

Міністерство освіти і науки України
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
_____ Плешков П.Г.
“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**Оптимізація системи електропостачання та
впровадження енергоефективних технологій для
сучасного сиркомбінату**

**Optimization of the power supply system and
implementation of energy-efficient technologies for a
modern cheese factory**

Виконав студент 4 курсу групи ЕЕ-23мб
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Валерій ПАВЛЮК
« ____ » _____ 2026 р.

Керівник проекту
доц, канд.техн.наук

_____ Іван САВЕЛЕНКО
« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Плешков П.Г.

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

_____ Павлюка Валерія Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Оптимізація системи електропостачання та впровадження енергоефективних технологій для сучасного сиркомбінату

Optimization of the power supply system and implementation of energy-efficient technologies for a modern cheese factory

2. Керівник роботи (проекту) Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доц.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 5.06.2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Розробити систему електропостачання заводу, згідно завдання: Виконати розрахунок електричних навантажень заводу. Побудувати графіки електричних навантажень. Виконати вибір варіантів схем електропостачання. Виконати розрахунки режимів реактивної потужності, вибору трансформаторів та струмів КЗ. Вибрати високовольтне захисне та комутаційне обладнання. Розробити спеціальний розділ.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	10.05.26	
2	<i>Побудова графіків електр. навантажень</i>	10.05.26	
3	<i>Вибір напруги і електричних схем електропостачання</i>	14.05.26	
4	<i>Режими реактивної потужності</i>	19.05.26	
5	<i>Розрахунок струмів КЗ</i>	19.05.26	
6	<i>Вибір низьковольтного обладнання</i>	20.05.26	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	24.04.26	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	30.05.26	
9	<i>Виконання графічної частини</i>	4.06.26	

Дата видачі завдання

Підпис керівника _____

« ____ » _____ 2026 р.

Завдання прийнято до виконання

Підпис студента _____

« ____ » _____ 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 65 с.; 9 рис.; 16 табл.; 7 джерел

Павлюк В. Оптимізація системи електропостачання та впровадження енергоефективних технологій для сучасного сиркомбінату – Рукопис.

Optimization of the power supply system and implementation of energy-efficient technologies for a modern cheese factory.

Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2026 р.

В кваліфікаційній роботі розроблено систему електропостачання заводу продовольчих товарів із застосуванням частотно-регульованого приводу насосів енергії з метою підвищення енергоефективності електроспоживання і виконаний згідно завдання.

В роботі представлений огляд існуючих рішень, вибрано обладнання та принцип його роботи, розроблена система електропостачання та вибране необхідне обладнання.

В спеціальному розділі розглянуто питання використання частотно-регульованого приводу для насосних груп підприємства.

електропостачання, енергоефективність, ЧРП.

ABSTRACT

Qualification work: 65 p.; 9 Fig.; 16 tables; 7 sources

PAVLIUK V. Optimization of the power supply system and implementation of energy-efficient technologies for a modern cheese factory – Manuscript.

Оптимізація системи електропостачання та впровадження енергоефективних технологій для сучасного сиркомбінату

Thesis for the first (bachelor's) level of higher education in the specialty 141 – “Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics.” – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2026.

This thesis develops a power supply system for a food processing plant using variable-frequency drives for energy pumps to improve energy efficiency, and is completed in accordance with the assignment.

The thesis presents an overview of existing solutions, selects equipment and describes its operating principle, develops a power supply system, and selects the necessary equipment.

A special section examines the use of variable-frequency drives for the plant's pump units.

power supply, energy efficiency, VFD.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	7
1.1. Розрахунок силових електричних навантажень в електричних мережах до 1000 В.....	7
1.2. Розрахунок освітлювальних навантажень.....	14
1.3. Розрахунок електричних навантажень в силових мережах вище 1000 В.	15
1.4. Побудова графіків електричних навантажень підприємства	21
2. ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	27
3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	29
3.1. Вибір схем зовнішнього електропостачання	29
4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	34
4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв	34
4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв	37
5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ, ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ І ПІДСТАНЦІЙ ПІДПРИЄМСТВА	40
5.1. Вибір кількості, потужності та місця розташування цехових трансформаторів	40
6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ.	42
6.1. Вибір кабелів напругою 10 кВ для високовольтної мережі заводу.	49
6.2. Вибір електричних апаратів високої напруги.	52
6.3. Вибір потужності схем живлення трансформаторів власних потреб	55
7. ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ПРИВОДУ.....	57
7.1. Обґрунтування доцільності застосування ЧРП	57
7.2. Математичне моделювання динаміки споживання потужності	58
7.3. Визначення добового та річного профілю економії.	59
7.4. Визначення капітальних витрат	62
7.5. Розрахунок грошового еквіваленту збереженої енергії.	62
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ	65

					ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Павлюк В.А.			Проектування електротехнічної системи електроспоживання сирзаводу	Літера	Аркуш	Аркушів	
Перевірів		Савеленко І.В.					3	65	
Н. Контр.						ЦНТУ, група ЕЕ-23мб			
Затв.		Плешков П.Г.							

ВСТУП

В умовах постійного зростання вартості енергоносіїв та жорстких вимог до конкурентоспроможності продукції, питання оптимізації енергоспоживання на промислових підприємствах набуває критичного значення. Харчова промисловість, зокрема молокопереробна галузь та виробництво сиру, характеризується високою енергоемністю технологічних процесів. Лівова частка витрат припадає на роботу насосного обладнання, систем вентиляції, охолодження та термічної обробки.

Традиційні системи електропостачання, спроектовані без урахування сучасних вимог енергоменеджменту, часто мають значні резерви для зниження втрат. Використання морально застарілого силового обладнання та відсутність гнучкого регулювання електроприводів призводять до нераціонального споживання електроенергії. У цьому контексті комплексний підхід, що включає аудит наявних навантажень, модернізацію трансформаторного господарства (зокрема перехід на трансформатори з аморфним осердям) та впровадження частотно-регульованих приводів (ЧРП), є не лише технічно обґрунтованим, але й економічно необхідним кроком для сучасного сиркомбінату.

Мета дослідження: Підвищення енергоефективності та надійності роботи сиркомбінату шляхом оптимізації його системи електропостачання та впровадження сучасних енергоощадних електротехнічних рішень.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- Провести комплексний аналіз існуючої схеми електропостачання та добових графіків електричних навантажень основних цехів підприємства.
- Дослідити режими роботи трансформаторних підстанцій та обґрунтувати доцільність заміни типових силових трансформаторів на енергоефективні моделі з аморфним осердям для мінімізації втрат холостого ходу.

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

- Оцінити потенціал енергозбереження від впровадження частотно-регульованих приводів (ЧРП) у системах водопостачання, перекачування технологічних рідин та вентиляції.
- Виконати техніко-економічне обґрунтування запропонованих модернізаційних заходів із розрахунком термінів окупності інвестицій.

Об'єкт дослідження: Система електропостачання та електромеханічні комплекси технологічних ліній сучасного сиркомбінату.

Предмет дослідження: Методи та технічні засоби оптимізації режимів електроспоживання, зниження втрат потужності та підвищення загальної енергоефективності промислового об'єкта.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані в роботі технічні рішення та розрахункові моделі можуть бути використані як готовий алгоритм для проведення енергоаудиту на аналогічних підприємствах харчової промисловості з метою суттєвого скорочення операційних витрат на електроенергію.

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

1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1. Розрахунок силових електричних навантажень в електричних мережах до 1000 В

В розділі розглядається стандартизований алгоритм визначення розрахункових електричних навантажень у мережах напругою до 1000 В. Описана методика базується на поетапному аналізі параметрів електроспоживання вузла, що включає агрегацію номінальних і середніх потужностей силового обладнання.

Для споживачів зі змінним режимом роботи застосовується статистико-імовірнісний підхід, який передбачає обчислення ефективної кількості приймачів, групового коефіцієнта використання та подальше визначення коефіцієнта максимуму. Натомість для обладнання з постійним графіком роботи базовою величиною виступає усереднене навантаження.

Підсумкове розрахункове силове навантаження по вузлу формується шляхом математичної суперпозиції обчислених значень обох груп споживачів. Зазначена послідовність забезпечує високу достовірність розрахунків, необхідну для проєктування надійних та енергоефективних систем електропостачання.

Для прикладуведемо розрахунок навантажень відцентрових насосів з (ЧРП) сирного цеху.

Середнє активне навантаження сирних ванн знаходимо за формулою:

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{сум}} \cdot K_{\text{в}} = 117 \cdot 0,1 = 11,7 \text{ кВт};$$

де $K_{\text{в}} = 0,1$ – коефіцієнт використання; $P_{\text{сум}} = 117 \text{ кВт}$ – сумарне навантаження 26 різнотипних насосів, що визначається як:

$$P_{\text{сум}} = \sum P_i \cdot n_i = 13 \cdot 4 + 13 \cdot 5 = 117 \text{ кВт}.$$

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

де P_i – номінальна потужність одиничного споживача, кВт; n_i – кількість споживачів з рівною потужністю.

Середнє реактивне навантаження за найбільш завантажену зміну:

$$Q_{cp} = P_{cp} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 11,7 \cdot 0,62 = 7,25 \text{ квар};$$

де $\operatorname{tg} \varphi = 0,62 = \arccos \varphi = 0,85$.

Загальні середні навантаження цеху за найбільш навантажену зміну.

$$\Sigma Q_{cp} = 8,51 + 5,10 + 293,69 + 64,95 + 22,89 + 5,45 + 290,98 + 12,21 + 33,30 + 5,19 + 3,92 + 20,89 + 37,91 + 10,39 + 8,61 + 20,89 + 95,05 + 7,25 = 947,2 \text{ квар}.$$

$$\Sigma P_{cp} = 11,34 + 6,80 + 251,20 + 55,55 + 22,44 + 7,26 + 168,00 + 7,05 + 68,75 + 10,13 + 8,09 + 20,48 + 21,89 + 6,00 + 11,48 + 12,06 + 54,88 + 11,70 = 755,15 \text{ кВт}.$$

Кратність навантаження:

$$m = \frac{P_{n \max}}{P_{n \min}} = \frac{63}{1,1} = 57.$$

де $P_{n \max}$, $P_{n \min}$ – потужність електроприймачів цеху.

Груповий коефіцієнт використання визначається за виразом:

$$K_B = \frac{\sum_1^n P_{cp}}{\sum_1^n P_{\text{сум}}} = \frac{755,15}{2024,6} = 0,4$$

Ефективне число ЕП при $m=57 \geq 3$, $K_B = 0,4 > 0,2$:

$$n_E = \frac{2 \Sigma P_{\text{ном}}}{P_{n \max}} = \frac{2 \cdot 2224,6}{63} = 64 \text{ шт.}$$

Розрахункове активне навантаження визначається за виразом:

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

$$P_p = P_{cp} \cdot K_m = 755,1 \cdot 1,2 = 886,4 \text{ кВт};$$

де $P_{cp} = 755,1 \text{ кВт}$ – середнє навантаження цеху за зміну; $K_m = 1,2$ – коефіцієнт максимуму з довідникової літератури.

Розрахункове реактивне навантаження цеху при $n_E = 64 > 10$ визначається:

$$Q_p = Q_{cp} = 947,2 \text{ квар.}$$

Розрахунковий максимум навантаження сирного цеху:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{886,1^2 + 947,2^2} = 1297,9 \text{ кВА.}$$

Розрахунок навантажень до 1000 в зведений в таблиці 1.1.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		11

--

Apk.	14
------	----

1.2. Розрахунок освітлювальних навантажень

Розрахунок освітлювальних навантажень виконується за питомою потужністю освітлювального навантаження на одиницю корисної площі сирного цеху.

Для прикладу визначимо установлену потужність, кВт:

$$P_y = p_0 \cdot F \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 8000 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ кВт};$$

де $p_0 = 5$ питома потужність СДЛ, Вт/м², $F = 8000$ – площа сирцеху, м².

Розрахункове навантаження освітлювальних приладів, кВт:

$$P_p = K_c \cdot P_y = 0,8 \cdot 40 = 32 \text{ кВт};$$

де $K_c = 0,8$ – коефіцієнт попиту сирцеху.

Для освітлення використовується СДЛ:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 32 \cdot 0,32 = 10,24 \text{ квар.}$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ відповідає $\operatorname{tg} \varphi$, для ламп СДЛ, $\cos \varphi = 0,95$.

Розрахунок освітлювальних навантажень приведений в таблиці 1.2.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		16

Таблиця 1.2. Розрахунок освітлювальних електричних навантажень в мережі 0,4 кВ

№	Найменування	F, м ²	P _о , Вт/м ²	P _в , кВт	K _с	tgφ	P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	Сирцех	8000	5	40,00	0,8	0,32	32,00	10,24	33,60
2	Цех сушки сироватки	2000	6	12,00	0,8	0,32	9,60	3,07	10,08
3	Цех цельномолочної продукції	2600	5	13,00	0,8	0,32	10,40	3,33	10,92
4	Станція конденсату	385	3	1,16	0,9	0,32	1,04	0,33	1,09
5	Адмінкорпус	5115	7	35,81	0,8	0,32	28,64	9,17	30,07
6	Майстерня	776	5	3,88	0,85	0,32	3,30	1,06	3,46
7	Компресорна	570	4	2,28	0,85	0,32	1,94	0,62	2,03
8	Склад готової продукції	1005	3	3,02	0,85	0,32	2,56	0,82	2,69
9	Склад готової продукції	1007	3	3,02	0,85	0,32	2,57	0,82	2,70
10	Мазутна станція	510	4	2,04	0,85	0,32	1,73	0,55	1,82
11	Технологічна котельня	800	4	3,20	0,8	0,32	2,56	0,82	2,69
12	Насосна станція 2	325	3	0,98	0,6	0,32	0,59	0,19	0,61
13	Градирня	400	4	1,60	0,6	0,32	0,96	0,31	1,01
14	Прохідна	48	3	0,14	0,6	0,32	0,09	0,03	0,09
15	Територія заводу	110000	0,04	4,40	0,5	0,32	2,20	0,70	2,31
	Всього						100,2	32,06	105,2

1.3. Розрахунок електричних навантажень в силових мережах вище 1000 В

Для розрахунку електричних навантажень по типах 10 кВ заводу використовуємо метод впорядкованих діаграм.

Розрахунок електричних навантажень в силових мережах вище 1000 В наведений у таблиці 1.3.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		17

Таблиця 1.3. Розрахунок силових електричних навантажень в мережі 10 кВ

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кіл. ЕП	Встановлена потужність, кВт		m	Кв	cos	tg	Середнє наванта- ження за зміну, кВт		pe	Км	Розрахункова потужність				
			Одного	Сума					Рср	Qср			Рр	Qр	Sp		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
	ТП№1,2																
1	Сирцех																
	силова	213,0	1,1	-	62,8	2024,6	57	0,4	0,6	1,3	755,1	947,2	64,0	1,2	886,4	947,2	1297,2
	освітлювальна													32,0	10,2		
	Мазутна станція																
	силова	19,0	1,0	-	10,0	127,0	10,0	0,6	0,8	0,7	78,2	58,1	19,0	1,2	92,5	58,1	109,2
	освітлювальна													1,7	0,6		
	Насосна станція 2																
	силова	9,0	1,0	-	45,0	149,5	45,0	0,5	0,8	0,8	81,8	68,4	7,0	1,4	115,4	75,2	137,7
	освітлювальна													0,6	0,2		
	Всього по ТП№1,2																
	силова	241,0	1,0	-	63	2301,1	63	0,4	0,6	1,2	915,0	1073,6	73,0	1,2	1054,3	1073,6	1504,7
	освітлювальна													34,3	11,0		
	Всього													1088,6	1084,6	1536,7	
	БСК																
	З урахуванням БСК																
	Втрати в трансформаторі S _{н.тр} = 630	3,0															
	Всього на шинах 10 кВ ТП№1,2																
	ТП№ 3																
	Цех сушки сироватки																
	силова	59,0	0,9	-	113,0	736,0	126,0	0,4	0,8	0,7	293,1	217,3	13,0	1,4	412,4	217,3	466,2
	освітлювальна													9,6	3,1		
	Цех цельномолочної продукції																
	силова	85,0	0,1	-	15,0	335,1	188,0	0,4	0,7	1,0	148,2	150,5	45,0	1,2	174,7	150,5	230,6
	освітлювальна													10,4	3,3		

	App.
	19

	App.
	20

1.4. Побудова графіків електричних навантажень підприємства

В роботі виконано моделювання режимів електроспоживання сиркомбінату на основі побудови добових та річних графіків електричних навантажень.

Дослідження враховує сезонну нерівномірність технологічних процесів переробної галузі, що реалізовано шляхом зниження базових показників активної та реактивної потужності на 15% для літнього періоду.

На основі аналізу річного графіка за тривалістю визначено фундаментальні енергетичні маркери об'єкта: сумарну річну витрату активної енергії та час використання максимального навантаження.

Застосований алгоритм розрахунку, реалізований за допомогою прикладного програмного забезпечення, дозволяє сформувати достовірну базу для подальшої оптимізації системи електропостачання підприємства.

Загальна річна витрата активної електричної енергії:

$$W_p = W_{зр} + W_{лр} + W_{зв} + W_{лв} = 8757461 + 5534485 + 840135 + 527346 = 15659426,97 \text{ кВт*год.}$$

Загальна річна витрата реактивної електричної енергії:

$$V_p = V_{зр} + V_{лр} + V_{зв} + V_{лв} = 8529329 + 5178521 + 1039226 + 652314 = 15399390,36 \text{ квар*год}$$

Час використання максимального навантаження:

$$T_m = \frac{\sqrt{W_p^2 + V_p^2}}{S_m} = \frac{\sqrt{15659426,97^2 + 15399390,36^2}}{4062} = 5405 \text{ год}$$

Час максимальних витрат:

$$\tau_m = (0,124 + T_m \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760 = (0,124 + 5405 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760 = 3869 \text{ год.}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		21

Таблиця 1.4. Добове споживання активного навантаження

Години	Робоча доба		Вихідна доба	
	Зима	Літо	Зима	Літо
1	1634,2	1389,1	653,7	555,6
2	1634,2	1565,9	653,7	555,6
3	1634,2	1565,9	653,7	555,6
4	1931,3	1818,4	653,7	555,6
5	2525,6	2172,0	653,7	555,6
6	2822,7	2399,3	653,7	555,6
7	2971,3	2525,6	534,8	454,6
8	2971,3	2525,6	534,8	454,6
9	2674,2	2399,3	445,7	378,8
10	2674,2	2399,3	445,7	378,8
11	2674,2	2399,3	445,7	378,8
12	2674,2	2399,3	445,7	378,8
13	2674,2	2399,3	445,7	378,8
14	2674,2	2399,3	445,7	378,8
15	2674,2	2399,3	445,7	378,8
16	2674,2	2399,3	445,7	378,8
19	2971,3	2525,6	445,7	378,8
18	2971,3	2525,6	445,7	378,8
19	2674,2	2399,3	445,7	378,8
20	2674,2	2323,6	534,8	454,6
21	2674,2	2323,6	534,8	454,6
22	2525,6	2071,0	653,7	555,6
23	1931,3	1818,4	653,7	555,6
24	1634,2	1565,9	653,7	555,6
Wi	59574,56	52709,37	12925,155	10986,38

Таблиця 1.5. Добове споживання реактивне навантаження

Години	Робоча доба		Вихідна доба	
	Зима	Літо	Зима	Літо
1	1718,0	1460,3	803,6	683,0
2	1718,0	1460,3	803,6	683,0
3	1718,0	1460,3	803,6	683,0
4	1995,0	1695,8	803,6	683,0
5	2383,0	2025,5	803,6	683,0
6	2632,4	2237,5	803,6	683,0
7	2770,9	2355,3	665,0	565,3
8	2770,9	2355,3	665,0	565,3
9	2632,4	2237,5	554,2	471,1
10	2632,4	2237,5	554,2	471,1
11	2632,4	2237,5	554,2	471,1
12	2632,4	2237,5	554,2	471,1
13	2632,4	2237,5	554,2	471,1
14	2632,4	2237,5	554,2	471,1
15	2632,4	2237,5	554,2	471,1
16	2632,4	2237,5	554,2	471,1
19	2770,9	2355,3	554,2	471,1
18	2770,9	2355,3	554,2	471,1
19	2632,4	2237,5	554,2	471,1
20	2549,2	2166,8	665,0	565,3
21	2549,2	2166,8	665,0	565,3
22	2272,1	1931,3	803,6	683,0
23	1995,0	1695,8	803,6	683,0
24	1718,0	1460,3	803,6	683,0
Wi	58022,6	49319,2	15988,1	13589,9

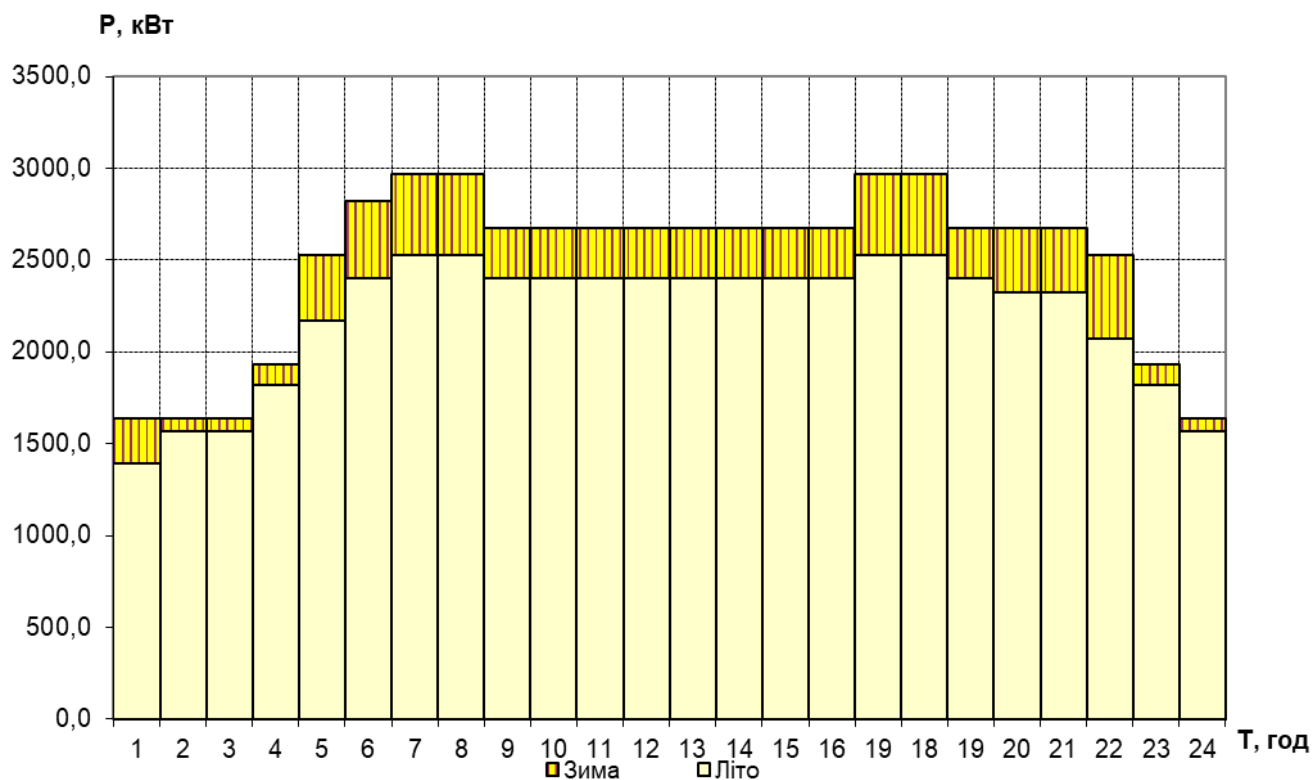


Рис. 1.1. Добове споживання активної потужності в робочий день

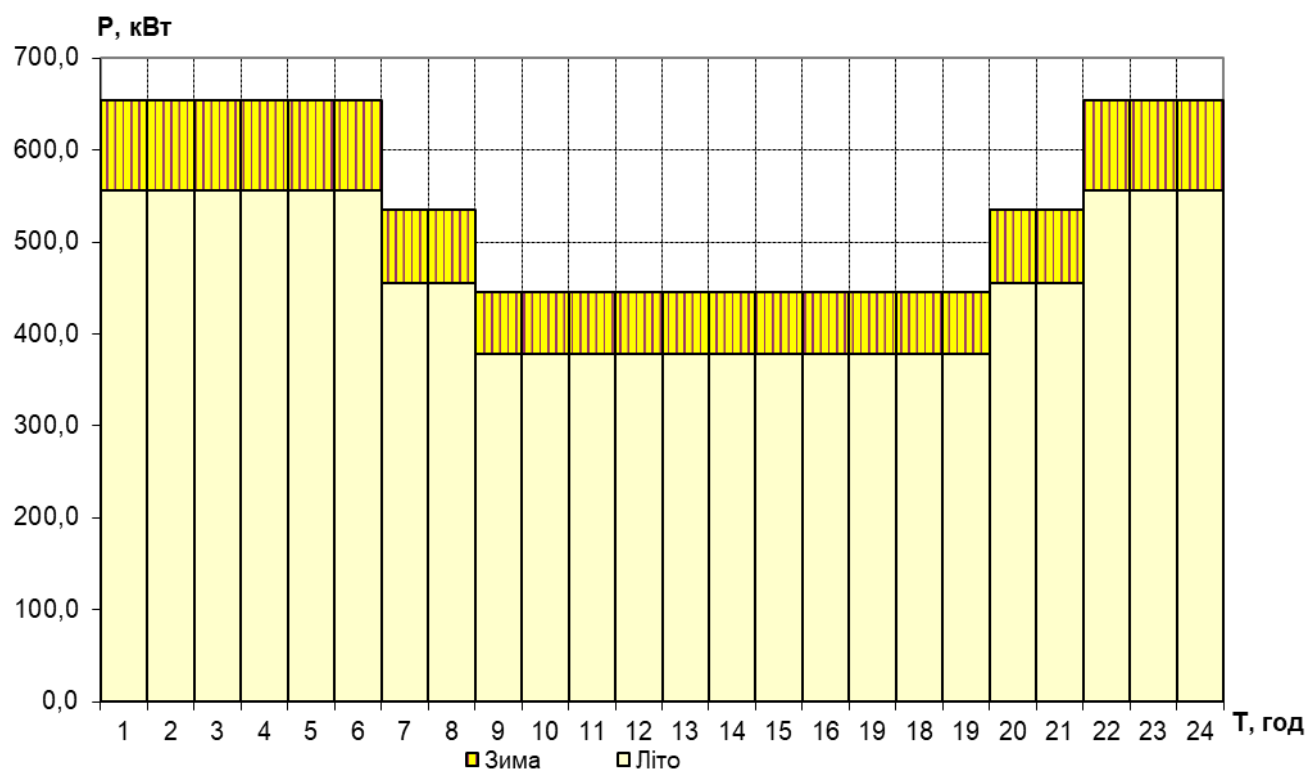


Рис. 1.2. Добове споживання активної потужності у вихідний день

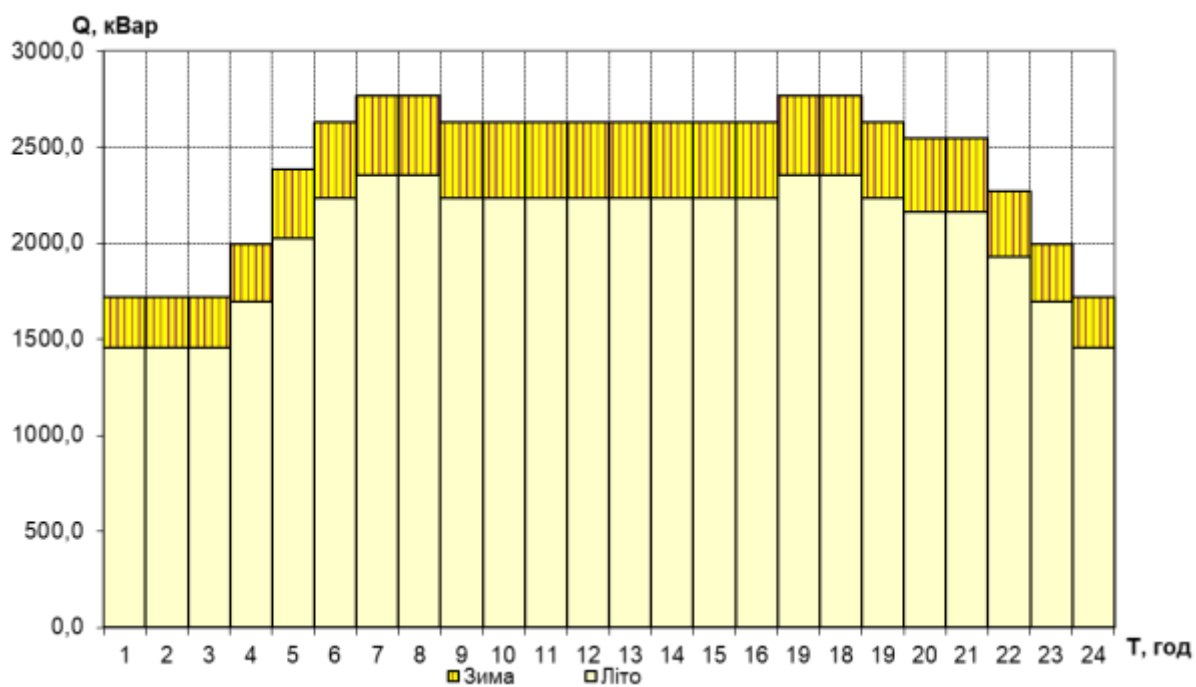


Рис. 1.3. Добове споживання реактивної потужності в робочий день

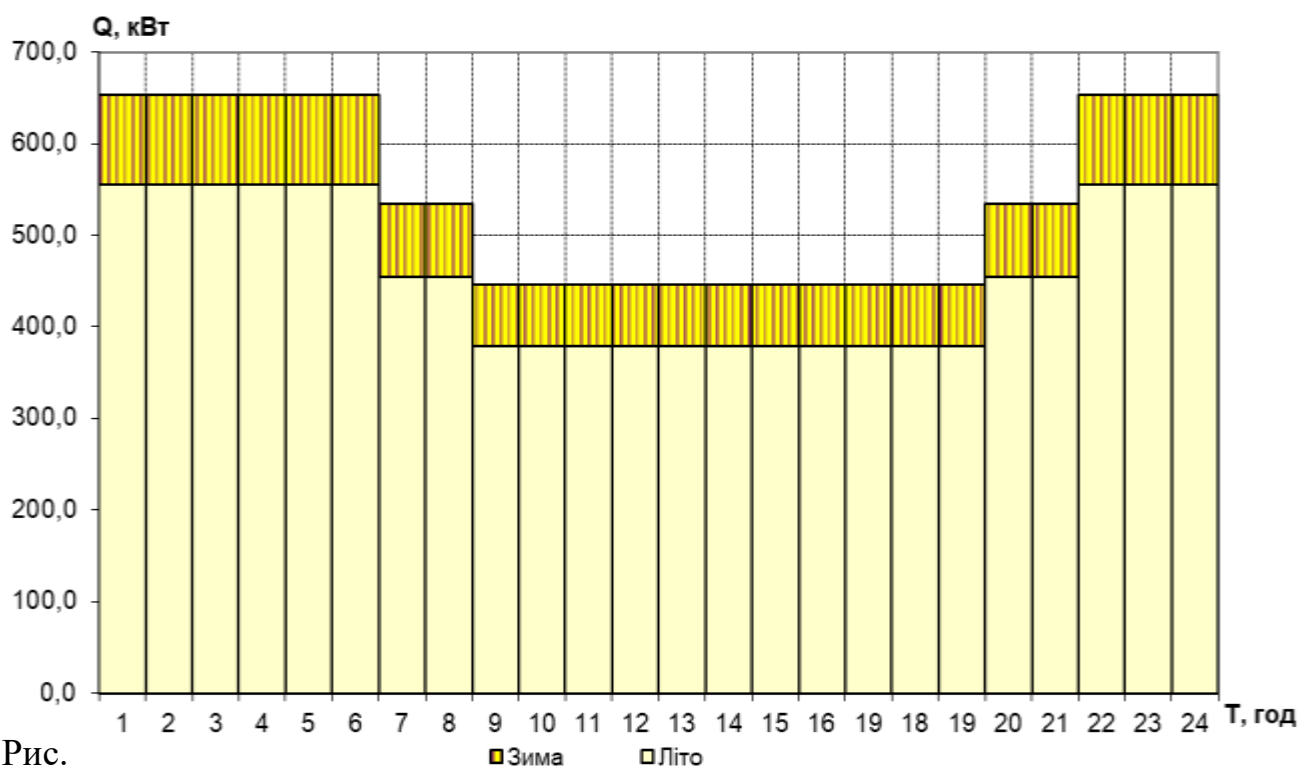


Рис.

1.4. Добове споживання реактивної потужності у вихідний день

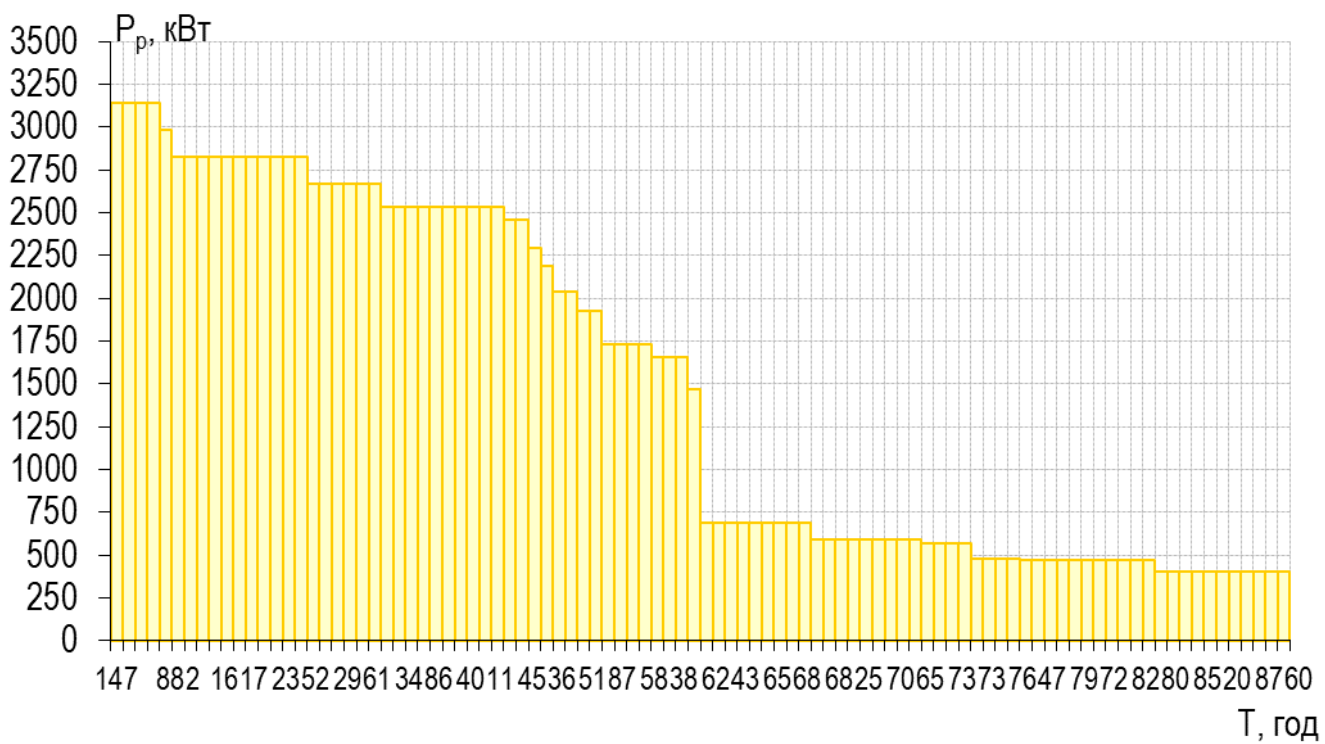


Рис. 1.5. Річне споживання активної потужності

2. ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Ефективне проектування системи електропостачання промислового підприємства вимагає раціонального просторового розміщення головної та цехових трансформаторних підстанцій. З цією метою розраховується та будується картограма електричних навантажень, числові результати якої систематизовано в таблиці 2.1.

На основі отриманих параметрів навантажень та просторових координат окремих цехів (x_i, y_i) на генеральному плані об'єкта аналітичним методом визначається Центр електричних навантажень (ЦЕН).

Графічне відображення картограми та фактичне місцезнаходження знайденого ЦЕН нанесені на креслення генерального плану підприємства, що слугує обґрунтуванням для вибору оптимального місця розташування джерела живлення з метою мінімізації втрат у мережі.

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{517174,10}{2938,5} = 176 \text{ м};$$

$$Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{207520,40}{2938,5} = 70,6 \text{ м}$$

З врахуванням розрахунків місце розташування ЦЕН не можливе за розрахунковими координатами, тому зміщуємо координати ЦЕН в напрямку живлення.

Уточнені координати ЦЕН мають наступні значення:

$$X_0 = 210 \text{ м}; Y_0 = 135 \text{ м}$$

Уточнені координати ЦЕН приймаємо, для подальших розрахунків в проєкті.

						Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Таблиця 2.1. Дані для побудови картограми електричних навантажень та розрахунку умовного центру електричних навантажень

№ по плану	Найменування	$P_{p0,4}$, кВт	$P_{p_{осв}}$, кВт	P_p , кВт	m	R, мм	α	x_i , м	y_i , м	$P_i \cdot x_i$, кВт м	$P_i \cdot y_i$, кВт м
1	Сирцех	886,4	40,0	926,4	0,15	44,34	15,54	289,5	48,0	268193,78	44467,36
2	Цех ЗЦН і сушки сироватки	447,2	412,4	12,0	424,4	0,15	30,01	10,18	58,0	44,0	24615,29
3	Цех цельномолочної продукції	174,7	174,7	13,0	187,7	0,15	19,96	24,93	112,0	43,0	21026,26
4	Станція перекачки конденсату	437,1	437,1	1,2	438,2	0,15	30,49	0,95	167,0	86,0	73180,87
5	Адмінкорпус	180,7	180,7	35,8	216,5	0,15	21,44	59,53	77,0	14,0	16671,99
6	Механічна майстерня	93,0	85,7	3,9	89,6	0,15	13,79	15,59	85,0	104,0	7617,35
7	Компресорна	359,6	296,5	2,3	298,8	0,15	25,18	2,75	107,0	104,0	31973,43
8	Склад готової продукції	14,0	52,8	3,0	55,9	0,15	10,89	19,43	48,0	105,0	2681,45
9	Матеріальний склад	86,0	83,4	3,0	86,5	0,15	13,55	12,58	70,0	105,0	6052,65
10	Мазутна станція	84,4	92,5	2,0	94,6	0,15	14,17	7,77	250,0	70,0	23642,20
11	Котельня	218,6	2,6	221,2	0,15	21,66	4,17	168,0	105,0	37156,74	23222,96
12	КНС	3,0	0,6	3,6	0,15	2,75	58,90	257,0	108,0	918,87	386,14
11	Градірня	218,6	1,0	219,6	0,15	21,59	1,57	12,0	43,0	2634,85	9441,56
12	Прохідна	115,4	0,1	115,5	0,15	15,65	0,27	7,0	5,0	808,36	577,40
	Всього по заводу	2838,3	100,2	2938,5						517174,10	207520,40

$X_0 = 169,68$ м;
 $Y_0 = 63,93$ м.

3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вибір величина напруги живлячих і розподільчих мереж залежить від потужності, спожитої підприємством, його віддаленості від джерела живлення, напруги джерела живлення, кількості одиночної потужності електричних приймачів.

Схеми зовнішнього електропостачання обираються з міркування надійності і економічності. Надійність тієї або іншої схеми визначається залежно від категорії споживача.

Якщо у числі споживачів підприємства мається хоча б один, що відноситься до 1-шої категорії, то кількість джерел живлення повинна бути не менше двох.

Практично при проектуванні систем електропостачання число можливих варіантів обмежується не більше, ніж двома-трьома залежно від існуючих напруг у найближчих можливих точках приєднане до енергосистеми. Можливі варіанти енергопостачання приведені на рис. 3.1.

3.1. *Вибір схем зовнішнього електропостачання*

Оптимальний варіант схеми ел.постачання обирається на основі порівняння приведених витрат.

Розглянемо живлення заводу можливе від підстанції енергосистеми з класами напруги 35 і 10 кВ.

Для порівняння варіантів електропостачання використовуємо два варіанти:

1 варіант – живлення заводу кабельною лінією 10 кВ з встановленням ЦРП.

2 варіант – живлення заводу повітряною лінією 35 кВ з встановленням ГЗП.

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

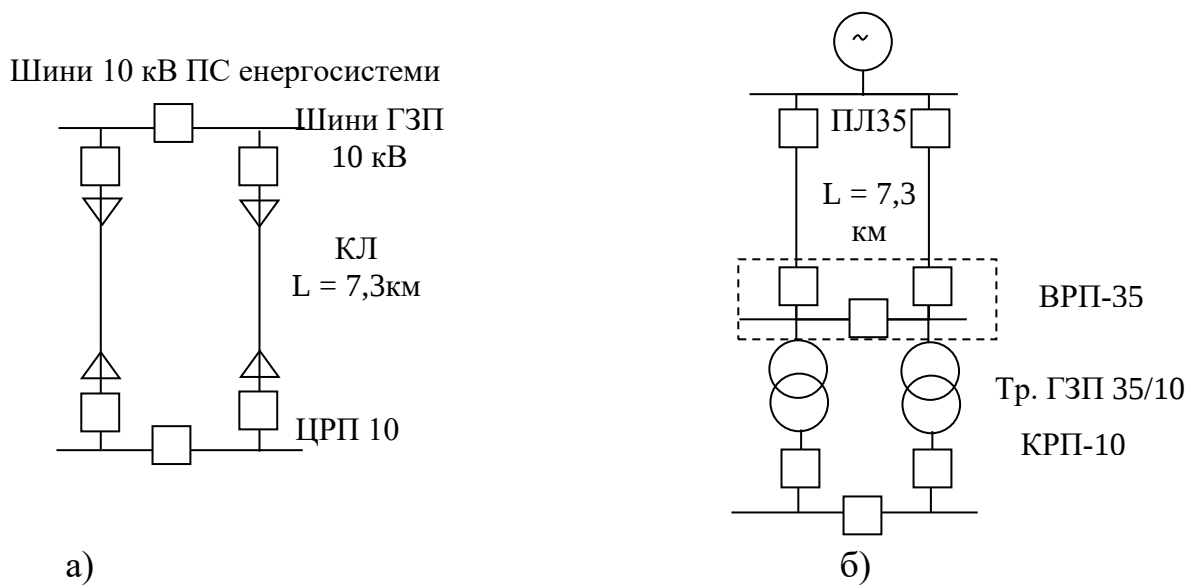


Рис 3.1 Варіанти схеми електропостачання
а- перший варіант; б) другий варіант

Варіант №1.

Живлення споживачів кабельними лініями 10 кВ від шин $U_H = 10$ кВ; відстань від заводу $l = 7,3$ км.

$$I_p = \frac{S_p}{N\sqrt{3}U_H} = \frac{4062,8}{2 \cdot 1,7 \cdot 10} = 117 \text{ А};$$

Площа перерізу кабельної лінії:

$$F_{ек} = I_p / j_{ек} = 117 / 1,1 = 106 \text{ мм}^2$$

де $j_{ек} = 1,1 \text{ А/мм}^2$ – економічна щільність струму при $T_m = 5405$ год

Приймаємо стандартний переріз 120 мм^2 кабеля, марки АСБ–10(3х120). Кількість в лінії $n = 1$. Допустимий тривалий струм $I_{доп} = 240 \text{ А}$, втрати потужності на 1 км $P_{1км} = 18 \text{ кВт/км}$, вартістю $K_0 = 500 \text{ тис.грн/км}$.

Коефіцієнт попереднього завантаження кабеля

$$K_z = I_p / (n \cdot I_{доп}) = 117 / (1 \cdot 240) = 0,48$$

При виході зі строю однієї лінії, інша забезпечить живлення навантаження

$$I_{авар} = n \cdot I_{доп} \cdot K_{а.п} = 1 \cdot 240 \cdot 1,25 = 300 > I_{р.ав} = 234 \text{ А}$$

Втрати потужності та енергії в лінії:

$$\Delta \mathcal{E}_1 = \Delta P_l \cdot \tau = 60,55 \cdot 3869 = 234267,95 \text{ кВт•год}$$

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	30

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{1км}} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_3^2 = 18 \cdot 14,6 \cdot 0,48^2 = 60,55 \text{ кВт.}$$

Сумарна довжина кабельної лінії

$$l_{\Sigma} = 1 \cdot n_{\text{л}} = 2 \cdot 7,3 = 14,6 \text{ км}$$

$n_{\text{л}}$ - кількість кабельних ліній в одному ланцюгу, шт

$$C_{\text{втрат}} = \Delta \mathcal{E}_1 \cdot C_0 = 234267,95 \cdot 8,6 = 2\,014\,704,37 \text{ грн} = 2014,7 \text{ тис. грн.}$$

де $C_0 = 8,6$ – вартість 1 кВт·год електроенергії.

Варіант №2. Живлення заводу напругою 35 кВ від двох окремо працюючих трансформаторів. Відстань до заводу 7,3 км. Схема зображена на рисунку 5.1(б).

Розрахунковий струм в лінії:

$$I_p = \frac{S_p}{N \sqrt{3} U_{\text{н}}} = \frac{4062,8}{2 \cdot 1,73 \cdot 35} = 33,5 \text{ мм}^2$$

Площа перерізу проводів повітряної лінії, вибрана по економічній щільності струму:

$$F_{\text{ек}} = I_p / j_{\text{ек}} = 33,5 / 1 = 33,5 \text{ мм}^2$$

Обираємо ЛЕП з проводами марки АС 70/11, лінія перерізом 70 мм².
Параметри на один ланцюг: $P_{\text{1км}} = 44,43 \text{ кВт/км}$; $I_{\text{доп}} = 265 \text{ А}$; $K_0 = 1500 \text{ тис. грн/км}$.

На ГПП Обираємо трансформатор типу ТМН-2500/35 з параметрами $P_{\text{к}} = 23,5 \text{ кВт}$; $P_{\text{xx}} = 5,1 \text{ кВт}$; $U_{\text{кз}} = 6,5 \%$.

Завантаження трансформаторів в нормальному режимі:

$$K_3 = 4062,8 / (2 \cdot 2500) = 0,81$$

При відключенні одного трансформатора інший зможе забезпечити живлення навантаження

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		31

$$S = 1,4 \cdot S_{н.тр.} = 1,4 \cdot 2500 = 3500 \text{ кВА}$$

Втрати потужності та енергії в лінії:

$$\Delta \mathcal{E}_1 = \Delta P_{л} \cdot \tau = 9,34 \cdot 3869 = 36140,18 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$\Delta P_{л} = \Delta P_{1км} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_3^2 = 44,43 \cdot 14,6 \cdot 0,12^2 = 9,34 \text{ кВт}$$

Сумарна довжина кабельної лінії

$$l_{\Sigma} = l \cdot n_{л} = 7,3 \cdot 2 = 14,6 \text{ км}$$

Втрати енергії в трансформаторах:

$$\Delta \mathcal{E}_{тр} = 2 \cdot (P_x \cdot t_{вкл} + P_K \cdot \tau \cdot K_3^2) = 2(5,1 \cdot 8760 + 24 \cdot 3869 \cdot 0,81^2) = 194220,76$$

Сумарні втрати енергії:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_1 + \Delta \mathcal{E}_{тр} = 36140,18 + 194220,76 = 228360,94 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість втрат енергії:

$$C_{пот} = \Delta \mathcal{E} \cdot C_0 = 228360,94 \cdot 6,73 = 1536869,14 \text{ грн} = 1536,9 \text{ тис. грн}$$

де C_0 – вартість 1 кВт·год електроенергії; згідно з діючими тарифами $C_0 = 6,73$ грн/кВт·год.

Розрахунок капітальних вкладень та експлуатаційних витрат наведена на таблицях 3.1-3.2.

Таблиця 3.1. Розрахунок спрощених капітальних вкладень по варіантах

№ п/п	Найменування об'єкту	Одиниця	Кількість	Вартість одиниці, тис грн	Вартість всього, тис. грн
I варіант	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ, що додатково встановлюються на підстанції	шт	2	250,16	500,32
	Кабельна лінія типу АШШв-10 (3×95)	км	14	480	6720
	Траншея	км	7,07	160	1131,2
	Всього				8351,52
II варіант	Дволанцюгова повітряна лінія напругою 35 кВ	км	7	1500	10500
	Відкритий розподільчий пристрій 35/10 кВ	шт	1	750	750
	Трансформатори ГЗП ТМН-2500 /35	шт	2	950	1900
	Всього				13150

Таблиця 3.2. Розрахунок поточних витрат

№ п/п	Найменування об'єкту	Кі, тис грн	Р _а , %	С _а , %	Р _е , %	С _е , %	С _п , тис грн
I варіант	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ, що додатково встановлюються на підстанції	500,32	15	75,048	5	25,016	100,064
	Кабельна лінія типу АШШв-10 (3×95)	6720	5	336	5	336	672
	Траншея	1131,2	5	56,56	5	56,56	113,12
	Всього						885,184
II варіант	Дволанцюгова повітряна лінія напругою 35	10500	5	525	5	525	1050
	Відкритий розподільчий пристрій 35	750	15	112,5	5	37,5	150
	Трансформатори ГЗП ТМН-2500/35	1900	15	285	5	95	380
	Всього						1580

Таблиця 3.3. Приведені витрати по варіантам СЕПП, тис. грн

№ п/п	Найменування статті	Варіант I	Варіант II
1	Капіталовкладення у варіанти	8351,52	13150
2	Поточні витрати	885,184	1580
3	Вартість втрат електроенергії	2014,7	1536,9
4	Збиток	116,0	61,27
5	Приведені витрати	4018,0	4756,17

Як видно з розрахунків за економічними показниками варіанти практично рівноцінні. Отже і приймаємо варіант живлення 10 кВ для подальшого проектування.

5.2. Вибір напруг та схем внутрішнього електропостачання

Для внутрішніх розподільчих мереж заводу використовуємо напругу 10 кВ. Розподільну мережу виконуємо зі застосуванням радіальної схеми електропостачання, що має більшу надійність у порівнянні з магістральною схемою електропостачання.

В цехових розподільчих мережах для живлення силових і освітлювальних електроприймачів використовуємо напругу 380/220 В.

4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

З метою мінімізації технологічних втрат електроенергії в силових трансформаторах, кабельних лініях та інших елементах системи електропостачання, а також для оптимізації їх номінальних параметрів, застосовується компенсація реактивної потужності (КРП). Основними технічними засобами КРП виступають синхронні електродвигуни та конденсаторні установки (КУ). При цьому допускається, що певна частка реактивної енергії може покриватися безпосередньо з боку зовнішньої енергосистеми.

4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв

Вибір оптимальної кількості, одиничної потужності та топології розміщення компенсувальних пристроїв здійснюється на основі техніко-економічного порівняння альтернативних варіантів. Головним критерієм економічної доцільності обраного рішення є досягнення мінімуму приведених витрат.

Розрахунок приведених витрат на компенсацію реактивної потужності виконується за цільовою функцією:

$$Z = E_n (K_{кн} + K_{кв} + K_{ктп}) + (\Delta P_{кн} + \Delta P_{кв} + \Delta P_{тп}) \cdot C_0 \cdot \tau, \quad (4.1)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень; $K_{кн}$, $K_{кв}$, $K_{ктп}$ – вартість конденсаторних установок та цехових КТП; $\Delta P_{кн}$, $\Delta P_{кв}$, $\Delta P_{тп}$ – витрати активної потужності КУ та КТП; C_0 – вартість електроенергії.

Розрахунок економічної доцільності впровадження компенсувальних пристроїв (КП) з урахуванням нових вихідних даних (вартість електроенергії 8,6 грн/кВт*год та оновлені ціни на КТП).

Сумарне споживання активної та реактивної потужності по заводу:

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

$$P_p = P_v + P_n + \Delta P_{тр} = 0 + 2938,5 + 32,8 = 2971,3 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_v + Q_n + \Delta Q_{тр} = 0 + 2502,8 + 268,1 = 2770,9 \text{ квар}$$

Економічно доцільна потужність, що може бути передана від енергосистеми (при $tg\phi_3 = 0,15$):

$$Q_e = P_p \cdot tg\phi_3 = 2971,3 \cdot 0,15 = 445,7 \text{ квар}$$

Сумарна потужність компенсувальних пристроїв з умови балансу:

$$Q_{ку} = Q_p - Q_e = 2770,9 - 445,7 = 2325,2 \text{ квар}$$

Для розрахунку розглядаємо три конфігурації кількості трансформаторів $N=8$, $N=9$ та $N=10$.

Варіант I: $N = 8$ шт,

(2 однотрансформаторні та 3 двотрансформаторні КТП, $K_3 = 0,7$)

Реактивна потужність, яку можна передати в мережу 0,4 кВ:

$$Q_{п_max} = \sqrt{(N \cdot S_{нтр} \cdot K_3)^2 - P_n^2} = \sqrt{(8 \cdot 630 \cdot 0,7)^2 - 2938,5^2} = 1952,4 \text{ квар}$$

Необхідна потужність КП у мережі 0,4 кВ:

$$Q_{кн} = Q_n - Q_{п_max} = 2502,8 - 1952,4 = 550,4 \text{ квар}$$

Приймаємо до встановлення стандартизовані низьковольтні батареї загальною потужністю $Q_{кн} = 707$ квар,

Фактична реактивна потужність через трансформатори:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		35

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{кн}} = 2502,8 - 707 = 1895,8 \text{ квар}$$

Необхідна потужність КП у мережі 10 кВ:

$$Q_{\text{кв}} = Q_{\text{р}} - Q_{\text{кн}} - Q_{\text{е}} = 2770,9 - 707 - 445,7 = 1618,2 \text{ квар}$$

Приймаємо до встановлення високовольтні батареї $Q_{\text{кв}} = 1800$ квар,

Втрати потужності:

$$\Delta P_{\text{тп}} = Q_{\text{п}}^2 \cdot \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{N \cdot S_{\text{нтр}}^2} = 1895,8^2 \cdot \frac{6,5}{8 \cdot 630^2} = 7,41 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{кв}} = 0,0045 \cdot Q_{\text{кв}} = 0,0045 \cdot 1800 = 8,1 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{кн}} = 0,003 \cdot Q_{\text{кн}} = 0,003 \cdot 707 = 2,3 \text{ кВт}$$

Капітальні витрати:

$$K_{\text{ктп}} = 2 \cdot 550 + 3 \cdot 1050 = 4250 \text{ тис, грн}$$

Орієнтовна вартість КП: $K_{\text{кн}} \approx 18,5$ тис, грн, $K_{\text{кв}} \approx 40,2$ тис, грн,

Приведені витрати:

$$\begin{aligned} 3_1 &= 0,12 \cdot (18,5 + 40,2 + 4250) + (2,3 + 8,1 + 7,41) \cdot 33,3 = \\ &= 517,04 + 576,42 = 1093,46 \text{ тис, грн} \end{aligned}$$

Розрахунки для інших варіантів конфігурації тотожні. Результати розрахунку зводимо до таблиці 4.1

Таблиця 4.1. Зведена таблиця результатів

Показники	Варіант I (N=8)	Варіант II (N=9)	Варіант III (N=10)
Потужність КП в мережі 0,4 кВ, квар	707	0	0
Потужність КП в мережі 10 кВ, квар	1800	2400	2400
Споживання реактивної потужності (від системи), квар	445,7	445,7	445,7
Всього компенсовано, квар	2845,7	2845,7	2845,7
Капітальні витрати на КТП, тис, грн	4250	4750	5250
Приведені витрати (3), тис, грн	1093,46	1315,68	1337,72

Завдяки значному тарифу на електроенергію 8,6 грн/кВт·год питома вага експлуатаційних витрат на покриття втрат зросла. Однак, капітальні витрати на закупівлю додаткових трансформаторів також є високими. Тому Варіант I (N=8, з комбінованою компенсацією на обох рівнях напруги) залишається найбільш економічно вигідним рішенням із мінімальними приведеними витратами.

4.2. Вибір кількості, потужності та місяця розташування компенсуючих пристроїв

Визначаємо значення реактивної потужності, яке необхідно скомпенсувати в мережі 0,4 кВ на ТП 1,2:

Пропускна потужність трансформаторів ТП 1,2:

$$Q_n = \sqrt{(n \cdot S_m \cdot K_s)^2 - P_n^2} = \sqrt{(3 \cdot 630 \cdot 0,7)^2 - 1088^2} = 752 \text{ квар}$$

$$1088,6 \quad 1084,6$$

$$Q_{\text{кп}} = Q_n - Q_{\text{п}} = 1084 - 752 = 332 \text{ квар}$$

Приймаємо до встановлення $Q_{\text{кп}} = 332$ квар

2 батареї типу КРМ – 0,4 – 116 – 37,5У3

Аналогічно проводимо інші розрахунки для інших ТП. В таблиці 4.3 виконаний розрахунок електричних навантажень в мережі вище 1000 В з урахуванням вибраних компенсуючих пристроїв для кожної ТП.

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

Таблиця 4.3. Розрахунок електричних навантажень з урахуванням компенсуючих пристроїв

№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів		Кількість ел. споживачів	Встановлена потужність,				m	Кв	cos	tg	Середнє навантаження за зміну		P _{еф}	K _м	Розрахункова потужність		
				Одного			Сумарна									P _{ср}	Q _{ср}	P _p
1	2		3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	ТП№1,2																	
	Всього по	ТП№1,2																
	силова		241	1	-	62,8	2301,05	62,8	0,4	0,65	1,17	915,035	1073,617	73	1,2	1054,3	1073,6	1504,7
	освітлювальна															34,3	11,0	
	Всього															1088,6	1084,6	1536,7
	БСК																-332,0	
	З урахуванням БСК															1088,6	752,6	
	Втрати в трансформаторі S _{н.тр} = 630		3													11,5	97,7	
	Всього на шинах 10 кВ	ТП№1,2														1100,1	850,3	1390,4
	ТП№ 3																	
	Всього по	ТП№ 3																
	силова		278	0,08	-	113	1322,135	1413	0,47	0,78	0,81	615,764	499,6746	23	1,2	768,2	499,7	916,4
	освітлювальна															48,6	15,6	
	Всього															816,9	515,2	965,8
	БСК																-100,0	
	З урахуванням БСК															816,9	415,2	
	Втрати в трансформаторі S _{н.тр} = 630		2													9,0	70,1	
	Всього на шинах 10 кВ	ТП№ 3														825,9	485,4	825,9
	ТП№4																	
	Втрати в трансформаторі S _{н.тр} = 630		1													5,0	36,7	
	Всього на шинах 10 кВ	ТП№4														443,1	91,2	443,1
	ТП№ 5																	
	Всього по	ТП№ 5																

продовження таблиці 4.3.

1	2		3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	силова		208	0,5	-	37	1210,15	74	0,51	0,72	0,96	615,583	590,4838	65	1,1	691,7	590,5	909,4
	освітлювальна															7,1	2,3	
	Всього															698,7	592,7	916,3
	БСК																-50,0	
	з урахуванням БСК															698,7	542,7	
	Втрати в трансформаторі Sn.тр=	630	2													7,3	63,6	
	Всього на шинах 10 кВ	ТП№ 5														706,0	606,4	706,0
	Всього по заводу																	
	силова		782	0,08	-	113	5436,435	1413	0,47	0,72	0,97	2558,38	2470,751	96	1,1	2838,3	2470,8	3763,1
	освітлювальна															100,2	32,1	
	Всього															2938,5	2502,8	3859,9
	Компенсуючі пристрої																-707	
	Всього з врахуванням КП-0,4															2938,5	1795,8	2938,5
	Втрати в трансформаторах		8													32,8	268,1	
	Всього по заводу															2971,3	2063,9	3617,8
	Компенсуючі пристрої 10 кВ																-1800	
	Всього на шинах 10 кВ															2971,3	263,9	2983,0

5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ, ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ І ПІДСТАНЦІЙ ПІДПРИЄМСТВА

5.1. Вибір кількості, потужності та місця розташування цехових трансформаторів

Вибір оптимальних локацій для встановлення центральних розподільних пунктів (ЦРП), розподільних пунктів (РП) та трансформаторних підстанцій (ТП) базується на просторовому розподілі та специфіці електричних навантажень згідно з генеральним планом підприємства. Пріоритетним рішенням є інтеграція цехових підстанцій безпосередньо у виробничі приміщення або використання прибудованих конструкцій (якщо внутрішній монтаж є технологічно неможливим). Проектування окремо розташованих підстанцій допускається виключно за наявності вагомого техніко-економічного обґрунтування.

Визначення номінальної потужності силових трансформаторів для цехових підстанцій продемонструємо на прикладі ТП №1 та №2. Розрахункова потужність апарата з урахуванням умов резервування обчислюється за формулою:

$$S_{\text{тр.п}} = \frac{S_p}{1.4(n-1)} = \frac{1390.4}{1.4(3-1)} = 492 \text{ кВА}$$

Орієнтуючись на стандартизовану шкалу потужностей, до встановлення приймаємо найближчий більший номінал — силовий трансформатор типу ТМ-630/10 у складі комплектної трансформаторної підстанції (КТП 10/0,4) виробництва Хмельницького заводу трансформаторних підстанцій.

Коефіцієнт завантаження обладнання у нормальному експлуатаційному режимі становить:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{тр}}} = \frac{1390.4}{3 \cdot 630} = 0.73$$

Для забезпечення надійної роботи в аварійному режимі передбачається примусове відключення електроприймачів III категорії надійності із сумарною потужністю 8 кВА.

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

За ідентичною методикою виконано обчислення параметрів для решти цехових підстанцій, підсумкові показники яких систематизовано в таблиці 5.1. Зважаючи на симетричність технологічних навантажень у межах виробничих площ, просторове розміщення ТП на території цехів прийнято максимально рівномірним.

Таблиця 5.1 Вибір потужності та місця розташування цехових ТП

№ ТП	Р _р , кВт	Q _р , кВар		S _р , кВА		п×S _{тр} , кВА	К _з	Вид ТП	Місце розташування ТП
		без КП	з КП	без КП	з КП				
ТП-1,2	1088,6	1084,6	751,8	1536,7	1323,4	3х630	0,70	Вбудов.	Сирцех
ТП-3	816,85	515,2	332,7	965,8	916,3	2х630	0,73	Вбудов.	Цех сушки сироватки
ТП-4	438,09	279,5	50,5	519,7	519,7	1х630	0,82	Вбудов.	Станція конденсату
ТП-5	698,72	592,7	538,2	916,3	884,8	2х630	0,70	Вбудов.	Компресорна

6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

У розділі розглядається розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) у системі промислового електропостачання, яка є фундаментальною умовою для техніко-економічного вибору, перевірки стійкості електрообладнання та налаштування параметрів релейного захисту й автоматики.

Базовим завданням описаної методики є визначення трьох ключових характеристик аварійного режиму: початкового надперехідного (I''), максимального ударного ($i_{уд}$) та усталеного (I_{∞}) струмів. Розрахункова схема заводу наведена на рис. 6.1.

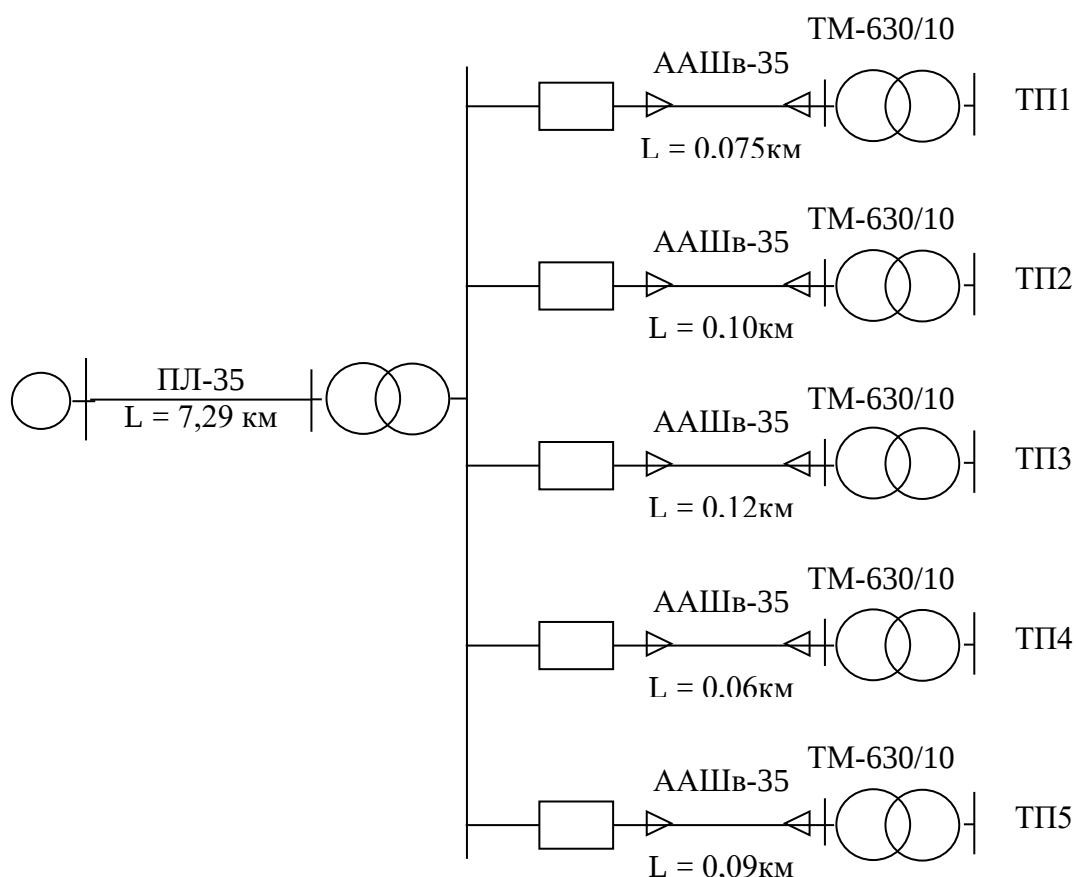


Рисунок 6.1: Розрахункова схема СЕПП

Основою розрахункового алгоритму є метод відносних одиниць, реалізований через чітку послідовність дій. Процедура включає розробку розрахункової схеми та еквівалентної схеми заміщення, вибір системи базисних величин (потужності та напруг) із подальшим приведенням до них опорів усіх елементів електричної мережі.

Шляхом математичного згортання схеми обчислюються результуючі активні та індуктивні опори ($R_{рез}$, $X_{рез}$), що дозволяє врахувати вплив затухання аперіодичної складової сталої часу (T_a) та аналітично визначити кінцеві значення струмів КЗ для заданої точки системи.

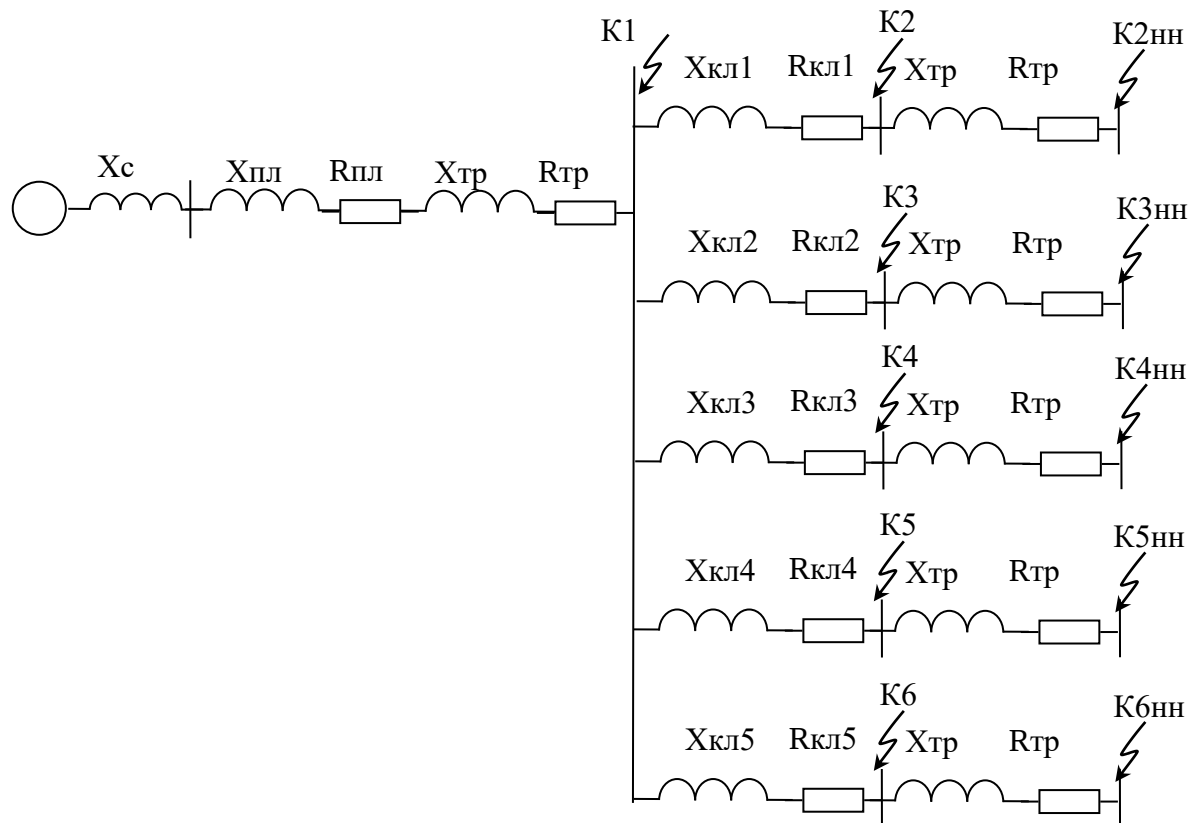


Рис. 6.2. Схема заміщення

Виконуємо приклад розрахунку струмів КЗ для ТП1, результати розрахунку інших точок схеми при ведені в таблиці 6.1.

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

Перед розрахунком струмів к.з. складається розрахункова схема, по якій визначають точки, в яких необхідно розрахувати струми к.з. (рис. 6.1).

По розрахунковій схемі складається схема заміщення, на якій всі елементи представлені у вигляді опорів (рис. 6.2).

Проведемо розрахунок опорів елементів схеми.

Система:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з.}} = \frac{10,5^2}{112} = 0,984 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{R_c}{25} = \frac{0,984}{25} = 0,039 \text{ Ом}$$

Кабельна лінія 1 х АСБ (3 х 120):

$$R_{кл} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,258 \cdot 7,3}{1} = 1,8834 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0,081 \cdot 7,3}{1} = 0,59 \text{ Ом}$$

Результуючий опір до точки К₁:

$$X_{K1} = X_c + X_{кл} = 0,984 + 0,59 = 1,574 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{кл} = 0,039 + 1,8834 = 1,922 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{1,922^2 + 1,574^2} = 2,484 \text{ Ом}$$

Надперехідний струм в точці К₁ (від системи):

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{ср.ном.}}{\sqrt{3} Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,484} = 2,44 \text{ кА}$$

Стала часу в точці К₁:

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

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{1,574}{314 \cdot 1,922} = 0,0026 \text{ с}$$

Ударний струм в точці К₁:

$$k_{y\partial 1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0026}} = 1,021$$

Ударний струм в точці К₁ від системи:

$$i_{y\partial 1(c)} = \sqrt{2} k_{y\partial} I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,021 \cdot 2,44 = 3,52 \text{ кА}$$

Для подальшого розрахунку струмів к.з. необхідно вибрати кабелі до цехових підстанцій та високовольтного навантаження. Виконаємо вибір кабеля від шин 10 кВ ЦРП до ТП-1. Інші кабелі вибираються аналогічно. Результати вибору кабельних ліній 10 кВ заводської мережі приведені в таблиці 6.2.

Розрахунковий струм кабельної лінії:

$$I_p = \frac{S_p}{n \sqrt{3} U_{ср.ном}} = \frac{1076,6}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 29,6 \text{ А}$$

Площа поперечного перерізу кабельної лінії:

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}} = \frac{29,6}{1,2} = 24,67 \text{ мм}^2$$

Тепловий імпульс від струму к.з.:

$$B_k = I_{K1}''^2 (t_{p.з.min} + T_a) = 2,44^2 (1,365 + 0,0026) = 8,14 \text{ кА}^2\text{с}$$

Мінімальний переріз кабельної лінії за умовою термічної стійкості:

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

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_{\kappa}} = \frac{1}{94} \sqrt{8,14} \cdot 10^3 = 30,35 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель марки ААШВ - (3 х 35).

Технічні дані кабелю:

$$r_0 = 0,89 \text{ Ом/км}$$

$$x_0 = 0,095 \text{ Ом/км}$$

$$I_{\text{дон}} = 115 \text{ А}$$

Опір кабельної лінії:

$$R_{\kappa\lambda} = r_0 \cdot l_{\kappa\lambda} = 0,89 \cdot 0,075 = 0,067 \text{ Ом}$$

$$X_{\kappa\lambda} = x_0 \cdot l_{\kappa\lambda} = 0,095 \cdot 0,075 = 0,007 \text{ Ом}$$

Параметри інших кабельних ліній 10 кВ приведені в таблиці 6.1.1.

Результуючий опір до точки К₂:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{\kappa\lambda} = 1,574 + 0,007 = 1,581 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{\kappa\lambda} = 1,922 + 0,067 = 1,989 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{1,989^2 + 1,581^2} = 2,541 \text{ Ом}$$

Надперехідний струм в точці К₂:

$$I''_{K2} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,541} = 2,39 \text{ кА}$$

Стала часу в точці К₂:

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{1,581}{314 \cdot 1,989} = 0,0025 \text{ с}$$

Ударний струм в точці К₂:

$$k_{y\partial 2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0025}} = 1,018$$

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

Ударний струм в точці К₂:

$$i_{y\partial 2} = \sqrt{2} k_{y\partial} I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,018 \cdot 2,39 = 3,44 \text{ кА}$$

Опір цехового трансформатора (ТМ-630/10/0,4):

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{\kappa} U_{cp.ном}^2}{S_{ном}^2} = \frac{6,5 \cdot 10,5^2}{630^2} \cdot 10^3 = 1,806 \text{ Ом}$$

$$X_{mp} = \frac{U_{\kappa, \%} U_{cp.ном}^2}{S_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{630} \cdot 10 = 9,625 \text{ Ом}$$

Результуючий опір до точки К₃ (приведений до сторони 0,4 кВ):

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (1,581 + 9,625) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0163 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{mp}) \left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}} \right)^2 = (1,989 + 1,806) \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0055 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0055^2 + 0,0163^2} = 0,0172 \text{ Ом}$$

Надперехідний струм в точці К₃:

$$I''_{K3} = \frac{U_{cp.ном}}{\sqrt{3} Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0172} = 13,43 \text{ кА}$$

Стала часу в точці К₃:

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega R_{K3}} = \frac{0,0163}{314 \cdot 0,0055} = 0,0094 \text{ с}$$

Ударний струм в точці К₃:

$$-0,01 \quad \underline{\underline{-0,01}}$$

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

$$k_{y\partial 3} = 1 + e^{\overline{T_{a3}}} = 1 + e^{\overline{0,0094}} = 1,345$$

Ударний струм в точці К₃:

$$i_{y\partial 3} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,345 \cdot 13,43 = 25,55 \text{ кА}$$

Струми к.з. в інших точках СЕП розраховуються аналогічно. Результати розрахунку приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Результати розрахунку струмів к.з.

№ точки к.з.	R, Ом	X, Ом	I_K'' , кА	T_a , с	$k_{y\partial}$	$i_{y\partial}$, кА
1	1,9220	1,5740	2,44	0,0026	1,021	3,52
2	1,9890	1,5810	2,39	0,0025	1,018	3,44
3	0,0055	0,0163	13,43	0,0094	1,345	25,55
4	2,0110	1,5840	2,37	0,0025	1,018	3,41
5	0,0055	0,0163	13,43	0,0094	1,345	25,55
6	1,9960	1,5850	2,38	0,0025	1,018	3,43
7	0,0055	0,0163	13,43	0,0094	1,345	25,55
8	1,9590	1,5790	2,41	0,0026	1,021	3,48
9	0,0055	0,0163	13,43	0,0094	1,345	25,55
10	1,9780	1,5820	2,39	0,0025	1,018	3,44
11	0,0055	0,0163	13,43	0,0094	1,345	25,55

6.1. Вибір кабелів напругою 10 кВ для високовольтної мережі заводу

У представленому підпункті розглядається вибір та розрахункова перевірка перерізу струмопровідних жил кабельних ліній відповідно до чинних нормативних вимог (ПУЕ).

Описаний алгоритм базується на послідовному застосуванні трьох ключових техніко-економічних критеріїв. Базовим етапом є визначення оптимального стандартизованого перерізу за умовою економічної щільності струму.

Наступним кроком є перевірка обраного кабелю на здатність витримувати тривале струмове навантаження (за умовами нагрівання) у нормальному та післяаварійному експлуатаційних режимах.

При цьому враховуються системні поправкові коефіцієнти, що залежать від кількості кабелів у спільній траншеї та допустимих перевантажень. Заключною умовою надійності виступає перевірка мінімально допустимого перерізу на термічну стійкість до дії струмів короткого замикання на основі розрахункового теплового імпульсу.

Описаний алгоритм є обґрунтуванням для розрахунку та вибору живильної кабельної лінії напругою 10 кВ від центрального розподільного пристрою напругою 10 кВ до цехової трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ.

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

Проведемо вибір КЛ 10 кВ від шин 10 кВ ЦРП до ТП1.

Розрахунковий струм:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{cp.ном}} = \frac{1076,6}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 29,6 \text{ А}$$

Площа поперечного перерізу КЛ-1 (при $T_{max} = 5504$ год. $j_{ек} = 1,2 \text{ А/мм}^2$).

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}} = \frac{29,6}{1,2} = 24,67 \text{ мм}^2$$

Приймаємо до встановлення КЛ марки ААШв - 2 х (3 х 35) з доп. струмом $I_{доп} = 115 \text{ А}$.

Перевірка кабеля за допустимим струмовим навантаженням:

$$I_p = 29,6 \text{ А} \leq K_n \cdot I_{дон} = 0,9 \cdot 115 = 103,5 \text{ А}$$

Перевірка кабеля за умовою роботи в аварійному режимі:

$$I_{ав} = 59,2 \text{ А} \leq K_{ан} \cdot K'_n \cdot I_{дон} = 1,35 \cdot 1 \cdot 115 = 155,25 \text{ А}$$

Тепловий імпульс:

$$B_k = I_{K1}^2 (t_{p.з. min} + T_a) = 2,44^2 (1,365 + 0,0026) = 30,35 \text{ кА}^2\text{с}$$

Мінімальна площа поперечного перерізу КЛ за умовою термічної стійкості:

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{8,14 \cdot 10^3} = 30,35 \text{ мм}^2$$

Результати вибору інших КЛ 10 кВ приведені в таблиці 6.2.

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

Таблиця 6.2. Вибір кабельних ліній 10 кВ заводської мережі

$N_{\text{жЛ}}$	n	$S_p, \text{МВА}$	$I_p, \text{А}$	$I_{p.\text{ав.}}, \text{А}$	$F_{\text{ек}}, \text{мм}^2$	$B_k, \text{кА}^2\text{с}$	$F_{\text{min}}, \text{мм}^2$	Марка кабеля	$I_{\text{доп}}, \text{А}$	K_n	$K_n I_{\text{доп}}, \text{А}$	$K_{\text{ан}}$	K'_n	$K_{\text{ан}} K'_n I_{\text{доп}}, \text{А}$
1	1	4062,8	223,4	-	186,17	8,14	30,35	1 х АСБ-10(3 х 120)	240	1	240	-	-	-
2	2	1076,6	29,6	59,2	24,67	8,14	30,35	2 х ААШВ-10(3х35)	115	0,9	103,5	1,35	1	155,25
3	1	1614,9	88,8	-	74	8,14	30,35	1 х ААШВ-10(3х35)	115	1	115	-	-	-
4	2	1012,3	27,83	55,66	23,19	8,14	30,35	2 х ААШВ-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
5	1	544,4	29,93	-	24,94	8,14	30,35	1 х ААШВ-10(3х50)	140	1	140	-	-	-
6	2	964	26,5	53	22,08	8,14	30,35	2 х ААШВ-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189

6.2. Вибір електричних апаратів високої напруги

В ЦРП 10 кВ доцільно використовувати вимикачі вбудовані в комірки комплектних розподілюючих пристроїв. Це можуть бути вакуумні і вимикачі вітчизняних заводів високовольтної апаратури.

На стороні НН від ГЗП до ТП оберемо вакуумний вимикач заводу РЗВА типу ВР1-10-20/630У2. Вакуумні вимикачі серії ВР1 призначені для роботи в КРУ серії КУ-10Ц.

Надійний захист електрообладнання підстанцій від атмосферних (грозових) та внутрішніх (комутаційних) перенапруг забезпечується шляхом встановлення нелінійних обмежувачів перенапруги (ОПН).

Для захисту обладнання розподільного пристрою напругою 10 кВ обрано сучасний обмежувач перенапруги в полімерному корпусі типу ОПН-п-10. Цей апарат призначений для глибокого обмеження амплітуди комутаційних і грозових імпульсів, забезпечуючи високоефективний захист ізоляції електрообладнання підстанцій змінного струму. В ЦРП до встановлення приймається нелінійний обмежувач типу ОПН-п-10. Технічні характеристики:

Номінальна напруга мережі: 10 кВ
Найбільша тривало допустима робоча напруга ($U_{\text{нрд}}$): 12,7 кВ.
Номінальний розрядний струм (грозовий імпульс 8/20 мкс): 10000 А (10 кА)

Зазначені параметри повністю відповідають сучасним вимогам щодо координації ізоляції електроустановок.

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

Таблиця 6.3. Вибір вимикачів на вводі напругою 10 кВ

Параметр вимикача	Умова вибору	Розрахунок
Номінальна напруга, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 10$
Довготривалий струм, кА	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$234,52 \leq 630$
Відключаюча здатність: - симетричний струм: - аперіодична складова: - повний струм:	$I_{n\tau} \leq I_{відкл.ном}$ $i_{a\tau} \leq \sqrt{2}\beta_n I_{відкл.ном}$ $\sqrt{2}I_{n\tau} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл}(1 + \beta_n)$	$2,44 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 2,44 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $3,45 \leq 39,6$
Динамічна стійкість: - симетричний струм: - ударний струм:	$I'' \leq I_{дин.ст}$ $i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст}$	$2,44 \leq 52$ $3,52 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{TH}^2 t_{TH}$	$7,41 \leq 1200$

Найменший час від початку к.з. до моменту розходження дугогасячих контактів:

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

Аперіодична складова струму к.з. для моменту розходження контактів:

$$i_{a\tau} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 2,44 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0026}} = 0 \text{ кА}$$

Тепловий імпульс від струму к.з.:

$$B_k = I''^2 (t_{c.в} + t_{pz.max} + T_a) = 2,44^2 (0,042 + 1,2 + 0,0026) = 7,41 \text{ кА}^2\text{с}$$

Обираємо для встановлення вакуумний вимикач типу ВР1-10-20/630 У2.

Таблиця 6.4. Вибір вимикача напругою 10 кВ на відхідних КЛ до ТП

Параметр вимикача	Умова вибору	Розрахунок
Номінальна напруга, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 10$
Довготривалий струм, кА	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$30,02 \leq 630$
Відключаюча здатність: - симетричний струм: - аперіодична складова: - повний струм:	$I_{n\tau} \leq I_{відкл.ном}$ $i_{a\tau} \leq \sqrt{2}\beta_n I_{відкл.ном}$ $\sqrt{2}I_{n\tau} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл}(1 + \beta_n)$	$2,44 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 2,44 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $3,45 \leq 39,6$
Динамічна стійкість: - симетричний струм: - ударний струм:	$I'' \leq I_{дин.ст}$ $i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст}$	$2,44 \leq 52$ $3,52 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{TH}^2 t_{TH}$	$7,41 \leq 1200$

Найменший час від початку к.з. до моменту розходження дугогасячих контактів:

$$\tau = t_{pz.min} + t_{c.г} = 0,9 + 0,042 = 0,942 \text{ с}$$

Аперіодична складова струму к.з. для моменту розходження контактів:

$$i_{a\tau} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 2,44 \cdot e^{\frac{-0,942}{0,0026}} = 0 \text{ кА}$$

Тепловий імпульс від струму к.з.:

$$B_k = I''^2 (t_{c.г.} + t_{pz.max} + T_a) = 2,44^2 (0,042 + 1,2 + 0,0026) = 7,41 \text{ кА}^2\text{с}$$

Обираємо для встановлення вакуумний вимикач типу ВР1-10-20/630 У2.

6.3. Вибір потужності схем живлення трансформаторів власних потреб (ТВП)

Система електропостачання власних потреб (ВП) належить до категорії критично важливих елементів трансформаторної підстанції. Безперебійна робота цього інфраструктурного комплексу є базовою умовою стабільного функціонування всього силового обладнання, що, своєю чергою, безпосередньо впливає на загальний рівень надійності та безвідмовності живлення кінцевих споживачів.

До електротехнічного комплексу власних потреб входять: приводні електродвигуни систем примусового охолодження силових агрегатів; джерела живлення кіл оперативного струму; нагрівальні елементи, що запобігають утворенню конденсату та замерзанню приводів високовольтих вимикачів, роз'єднувачів і комірок зовнішнього встановлення (КРПЗ); а також мережі робочого, евакуаційного освітлення та системи підтримки мікроклімату приміщень.

Серед усього масиву приймачів ВП виокремлюють групу споживачів особливої важливості, втрата живлення яких є категорично недопустимою. До цієї локальної групи належать: кола оперативного керування, термінали мікропроцесорного релейного захисту та протиаварійної автоматики (РЗА), апаратура диспетчерського зв'язку та телемеханіки, автоматизовані комплекси пожежогасіння.

Електроживлення кіл оперативного керування та захисту реалізується за допомогою систем змінного або гарантованого постійного струму (на базі акумуляторних батарей), залежно від прийнятої схеми надійності об'єкта. Для вибору потужності споживачів власних потреб складаємо таблицю 6.5.

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

Таблиця 6.5. Вибір трансформаторів власних потреб (ЦРП)

№ n/n	Споживачі	$P_{ном}$, кВт	n , шт.	$P_{сум}$, кВт	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$P_{уст}$, кВт	$Q_{уст}$, кВАр
1.	Пристрої підігріву комірок КРП	0,6	12	7,2	0,97	0,25	7,2	2
2.	Опалення і освітлення приміщення оперативного персоналу	6	3	18	0,97	0,25	18	5
3.	Зовнішнє освітлення	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
4.	Споживання оперативними колами	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
Всього							61,2	17

Навантаження ТВП:

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{61,2^2 + 17^2} = 63,52 \text{ кВА}$$

Розрахункова потужність ТВП:

$$S_p = K_c S_{уст} = 0,8 \cdot 63,52 = 50,82 \text{ кВА}$$

Обираємо до встановлення 2 трансформатори типу ТМ-40/10.

Коефіцієнт завантаження ТВП:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{50,82}{2 \cdot 40} = 0,64$$

7. ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ПРИВОДУ

7.1. Обґрунтування доцільності застосування ЧРП

У більшості існуючих технологічних ліній сиркомбінатів продуктивність насосів (для перекачування молока, сироватки, води) та вентиляторів (у камерах дозрівання сиру) регулюється механічним шляхом — засувками або шиберами (метод дроселювання). При цьому електродвигун продовжує працювати на номінальних обертах, споживаючи майже повну потужність, а надлишок енергії витрачається на подолання гідравлічного або аеродинамічного опору штучної перешкоди.

Впровадження частотно-регульованого привода (ЧРП) дозволяє відмовитися від засувки. Регулювання потоку рідини чи газу відбувається виключно за рахунок плавної зміни швидкості обертання робочого колеса відцентрового механізму. Це не лише кардинально знижує енергоспоживання при недовантажених режимах, але й зменшує гідроудари, знос підшипників та запірної арматури.

Аналіз наданого добового графіка електричних навантажень сиркомбінату показує значну нерівномірність споживання електроенергії (від базових 1600 кВт вночі до майже 3000 кВт у ранкові та вечірні піки). Це свідчить про те, що інтенсивність технологічних процесів (подача води, перекачування сироватки, холодопостачання) протягом доби суттєво змінюється.

Традиційно на насосних станціях (зокрема, «Насосна станція 2») регулювання витрати рідини здійснюється методом дроселювання (засувками). При цьому електродвигун працює на номінальній частоті обертання, а надлишковий тиск гаситься на засувці, що призводить до безповоротних втрат енергії. Впровадження частотно-регульованого привода (ЧРП) дозволяє узгодити продуктивність насоса з реальним технологічним графіком (наприклад, знижувати подачу вночі) шляхом зміни частоти обертання робочого колеса, що усуває гідравлічні втрати.

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

7.2. Математичне моделювання динаміки споживання потужності

Енергоощадний ефект ЧРП базується на законах аеро- та гідродинамічної подібності для відцентрових машин.

Математично зв'язок між продуктивністю (Q), напором (H) та споживаною потужністю (P) при зміні частоти обертання вала (n) відносно номінальної ($n_{\text{НОМ}}$) описується системою рівнянь:

Продуктивність змінюється лінійно:

$$Q = Q_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)$$

Напір змінюється у квадратичній залежності:

$$H = H_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)^2$$

Споживана потужність має кубічну залежність від частоти обертання:

$$P = P_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)^3$$

Ця кубічна залежність означає, що якщо технологічний процес (наприклад, вентиляція складу) вимагає зниження продуктивності всього на 20% (тобто $\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} = 0.8$), споживана потужність впаде до $0.8^3 = 0.512$ від номіналу.

Тобто зниження швидкості на 20% дає майже 50% економії електроенергії.

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

Для відцентрових насосів споживана потужність (P) має кубічну залежність від частоти обертання або відносної витрати рідини ($Q_{\text{відн}} = Q / Q_{\text{ном}}$):

$$P_{\text{чрп}} = P_{\text{ном}} \cdot (Q_{\text{відн}})^3$$

При традиційному регулюванні засувкою (дроселюванні) споживана потужність знижується набагато повільніше (за наближеною лінійною залежністю):

$$P_{\text{дрос}} \approx P_{\text{ном}} \cdot (0.4 + 0.6 \cdot Q_{\text{відн}})$$

Різниця між $P_{\text{дрос}}$ та $P_{\text{чрп}}$ при часткових завантаженнях і є величиною втрат, які можна усунути.

7.3. Визначення добового та річного профілю економії

Для вирішення задачі необхідно перевести теоретичну формулу у реальні кіловат-години, необхідно накласти кубічну характеристику на технологічний графік роботи обладнання.

Добова економія електроенергії ($\Delta W_{\text{доб}}$) обчислюється як сума різниць потужностей при традиційному регулюванні та при роботі з ЧРП для кожного інтервалу часу:

$$\Delta W_{\text{доб}} = \sum_{i=1}^k (P_{\text{дрос},i} - P_{\text{чрп},i}) \cdot t_i$$

де $P_{\text{дрос},i}$ — потужність двигуна при механічному регулюванні на i -му кроці графіка;

$P_{\text{чрп},i}$ — потужність при регулюванні ЧРП;

t_i — тривалість i -го технологічного процесу (годин).

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

Річна економія ($\Delta W_{\text{рік}}$) визначається множенням добової економії на кількість робочих днів механізму на рік з урахуванням сезонних коефіцієнтів (наприклад, для літніх та зимових режимів).

Розглянемо робочу групу «Насоси перекачки» (Насосна станція 2). Згідно з таблицею, встановлена потужність одного насоса $P_{\text{ном}} = 15$ кВт (в роботі 3 насоси, сумарно 45 кВт).

Спираючись на графік навантаження заводу, змоделюємо добовий режим роботи одного насоса:

Піковий режим (4 години): $Q_{\text{відн}} = 100\% (1.0)$.

Денний режим (12 годин): $Q_{\text{відн}} = 80\% (0.8)$.

Нічний режим (8 годин): $Q_{\text{відн}} = 60\% (0.6)$.

Розрахунок споживання при дроселюванні:

Піковий режим:

$$P = 15 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot 1.0) = 15 \text{ кВт.}$$

Витрати: $15 \cdot 4 = 60 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Денний режим:

$$P = 15 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot 0.8) = 13.2 \text{ кВт.}$$

Витрати: $13.2 \cdot 12 = 158.4 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Нічний режим:

$$P = 15 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot 0.6) = 11.4 \text{ кВт.}$$

Витрати: $11.4 \cdot 8 = 91.2 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Добове споживання (1 насос):

$$60 + 158.4 + 91.2 = 309.6 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Розрахунок споживання з ЧРП:

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

Піковий режим:

$$P = 15 \cdot (1.0)^3 = 15 \text{ кВт.}$$

Витрати: $15 \cdot 4 = 60 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Денний режим:

$$P = 15 \cdot (0.8)^3 = 7.68 \text{ кВт.}$$

Витрати: $7.68 \cdot 12 = 92.16 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

.

Нічний режим:

$$P = 15 \cdot (0.6)^3 = 3.24 \text{ кВт.}$$

Витрати: $3.24 \cdot 8 = 25.92 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Добове споживання з ЧРП (1 насос):

$$60 + 92.16 + 25.92 = 178.08 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Добова економія для одного насоса:

$$\Delta W_{\text{доб}} = 309.6 - 178.08 = 131.52 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Для групи з 3-х насосів:

$$131.52 \cdot 3 = 394.56 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу.}$$

Річна економія (за умови 330 робочих днів):

$$\Delta W_{\text{рік}} = 394.56 \cdot 330 = 130204 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

7.4. Визначення капітальних витрат

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

Капітальні витрати ($K_{\text{чрп}}$) не обмежуються лише вартістю самого перетворювача частоти:

$$K_{\text{чрп}} = B_{\text{пч}} + B_{\text{доп}} + B_{\text{монт}}$$

де $B_{\text{пч}}$ — вартість самого частотного перетворювача відповідної потужності; $B_{\text{доп}}$ — вартість додаткового обладнання (вхідні/вихідні ЕМС-фільтри, моторні дроселі для захисту ізоляції двигуна, екрановані кабелі, датчики тиску/витрати для зворотного зв'язку); $B_{\text{монт}}$ — витрати на монтаж, підключення до шафи керування та пусконаладжувальні роботи.

Для модернізації трьох насосів по 15 кВт необхідно придбати три перетворювачі частоти з інтегрованими ЕМС-фільтрами та шафами керування. Орієнтовна вартість одного якісного промислового ПЧ на 15 кВт становить близько 35 000 грн. З урахуванням монтажу, кабельної продукції та пусконаладження (приблизно +30%), $K_{\text{чрп}}$ на один агрегат складе ~45 500 грн. Загальні капітальні витрати на групу:

$$K_{\text{чрп}} = 3 \cdot 45500 = 136500 \text{ грн.}$$

7.5. Розрахунок грошового еквіваленту збереженої енергії

Фінальний етап, який цікавить керівництво підприємства чи інвестора. Розрахунок виконується шляхом монетизації зекономлених кіловат-годин. При поточній середній вартості електроенергії для промислових підприємств на рівні 8.6 грн/кВт·год, річна фінансова економія (E_r) складе:

$$E_r = \Delta W_{\text{рік}} \cdot C_e$$

де C_e — діючий тариф на електроенергію.

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

Річний фінансовий результат від впровадження ЧРП на цій насосній станції становитиме:

$$E_r = \Delta W_{\text{рік}} \cdot C_e = 130204 \cdot 8.6 = 1119754 \text{ грн/рік.}$$

Простий термін окупності ($T_{\text{ок}}$):

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{чрп}}}{E_r} = \frac{136500}{1119754} \approx 0.12 \text{ року (близько 1.5 місяця).}$$

Графік порівняння енергоефективності насоса при роботі з ЧРП та засувкою наведено на рис. 8.1.

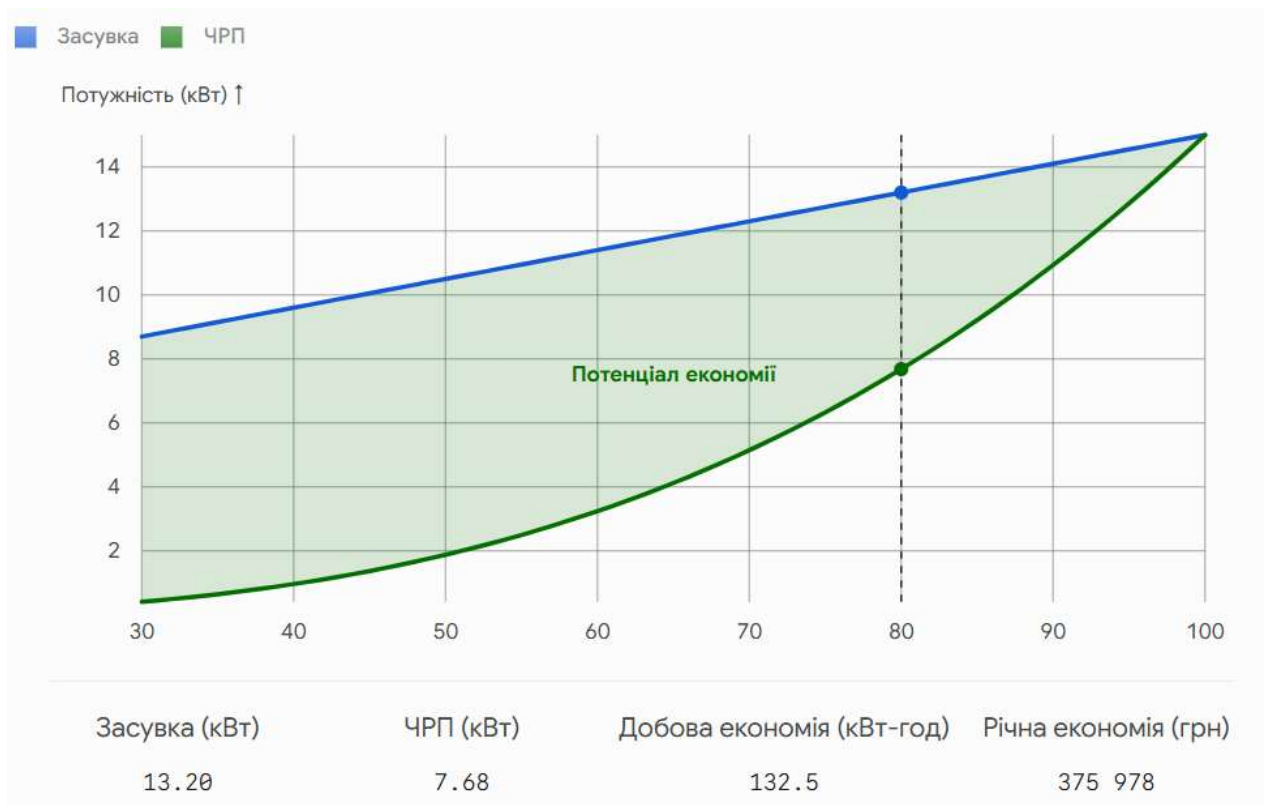


Рис. 8.1. Графік порівняння енергоефективності насоса

На рисунку 8.1 зображена економія електричної енергії при 80% завантаженні насоса, як видно при зниженні завантаження насоса економія електричної енергії, що споживатиме двигун насоса зростатиме у порівнянні з регулюванням засувкою.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне інженерне завдання щодо проектування системи електропостачання сучасного сиркомбінату з одночасним впровадженням інноваційних енергоефективних технологій. За результатами проведених досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

На основі методу впорядкованих діаграм розраховано електричні навантаження цехів та підприємства в цілому. Сумарна розрахункова активна потужність по заводу склала 2938,5 кВт, реактивна — 2502,8 квар.

За результатами техніко-економічного порівняння двох альтернативних варіантів (ПЛ-35 кВ та КЛ-10 кВ) доведено економічну доцільність живлення підприємства від енергосистеми кабельними лініями напругою 10 кВ. Внутрішньозаводська розподільна мережа побудована за надійною радіальною схемою.

З метою розвантаження мереж та трансформаторів від реактивних струмів виконано оптимізаційний розрахунок. За критерієм мінімуму приведених витрат обрано комбінований варіант компенсації: встановлення низьковольтних конденсаторних батарей загальною потужністю 707 квар на шини 0,4 кВ та високовольтних установок на 1800 квар на шини 10 кВ.

Розраховано струми короткого замикання в ключових точках мережі. Для захисту та комутацій обрано сучасне обладнання.

Аналіз режимів роботи насосного обладнання довів технічну та економічну недоцільність традиційного регулювання продуктивності засувками. Впровадження частотно-регульованих приводів (ЧРП) для групи перекачувальних насосів (сумарною потужністю 45 кВт) дозволяє заощаджувати 130 204 кВт·год електроенергії щорічно. При капітальних витратах на перетворювачі у розмірі 136 500 грн, річний економічний ефект у грошовому еквіваленті становить 1 119 754 грн. Завдяки цьому простий термін окупності проекту становить лише 0,12 року (близько 1,5 місяця).

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		64

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Збірник завдань та методичні вказівки до курсового проектування по курсу “Електропостачання промислових підприємств”. – Кіровоград. КДТУ, 2000.
2. Методические указания к курсовому проекту по электроснабжению цеха. – Кіровоград: КНТУ, 2004.
3. Міністерство енергетики України. (2017). Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Офіційне видання. Київ: Держенергонагляд.
4. Мінрегіонбуд України. (2010). ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ: Державні будівельні норми України.
5. Харченко В. Ф. Електропостачання міст та промислових підприємств : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання галузі знань 14 – Електрична інженерія, спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, професійне спрямування «Електротехнічні системи електроспоживання») / В. Ф. Харченко, О. А. Якунін, В. Г. Воропай ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 238 с
6. Плешков, С.П. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві: навч. посіб. для галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / С. П. Плешков, С. В. Серебренніков; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. техн. ун-т – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2016.– 161 с.
7. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2015. – 287 с.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						65