4	105	1499,7	147	11764,7	105
13	11546,9	147	1499,7	147	11660,9	147
14	11268,9	105	1478,6	147	11391,9	105
15	10976,7	147	1204,0	147	11078,6	147
16	10691,6	147	1204,0	147	10807,2	105
17	10663,0	105	866,0	147	10793,3	147
18	10663,0	105	844,9	147	10769,2	105
19	10420,7	105	823,8	147	10524,2	105
20	10406,4	147	802,7	147	10514,0	147
21	10299,5	105	781,6	65	10404,2	105
22	10178,4	105	781,6	65	10289,5	105
23	10178,4	105	781,6	65	10281,7	105
24	9936,0	105	781,6	65	10044,5	105
25	9936,0	105	781,6	65	10039,3	105
26	9814,8	105	781,6	65	9909,2	105
27	9693,7	147	760,4	147	9768,2	147
28	9451,3	105	760,4	65	9539,3	105
29	9123,5	147	760,4	65	9202,6	147
30	9087,8	105	760,4	65	9155,7	105
31	7754,9	105	760,4	65	7829,4	105
32	7697,9	147	760,4	147	7741,9	147
33	7697,9	147	760,4	65	7735,4	147
34	7412,8	147	760,4	65	7463,2	147
35	7412,8	147	739,3	147	7460,8	147
36	7412,8	147	675,9	65	7456,1	147
37	7127,7	147	675,9	147	7165,9	147
38	6985,1	147	628,4	48	7026,4	147
39	6906,7	105	628,4	105	6982,2	105
40	6543,2	105	628,4	105	6599,7	105
41	6422,1	105	628,4	105	6462,1	105
42	6300,9	105	628,4	105	6345,9	105
43	6300,9	105	628,4	105	6339,7	105
44	6300,9	105	628,4	48	6332,1	105
45	6272,4	147	628,4	48	6308,7	147
46	5937,4	105	628,4	48	6007,6	105

Продовження табл. А.5

1	2	3	4	5	6	7
47	5695,0	105	628,4	105	5735,8	105
48	5210,3	105	628,4	48	5250,3	105
49	4846,8	65	628,4	105	4909,4	65
50	4846,8	65	628,4	48	4909,4	65
51	4846,8	65	628,4	48	4909,4	65
52	4846,8	65	628,4	48	4909,4	65
53	4846,8	65	628,4	48	4906,1	65
54	4846,8	65	628,4	48	4906,1	65
55	4846,8	65	628,4	105	4906,1	65
56	4846,8	65	628,4	48	4906,1	65
57	4846,8	65	628,4	105	4906,1	65
58	4846,8	65	628,4	105	4906,1	65
59	4846,8	65	628,4	105	4893,7	65
60	4561,7	65	628,4	105	4628,2	65
61	4561,7	65	628,4	48	4628,2	65
62	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
63	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
64	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
65	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
66	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
67	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
68	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
69	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
70	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
71	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
72	3849,0	65	528,1	65	3885,0	65
73	3635,1	48	502,7	48	3689,0	48
74	3635,1	48	502,7	105	3689,0	48
75	3635,1	48	448,9	48	3689,0	48
76	3635,1	48	448,9	48	3689,0	48
77	3635,1	48	448,9	105	3689,0	48
78	3635,1	48	448,9	105	3689,0	48
79	3635,1	48	448,9	48	3689,0	48
80	3635,1	48	448,9	48	3689,0	48
81	3635,1	48	448,9	105	3689,0	48
82	3635,1	48	448,9	48	3689,0	48
83	3635,1	48	448,9	105	3689,0	48
84	3514,0	48	448,9	105	3549,7	48
85	3514,0	48	448,9	105	3542,5	48
86	2908,1	48	448,9	105	2975,2	48
87	2908,1	48	448,9	105	2942,5	48
88	2908,1	48	448,9	48	2942,5	48
89	2908,1	48	448,9	48	2942,5	48
90	2908,1	48	448,9	48	2942,5	48
91	2908,1	48	448,9	105	2942,5	48
92	2908,1	48	448,9	105	2942,5	48
93	2908,1	48	448,9	105	2942,5	48
94	2908,1	48	448,9	48	2942,5	48
95	2908,1	48	448,9	48	2942,5	48
96	2908,1	48	448,9	48	2942,5	48
Разом	8760		8760		8760	

Додаток Б.

**Розрахунок електричних навантажень
для вибору магістральних ліній 10 кВ**

Таблиця Б.1 - Розрахунок силових електричних навантажень в мережі 10 кВ для вибору магістральних ліній

№ п/п	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість ел. спо- живачів	Встановлена по- тужність, кВт		m	k _в	cosφ	tgφ	Середнє наванта- ження за зміну			n _е	k _м	Розрахункова потужність,		
			одного	сумарна					P _{ср} , кВт	Q _{ср} , квар	P _р , кВт			Q _р , квар	S _р , кВА	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	Кабельні лінії 7, 8															
	ТП-1 (2х1000)															
	силова	76	3,0 - 75,0	1634,0	>3	0,68	0,70	1,01	1107,8	1122,6	44	1,06	1174,2	1122,6	1624,5	
	освітлювальна								207,0	358,5			193,1	334,5		
	батарей конденсаторів													-1200,0		
	ТП-2 (2х1000)															
	силова	417	0,1 - 46,0	4018,4	460	0,24	0,67	1,09	946,2	1035,1	175	1,07	1012,6	1035,1	1448,0	
	освітлювальна								340,5	484,0			353,4	510,7		
	батарей конденсаторів													-1200,0		
	Всього															
	силова	493	0,1 - 75,0	5652,4	>3	0,36	0,69	1,05	2054,0	2157,7	151	1,06	2168,1	2157,7	3058,8	
	освітлювальна								547,4	842,5			546,6	845,2		
	батарей конденсаторів													-2400,0		
	Всього по ТП-1, 2 (4х1000)								2601,4	3000,2			2714,6	603,0	2780,8	
	втрати в трансформаторах												26,5	126,3		
	Всього по КЛ7, 8												2741,1	729,3	2836,5	
	Кабельні лінії 11, 12															
	ТП-1, 2 (4х1000)															
	силова	493	0,1 - 75,0	5652,4	>3	0,36	0,69	1,05	2054,0	2157,7	151	1,06	2168,1	2157,7	3058,8	
	освітлювальна								547,4	842,5			546,6	845,2		
	батарей конденсаторів													-2400,0		
	ТП-3 (2х1000)															
	силова	39	1,1 - 260,0	1785,9	>3	0,68	0,80	0,75	1216,9	917,9	14	1,14	1383,7	917,9	1660,5	
	освітлювальна								27,2	47,1			23,8	41,3		
	батарей конденсаторів													-550,0		

Продовження табл. Б.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Всього														
	силова	532	0,1 - 260,0	7438,3	>3	0,44	0,73	0,94	3270,9	3075,6	57	1,10	3608,8	3075,6	4741,5
	освітлювальна								574,6	889,6			570,4	886,5	
	батарей конденсаторів													-2950,0	
	Всього по ТП-1, 2, 3 (6x1000)								3845,5	3965,1			4179,2	1012,1	4300,0
	втрати в трансформаторах												41,7	199,5	
	Всього по КЛП1, 12												4220,8	1211,6	4391,3
	Кабельні лінії 15, 16														
	ТП-5 (2x1000)														
	силова	131	1,4 - 110,0	2553,4	>3	0,44	0,70	1,01	1112,1	1127,3	46	1,12	1250,8	1127,3	1683,8
	освітлювальна								178,1	90,3			175,1	96,0	
	батарей конденсаторів													-900,0	
	ТП-6 (2x1000)														
	силова	126	0,8 - 130,0	2882,5	>3	0,40	0,65	1,17	1150,8	1345,5	44	1,14	1315,9	1345,5	1882,0
	освітлювальна								110,9	177,5			115,0	11,6	
	батарей конденсаторів													-1200,0	
	Всього														
	силова	257	1,4 - 110,0	5435,9	>3	0,42	0,68	1,09	2262,9	2472,7	99	1,07	2420,1	2472,7	3460,0
	освітлювальна								289,0	267,8			290,1	107,6	
	батарей конденсаторів													-2100,0	
	Всього по ТП-5, 6 (4x1000)								2551,9	2740,5			2710,2	480,3	2752,4
	втрати в трансформаторах												32,9	160,2	
	Всього по КЛП5, 16												2743,1	640,5	2816,9
	Кабельні лінії 13, 14														
	ТП-5, 6 (4x1000)														
	силова	257	1,4 - 110,0	5435,9	>3	0,42	0,68	1,09	2262,9	2472,7	99	1,07	2420,1	2472,7	3460,0
	освітлювальна								289,0	267,8			290,1	107,6	
	батарей конденсаторів													-2100,0	

Продовження табл. Б.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	ТП-4 (2x1000)														
	силова	39	1,1 - 260,0	1785,9	>3	0,68	0,80	0,75	1216,9	917,9	14	1,14	1383,7	917,9	1660,5
	освітлювальна								27,2	47,1			23,8	41,3	
	батарей конденсаторів													-550,0	
	Всього														
	силова	296	1,1 - 260,0	7221,8	>3	0,48	0,72	0,97	3479,8	3390,6	56	1,09	3803,8	3390,6	5095,6
	освітлювальна								316,2	314,8			314,0	148,9	
	батарей конденсаторів													-2650,0	
	Всього по ТП-4, 5, 6 (6x1000)								3796,0	3705,4			4117,8	889,5	4212,8
	втрати в трансформаторах												50,8	246,7	
	Всього по КЛІ3, 14												4168,6	1136,2	4320,6
	Кабельні лінії 21, 22														
	ТП-8 (2x1000)														
	силова	126	0,8 - 130,0	2882,5	>3	0,40	0,65	1,17	1150,8	1345,5	44	1,14	1315,9	1345,5	1882,0
	освітлювальна								110,9	177,5			115,0	11,6	
	батарей конденсаторів													-1200,0	
	ТП-9 (2x1000)														
	силова	166	0,6 - 160,0	3586,2	>3	0,26	0,69	1,06	937,3	991,1	45	1,21	1138,7	991,1	1509,6
	освітлювальна								269,1	466,2			228,1	367,1	
	батарей конденсаторів													-1100,0	
	Всього														
	силова	292	0,6 - 160,0	6469	>3	0,32	0,67	1,12	2088,1	2336,5	81	1,11	2454,7	2336,5	3388,9
	освітлювальна								380,1	643,7			343,1	378,6	
	батарей конденсаторів													-2300,0	
	Всього по ТП-8, 9 (4x1000)								2468,1	2980,2			2797,8	415,2	2828,4
	втрати в трансформаторах												34,2	166,0	
	Всього по КЛІ9, 20												2831,9	581,2	2891,0

Продовження табл. Б.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Кабельні лінії 19, 20														
	ТП-8, 9 (4x1000)														
	силова	292	0,6 - 160,0	6468,7	>3	0,32	0,67	1,12	2088,1	2336,5	81	1,11	2454,7	2336,5	3388,9
	освітлювальна								280,8	474,7			253,5	233,8	
	батарей конденсаторів													-1642,5	
	ТП-7 (2x1000)														
	силова	131	1,4 - 110,0	2553,4	>3	0,44	0,70	1,01	1112,1	1127,3	46	1,12	1250,8	1127,3	1683,8
	освітлювальна								178,1	90,3			175,1	96,0	
	батарей конденсаторів													-900,0	
	Всього														
	силова	423	0,6 - 160,0	9022	>3	0,35	0,68	1,08	3200	3464	113	1,07	3705,4	3463,8	5072,3
	освітлювальна								459	565			428,6	329,9	
	батарей конденсаторів													-2542,5	
	Всього по ТП-7, 8, 9 (6x1000)								3659,1	4028,8			4134,0	1251,2	4319,2
	втрати в трансформаторах												52,6	255,0	
	Всього по КЛІ7, 18												4186,7	1506,2	4449,4