

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
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:

**Розроблення системи електропостачання заводу
виробництва склотари
Design of the power supply system for a glass container
manufacturing plant**

Виконав студент 4 курсу групи ЕЕ-22з
спеціальності 141«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Рафаель ОЗЕРНИЙ
« ____ » _____ 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 центр заочної та дистанційної освіти

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

Озерного Рафаеля Руслановича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Розроблення системи електропостачання заводу виробництва склотари*

Design of the power supply system for a glass container manufacturing plant

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 *18.06.2026 р.*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) *Розробити систему електропостачання заводу склотари, 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 технологічне обладнання в розподільчому пункті заводу. 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>	7.05.26	
2	<i>Побудова графіків електр. навантажень</i>	11.05.26	
3	<i>Вибір напруги і електричних схем електропостачання</i>	16.05.26	
4	<i>Режими реактивної потужності</i>	18.05.26	
5	<i>Розрахунок струмів КЗ</i>	19.05.26	
6	<i>Вибір низьковольтного обладнання</i>	20.05.26	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	27.04.26	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	02.06.26	
9	<i>Виконання графічної частини</i>	06.06.26	

Дата видачі завдання

Підпис керівника _____

« ____ » _____ 2026 р.

Завдання прийнято до виконання

Підпис студента _____

« ____ » _____ 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 72 с.; 13 рис.; 21 табл.; 8 джерел

Озерний Р. Розроблення системи електропостачання заводу виробництва склотари.– Рукопис.

Design of the power supply system for a glass container manufacturing plant

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 р.

Кваліфікаційна робота присвячена питанням проектування внутрішньозаводської та зовнішньої системи електропостачання підприємства з виробництва скляної тари. Проведено техніко-економічне зіставлення варіантів зовнішнього живлення (лінії 35 кВ та 10 кВ) за критерієм приведених витрат із врахуванням математичного очікування збитків від аварійних перерв у постачанні, за результатами якого обґрунтовано схему з кабельними лініями 10 кВ. Розраховано баланс реактивної потужності та вибрано оптимальну потужність компенсуючих пристроїв (КРП) для мереж 0,4 кВ та 10 кВ. Вибрано кількість та потужність силових трансформаторів ГЗП (дві одиниці ТМН-6300/35) та цехових підстанцій (трансформатори типу ТМ-630 та ТМГ-2500). У спеціальному розділі розглянуто заходи з енергозбереження, зокрема оцінено економічну ефективність впровадження частотно-регульованого електропривода для дуттьового вентилятора й димососа (річна економія склала 384 495 кВт·год), а також алгоритми обмеження холостого ходу верстатів.

Ключові слова: система електропостачання, частотно-регульований електропривод, енергозбереження.

ABSTRACT

Qualification work: 72 p.; 13 Fig.; 21 tables; 8 sources

OZERNYI R. Design of the power supply system for a glass container manufacturing plant – Manuscript.

Розроблення системи електропостачання заводу виробництва склотари

Bachelor's thesis in Speciality 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The qualification thesis outlines the engineering development and design of the internal and external power supply systems for a industrial glass container manufacturing facility. A comprehensive techno-economic comparison between potential external grid connections (35 kV overhead lines vs. 10 kV cable lines) was conducted based on discounted annual costs. This analysis factored in potential financial losses caused by unscheduled outages, justifying the final selection of a dual-circuit 10 kV cable grid setup. Reactive power balance computation enabled the sizing and deployment of power factor correction units for 0.4 kV and 10 kV buses. The primary power step-down equipment was selected, opting for two TMN-6300/35 main transformers alongside shop-level TM-630 and TMG-2500 units. Lastly, energy-saving configurations were investigated, confirming that implementing a variable frequency drive (VFD) for the furnace draft fan and exhaust flues yields a substantial annual energy reduction of 384,495 kWh, complemented by automatic idling limitation scripts for machine tools.

Keywords: power supply system, electrical loads, variable frequency drive, energy saving.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Розрахунок електричних навантажень	10
1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в електричних мережах до 1000 В	10
1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень	12
1.3 Розрахунок електричних в силових мережах вище 1000 В.....	14
1.4 Побудова графіків електричних навантажень цеху	21
2. Побудова картограми навантажень.....	26
3. Вибір напруги та електричних схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання підприємства	29
3.1. Вибір напруги та схеми зовнішнього електропостачання.....	29
4. Режим реактивної потужності системи електропостачання	36
4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв.....	36
4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв	39
5. Вибір кількості, потужності трансформаторів і підстанцій підприємства	40
6. Розрахунок струмів короткого замикання, вибір високовольтного обладнання та високовольтних електричних мереж.....	42
6.1 Розрахунок струмів короткого замикання.....	42
6.2.Вибір кабелів напругою 10 кВ для високовольтної мережі заводу.....	48
6.3. Вибір високовольтного обладнання.....	50
7. Енергозбереження та шляхи підвищення енергетичної ефективності в асинхронних електроприводах	53
7.1. Стратегічні напрямки та методи підвищення енергоефективності асинхронних електроприводів	57
7.2 Енергозбереження в електромеханічних комплексах вентиляторних установок та димососів.....	60
Висновок.....	70
Література	72

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Озерний Р.Р.			Розроблення системи електропостачання заводу виробництва склотари	Літера	Аркуш
Перевірів		Савеленко І.В.					6
Н. Контр.						ЕЕ-22з, ЦНТУ	
Затв.		Плешков П.Г					

ВСТУП

На переважній більшості передових підприємств склоробної галузі термічний обробок і варіння сировини здійснюється у високопродуктивних регенеративних та рекупераційних печах, зведених із передових вогнетривких матеріалів. Енергетичний баланс сучасного скловаріння базується на синергії природного газу та електричної енергії. Особливої актуальності сьогодні набула технологія інтенсифікації плавки шляхом впровадження систем додаткового електричного підігріву (внутрішньобасейного електродопомоги) та електроплавлення під шаром холодної шихти.

Методика «холодного даху» кардинально знижує летючість шкідливих сполук і мінімізує емісію забруднюючих речовин в атмосферу. Водночас гнучке керування електропідігрівом за допомогою сучасних тиристорних регуляторів потужності забезпечує точне дотримання температурного профілю. Це дозволяє досягти бездоганної гомогенізації скломаси, покращити якість готових виробів та суттєво наростити питому продуктивність агрегатів. Завдяки глибокій модернізації та оптимізації теплових режимів печей, заводи здатні оперативно переналаштовувати лінії та випускати скляну тару не лише стандартних відтінків (прозорого, зеленого чи коричневого), а й ексклюзивних кольорів — таких як оливковий або «сухий лист», що створює нові конкурентні переваги для брендів індустрії напоїв.

Проте в умовах жорсткого курсу на декарбонізацію промисловості ключовим стимулом стає саме екологічний фактор. Сучасні законодавчі нормативи висувають безпрецедентні вимоги до обмеження викидів парникових газів (CO_2), оксидів азоту (NO_x) та сірки (SO_x). Аби уникнути вимушеного штучного зниження продуктивності печей чи інвестування в наддорогі та громіздкі комплекси газоочищення, підприємства інтегрують повністю електричні печі або комбіновані системи.

У сучасну епоху цифрової трансформації системи електропостачання печей інтегруються з інтелектуальними платформами енергоменеджменту (EMS) на базі

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

штучного інтелекту. Це дозволяє використовувати динамічне балансування потужності та накопичувачі енергії, оптимізуючи витрати в періоди пікових навантажень. Окрім того, комбіноване спалювання газу та використання електроенергії Hybrid Furnaces дає технологічну гнучкість: у разі форс-мажорних обставин чи планового обслуговування компонентів електрообладнання, печі можна короткочасно перевести в режим гарячого очікування без ризику «замерзання» скломаси та повної зупинки підприємства.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення високонадійної, енергоефективної та економічно обґрунтованої системи електропостачання заводу з виробництва склотари, яка забезпечує безперебійне функціонування технологічних ліній (зокрема споживачів I та Особливої категорій) з урахуванням сучасних вимог декарбонізації, автоматизації промислових процесів та компенсації спотворення якості електроенергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити завдання:

1. Виконати аналіз технологічного процесу виробництва склотари та класифікацію електроприймачів за вимогами до надійності електропостачання.
2. Провести розрахунок активних і реактивних електричних навантажень підприємства по цехах та в цілому по заводу.
3. Розробити оптимальну схему зовнішнього електропостачання, визначити місця розташування головної знижувальної підстанції (ГЗП) та цехових трансформаторних підстанцій (ЦТП).
4. Вибрати сучасне комутаційне, захисне та струмопровідне обладнання (вакуумні вимикачі, мікропроцесорні пристрої РЗА, кабельні лінії з ізоляцією зі зшитого поліетилену).
5. Розробити заходи з проектування систем електропомоги печей та інтеграції автономних джерел живлення групи першої категорії.

Запропонована структура інтеграції систем електропомоги печей (Electric Boosting) дозволяє підприємству гнучко маневрувати між споживанням газу та

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

електроенергії, оптимізуючи витрати в умовах динамічних ринкових тарифів та дотримуючись екологічних лімітів на викиди CO_2 .

Схеми автоматичного введення резерву (АВР) та інтеграція автономних джерел живлення (ДБЖ, дизель-генераторних установок) для споживачів Особливої групи першої категорії (насоси охолодження, системи маніпуляторів) повністю виключають ризик аварійного «замерзання» печі при системних аваріях у зовнішній мережі.

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

1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розрахунок електричних навантажень заводу виконується у відповідності з методом, впровадженим на кафедрі, упорядкованих діаграм.

1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в електричних мережах до 1000 В

Розрахункове активне навантаження ливарного цеху визначається:

$$P_P = P_{CM} \cdot K_M = 65,5 \cdot 1,15 = 75,6 \text{ кВт},$$

де P_{CM} – сер. актив. навантаження офісно-побутового центру (ОПЦ); K_M – коефіцієнт МАХ ($K_M = 1,15$).

Коефіцієнт використання групи споживачів:

$$K_H = \frac{\sum_1^n P_{CM}}{\sum_1^n P_H} = \frac{12,6 + 16,05 + 33,6 + 3,25}{15,8 + 22,9 + 56 + 5} = 0,7$$

де P_{CM}, P_H – номінальні та змінні навантаження однотипних споживачів ОПЦ;

Ефективне число ЕП для ОПЦ:

$$n_{\text{Э}} = \frac{2 \cdot \sum P_H}{P_{H \max}} = \frac{2 \cdot 99,7}{10} = 20,$$

де $P_{H \max}, P_{H \min}$ – найбільш і найменш потужні споживачі в цеху

$$m = \frac{P_{H \max}}{P_{H \min}} = \frac{10}{0,3} = 33$$

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

Максимальне реактивне навантаження ОПЦ:

$$Q_P = 1,0 \cdot Q_{CM} = 1,0 \cdot 49,55 = 49,55 \text{ кВАр}$$

де Q_{CM} – сер. Реакт. навантаження ОПЦ;

$$Q_{CM} = P_{CM} \cdot \operatorname{tg} \phi = 65,5 \cdot 0,76 = 49,55 \text{ кВАр}$$

Максимум повного навантаження:

$$S_P = \sqrt{P_P^2 + Q_P^2} = \sqrt{75,6^2 + 49,55^2} = 90,42 \text{ кВА}$$

Розрахунок навантажень в електричних мережах до 1000 В виконуємо у вигляді таблиці 1.1.

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

1.2.Розрахунок освітлювальних навантажень

Обчислення параметрів освітлювального навантаження здійснюється методом питомої потужності, що припадає на одиницю корисної площі виробничого або адміністративного приміщення. Як базис для подальших розрахунків елементів системи електропостачання розглянемо приклад визначення навантажень внутрішнього штучного освітлення для офісно-побутового центру (ОПЦ).

Сумарна встановлена потужність світлотехнічного обладнання обчислюється за формулою:

$$P_B = F \cdot p_0 = 718,2 \cdot 8 = 5,75 \text{ кВт}$$

Сумарна максимальна потужність світлотехнічного обладнання:

$$P_p = K_c \cdot P_B, = 0,95 \cdot 5,75 = 4,9 \text{ кВт}$$

де $K_c = 0,95$ - коефіцієнт попиту з довідника.

Для освітлювальних установок з світлодіодними лампами розрахункова реактивна потужність визначається за формулою, кВАр:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 4,9 \cdot 0,29 = 1,4)$$

Де $\operatorname{tg} \varphi$ відповідає коефіцієнту потужності $\cos \varphi$, для ламп СДЛ - 0,96.

Результати розрахунку освітлювального навантаження зведені до таблиці 2.1.

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

Таблиця 1.2. Розрахунок освітлювального навантаження

№ п/п	Найменування	F, м ²	P ₀ , Вт/м ²	P _в , кВт	K _с	Тип лампи	cosφ	P _р , кВт	Q _р , кВАр	S _р , кВА
1	Офісно-побутовий центр	718,2	8	5,75	0,85	СДЛ	0,96	4,9	1,4	5,09
2	Виробнича лінія №81	3319,2	6	19,92	0,9	СДЛ	0,96	17,9	5,2	18,67
3	Комплекс приготування шихти	3666,6	6	22,00	0,95	СДЛ	0,96	20,9	6,1	21,77
4	Логістичний склад №7	313,2	3	0,94	0,6	СДЛ	0,96	0,6	0,2	0,59
5	Склад (Термінал №3)	4354,2	0,2	0,87	0,9	СДЛ	0,96	0,8	0,2	0,82
6	Виробнича лінія №83	5893,2	6	35,36	0,9	СДЛ	0,96	31,8	9,3	33,15
7	Дільниця №82	4158	6	24,95	0,9	СДЛ	0,96	22,5	6,5	23,39
8	Логістичний термінал №4	1971	0,2	0,39	0,6	СДЛ	0,96	0,2	0,1	0,25
9	Автоматизована котельня	414,9	4	1,66	0,8	СДЛ	0,96	1,3	0,4	1,38
10	Склад готової продукції (Термінал №2)	14241	0,2	2,8	0,8	СДЛ	0,96	2,3	0,7	2,4
11	Центральна насосна станція	212,4	4	0,85	0,8	СДЛ	0,96	0,7	0,2	0,71
12	Автозаправний комплекс	148,5	0,05	0,01	0,6	СДЛ	0,96	0,00	0,00	0,00
13	Комплекс очисних споруд	100,8	5	0,50	0,8	СДЛ	0,96	0,4	0,1	0,42
14	Склад вторинної сировини	564,3	4	2,26	0,8	СДЛ	0,96	1,8	0,5	1,88
15	Універсальний склад	782,1	4	3,13	0,8	СДЛ	0,96	2,5	0,7	2,61
16	Склад вогнетривких матеріалів	196,2	4	0,78	0,8	СДЛ	0,96	0,6	0,2	0,65
17	Підготовчий цех	764,1	5	3,82	0,85	СДЛ	0,96	3,2	0,9	3,38
18	Склад №1	231,3	4	0,93	0,6	СДЛ	0,96	0,6	0,2	0,58
19	Логістичний склад №2	360	4	1,44	0,6	СДЛ	0,96	0,9	0,3	0,90
20	Склад №8	830,7	4	3,32	0,6	СДЛ	0,96	2,0	0,6	2,08
21	Склад електрообладнання	330,3	4	1,32	0,8	СДЛ	0,96	1,1	0,3	1,10

										Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата						13

Продовження таблиці 1.2.

№ п/п	Найменування	F, м ²	P _о , Вт/м ²	P _в , кВт	K _с	Тип лампи	cosφ	P _p , кВт	Q _p , кВАр	S _p , кВА
22	Ремонтно-механічний комплекс	885,6	6	5,31	0,8	СДЛ	0,96	4,3	1,2	4,43
23	Енергетичний комплекс	777,6	6	4,67	0,8	СДЛ	0,96	3,7	1,1	3,89
24	Комплекс харчування	322,2	8	2,58	0,85	СДЛ	0,96	2,2	0,6	2,28
25	Логістичний склад №5	201,6	4	0,81	0,6	СДЛ	0,96	0,5	0,1	0,50
26	Територія заводу	156395	0,05	7,82	0,6	СДЛ	0,96	4,7	1,4	4,89
	Всього							127,4	37,15	132,7

1.3 Розрахунок електричних в силових мережах вище 1000 В

Під час проектування та розрахунку електричних навантажень у мережах напругою понад 1000 В як основні розрахункові вузли розглядаються секції шин 10 кВ головної чи цехових підстанцій. Паспортні та номінальні характеристики прийнятого до встановлення трансформаторного обладнання деталізовано нижче в таблиці 1.3.

Таблиці 1.3. Параметри цехового трансформатора

Марка	S _{ном} , кВА	U _к , %	ΔP _к , кВт	ΔP _х , кВт	R _т , Ом	X _т , Ом
ТМ-630/10/0,4	630	5,5	7,60	1,31	0,948	6,064

Активні втрати:

$$\Delta P_m = n \cdot \Delta P_{xx} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{кз} \cdot K_3^2 = 2 \cdot 1,31 + \frac{1}{2} \cdot 7,6 \cdot 0,49^2 = 6,3 \text{ кВт};$$

Реактивні втрати:

$$\Delta Q = n \cdot \left(\frac{I_x}{100} \cdot S_H + \frac{U_K}{100} \cdot S_H \cdot K_3^2 \right) = 2 \cdot \left(\frac{1,31}{100} \cdot 630 + \frac{5,5}{100} \cdot 630 \cdot 0,49^2 \right) = 59,1 \text{ квар}$$

Приймаємо для живлення електропечей плавки скла встановлення трансформатор ТМГ-2500/10-У1.

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

Таблиця 1.4. Розрахунок силових електричних навантажень в мережі вище 1000 В																				
Зм.	Арк.	№	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість	Встановлена потужність, кВт			m	Кв	cos	tg	Середнє навантаження		ne	Км	Розрахункова потужність				
					Одного							Qср	Pср			Qр	Pр	Qр	Sp	
№ докум.	Підпис.	Дата	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
			ТП№1																	
			1	Офісно-побутовий центр																
			силова		58	0,3	-	10	99,7	33,0	0,7	0,8	0,8	65,5	49,5	20,0	1,2	75,6	49,5	90,4
			освітлювальна															4,9	1,4	
			Виробнича лінія №81																	
			силова		40	8	-	225	652,9	28,0	0,6	0,7	0,9	362,0	339,5	6,0	1,4	523,1	373,4	642,8
			освітлювальна															17,9	5,2	
			Всього по ТП№1																	
			силова		98	0,3	-	225	752,6	750,0	0,6	0,7	0,9	427,5	389,0	7,0	1,4	593,3	389,0	709,5
			освітлювальна															22,8	6,7	
			Всього															616,1	395,7	732,2
			БСК																-666	
			З урахуванням БСК															616,1	-270,3	
			Втрати в трансформаторі Sn.тр=	630	2													6,3	59,1	
			Всього на шинах 10 кВ	ТП№1	0,49													622,3	-211,2	657,2
			ТП№ 2,3																	
			Комплекс приготування шихти																	
силова		57	0,44	-	80	1071,1	181,0	0,7	0,8	0,8	767,5	586,3	27,0	1,1	844,6	586,3	1028,2			
освітлювальна															20,9	6,1				
Склад (Термінал №3)																				
силова		24	2	-	32	222,3	16,0	0,4	0,8	0,8	92,3	75,9	14,0	1,4	126,8	75,9	147,8			
Арк.	15																			

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	продовження таблиці 1.4																			
					1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
						освітлювальна															0,8	0,2		
						Логістичний склад №7																		
						силова		9	1	-	12	58,3	12,0	0,4	0,8	0,8	21,6	18,2	9,0	1,5	33,4	20,0	38,9	
						освітлювальна															0,6	0,2		
						Автоматизована котельня																		
						силова		39	0,5	-	18	222,9	36,0	0,7	0,8	0,7	156,1	102,7	25,0	1,1	173,8	102,7	201,9	
						освітлювальна															1,3	0,4		
						Всього по	ТП№ 2,3																	
						силова		129	0,44	-	80	1574,5	181,8	0,7	0,8	0,8	1037,5	783,0	39,0	1,1	1146,4	783,0	1388,3	
						освітлювальна															23,6	6,9		
						Всього															1170,0	789,8	1411,7	
						БСК																-999		
						З урахуванням БСК															1170,0	- 209,2		
						Втрати в трансформаторі Sn.тр=	630	3													12,7	102,2		
						Всього на шинах 10 кВ	ТП№ 2,3	0,63													1182,7	- 107,0	1187,5	
						ТП№4																		
						Виробнича лінія №83																		
						силова		12	12		175	809,1	14,0	0,7	0,8	0,8	530,6	421,3	9,0	1,3	663,5	463,4	809,3	
						освітлювальна															31,8	9,3		
						Логістичний термінал №4																		
						силова		32	3	-	15	328,0	5,0	0,6	0,8	0,8	196,8	147,6	32,0	1,1	225,0	147,6	269,1	
						освітлювальна																0,6	0,2	
						Всього по	ТП№4																	
						силова		44	3	-	175	1137,1	58,3	0,6	0,8	0,8	727,4	568,9	13,0	1,2	881,7	568,9	1049,3	
	16	Арк.																						

Зм.		продовження таблиці 1.4																		
Арк.		1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
№ докум.			освітлювальна															32,5	9,5	
			Всього															914,2	578,3	1081,8
			БСК																-686	
			З урахуванням БСК															914,2	-108	
Підпис.			Втрати в трансформаторі Sn.тр=	630	2													10,6	75	
			Всього на шинях 10 кВ	ТП№4	0,73													924,8	-32	925,4
			ТП№ 5																	
Дата			Дільниця №82																	
			силова		29	1	-	200	1159,4	200,0	0,2	0,7	1,1	227,3	239,1	12,0	1,7	395,2	239,1	461,9
			освітлювальна															22,5	6,5	
			Центральна насосна станція																	
			силова		32	3	-	15	328,0	5,0	0,6	0,8	0,8	196,8	147,6	32,0	1,1	225,0	147,6	269,1
			освітлювальна															0,7	0,2	
			Автозаправний комплекс																	
			силова		16	1	-	7,5	63,5	7,0	0,6	0,8	0,8	37,8	29,3	16,0	1,2	46,0	29,3	54,5
			освітлювальна															0,0	0,0	
			Комплекс очисних споруд																	
			силова		12	1	-	11	70,9	11,0	0,6	0,8	0,8	42,9	32,1	12,0	1,2	53,5	32,1	62,4
			освітлювальна															0,4	0,1	
			Всього по	ТП№5																
			силова		89	1	-	200	1621,8	200,0	0,3	0,7	0,9	504,8	448,1	16,0	1,4	730,3	448,1	856,9
			освітлювальна															26,9	7,8	
			Всього															757,2	455,9	883,9
			БСК																-375	
		З урахуванням БСК															757,2	81		
17	Арк.																			

		продовження таблиці 1.4																			
Зм.	Арк.	1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
			Втрати в трансформаторі Сн.тр=	630	2													8,1	66,8		
№ докum.			Всього на шинах 10 кВ	ТП№5	0,61													765,3	148	779,5	
			ТП№6																		
			Ремонтно-механічний комплекс																		
			силова		55	2	-	34	789,3	17,0	0,2	0,7	1,0	158,9	157,3	46,0	1,3	212,1	157,3	264,0	
Підпис.			освітлювальна															4,3	1,2		
			Склад електрообладнання																		
Дата			силова		4	1	-	2	8,0	2,0	0,4	0,7	1,0	3,2	3,3	4,0	1,9	6,0	3,6	7,0	
			освітлювальна															1,1	0,3		
			Склад №8																		
			силова		3	2	-	11	19,5	5,0	0,3	0,8	0,7	6,5	4,7	3,0	2,3	14,8	5,2	15,7	
			освітлювальна															2,0	0,6		
			Всього по	ТП№6																	
			силова		111	1,1	-	34	1238,8	30,9	0,2	0,7	1,1	258,3	287,7	73,0	1,3	323,5	287,7	432,9	
			освітлювальна															13,4	3,9		
			Всього															336,9	291,6	445,6	
			БСК																-175		
			З урахуванням БСК															336,9	117		
			Втрати в трансформаторі Сн.тр=	630	1														3,5	31,1	
			Всього на шинах 10 кВ	ТП№6	0,59														340,4	148	371,1
			ТП№ 7																		
			Енергетичний комплекс																		
			силова		17	2	-	15	126,5	7,0	0,4	0,7	1,0	56,9	56,2	17,0	1,3	74,3	56,2	93,2	
			освітлювальна																0,0	0,0	
			Комплекс харчування																		
			силова		19	1,5	-	10	93,5	6,0	0,7	0,8	0,7	67,8	50,5	19,0	1,1	75,8	50,5	91,0	
	18	Арк.																			

[illegible]

Зм.	Арк.	Продовження таблиці 1.4																			
		1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
№ докум.			Всього по заводу																		
			силова		568	0,3	-	225	6745,9	750,0	0,5	0,8	0,8	3095,0	2612,4	60,0	1,1	3548,0	2612	4406,0	
			освітлювальна															127,4	37		
			Всього															3675,4	2650	4530,9	
Підпис.			Компенсуючі пристрої																- 2976		
			Всього з врахуванням КП-0,4															3675,4	-326	3689,9	
			Втрати в трансформаторах		11													41,1	335		
Дата			Всього по заводу															3716,5	8	3716,5	
			Компенсуючі пристрої 10 кВ																- 2700		
			Високовольтне навантаження																		
			Електропіч плавлення скла 7 т/год		3	900	-	1600	4100,0	2,0	0,8	0,8	0,9	3280,0	2892,7			3280,0	2893	4373,3	
			Трансформатори печі, кВА Sпт =	1000	3	2500		2500	7500,0									7,4	42		
			Всього на шинах 10 кВ																7007,1	201	7010,0
																			tgφсис=	0,15	
Арк.	20																				

1.4. Побудова графіків електричних навантажень цеху

Графіки навантажень, при проектуванні, підприємства дають можливість визначити їх споживання активної та реактивної енергії. Дані графіків приведені в таблицях 1.5, 1.6, а графіки на рисунках 1.1-1.5.

Таблиця 1.5. Активне навантаження по сезонам року

Години	Навантаження робочої доби				Навантаження вихідної доби			
	%	Зима ($P_{зр}$), кВт	%	Літо ($P_{лр}$), кВт	%	Зима ($P_{зв}$), кВт	%	Літо ($P_{лв}$), кВт
1	47	3293,3	47	2799,3	47	3293,3	39	2799,33
2	46	3223,3	47	2799,3	46	3223,3	39	2739,77
3	50	3503,5	50	2978,0	50	3503,5	42	2978,01
4	51	3573,6	50	2978,0	51	3573,6	43	3037,57
5	53	3713,8	53	3156,7	53	3713,8	45	3156,69
6	57	3994,0	54	3216,2	57	3994,0	48	3394,93
7	65	4554,6	54	3216,2	65	4554,6	55	3871,41
8	77	5395,4	72	4288,3	77	5395,4	65	4586,13
9	83	5815,9	85	5062,6	83	5815,9	70	4943,5
10	91	6376,4	93	5539,1	91	6376,4	77	5420,0
11	97	6796,9	100	5956,0	97	6796,9	82	5777,3
12	100	7007,1	100	5956,0	100	7007,1	85	5956,0
13	98	6866,9	97	5777,3	98	6866,9	83	5836,9
14	92	6446,5	98	5836,9	92	6446,5	78	5479,5
15	89	6236,3	99	5896,5	89	6236,3	75	5300,9
16	88	6166,2	98	5836,9	88	6166,2	74	5241,3
17	86	6026,1	95	5658,2	86	6026,1	73	5122,2
18	84	5885,9	91	5420,0	84	5885,9	71	5003,1
19	83	5815,9	90	5360,4	83	5815,9	70	4943,5
20	81	5675,7	89	5300,9	81	5675,7	68	4824,4
21	77	5395,4	84	5003,1	77	5395,4	65	4586,1
22	70	4905,0	72	4288,3	70	4905,0	59	4169,2
23	64	4484,5	64	3811,8	64	4484,5	54	3811,8
24	31	2172,2	30	1786,8	31	2172,2	26	1846,4

Таблиця 1.6. Реактивне навантаження по сезонам року

Години	Навантаження робочої доби				Навантаження вихідної доби			
	%	Зима (Q _{зр}), кВар	%	Літо (Q _{лр}), кВар	%	Зима (Q _{зв}), кВар	%	Літо (Q _{лв}), кВар
1	47	2795,9	47	2376,5	47	2795,9	39	2376,5
2	47	2795,9	47	2376,5	47	2795,9	39	2376,5
3	50	2974,4	50	2528,2	50	2974,4	42	2528,2
4	50	2974,4	50	2528,2	50	2974,4	42	2528,2
5	53	3152,8	53	2679,9	53	3152,8	45	2679,9
6	54	3212,3	54	2730,5	54	3212,3	45	2730,5
7	54	3212,3	54	2730,5	54	3212,3	45	2730,5
8	72	4283,1	72	3640,6	72	4283,1	61	3640,6
9	85	5056,4	85	4298,0	85	5056,4	72	4298,0
10	93	5532,3	93	4702,5	93	5532,3	79	4702,5
11	100	5948,7	100	5056,4	100	5948,7	85	5056,4
12	100	5948,7	100	5056,4	100	5948,7	85	5056,4
13	97	5770,3	97	4904,7	97	5770,3	82	4904,7
14	98	5829,8	98	4955,3	98	5829,8	83	4955,3
15	99	5889,2	99	5005,9	99	5889,2	84	5005,9
16	98	5829,8	98	4955,3	98	5829,8	83	4955,3
17	95	5651,3	95	4803,6	95	5651,3	80	4803,6
18	91	5413,3	91	4601,3	91	5413,3	77	4601,3
19	90	5353,9	90	4550,8	90	5353,9	76	4550,8
20	89	5294,4	89	4500,2	89	5294,4	75	4500,2
21	84	4996,9	84	4247,4	84	4996,9	71	4247,4
22	72	4283,1	72	3640,6	72	4283,1	61	3640,6
23	64	3807,2	64	3236,1	64	3807,2	54	3236,1
24	30	1784,6	30	1516,9	30	1784,6	25	1516,9

Річні витрати енергії:

$$P_{зр}\Sigma * 143 + P_{зв}\Sigma * 65 + P_{лр}\Sigma * 105 + P_{лв}\Sigma * 48 =$$

$$123325 \cdot 147 + 123325 \cdot 65 + 107923 \cdot 105 + 104826 \cdot 48 = 42508361 \text{ кВт*год}$$

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

$$V_p = Q_{зр\Sigma} \cdot 143 + Q_{зв\Sigma} \cdot 65 + Q_{лр\Sigma} \cdot 105 + Q_{лв\Sigma} \cdot 48 =$$

$$= 107791 \cdot 147 + 107791 \cdot 65 + 91622 \cdot 105 + 91622 \cdot 48 = 36869918 \text{ квар*год}$$

Тривалість максимуму навантаження:

$$T_M = \frac{\sqrt{W_p^2 + V_p^2}}{S_p} = \frac{\sqrt{42508361^2 + 36869918^2}}{9192} = 6121$$

Час максимальних втрат:

$$\tau = (0,124 + \frac{T_M}{10^4})^2 8760 = (0,124 + 6162/10000)^2 8760 = 4747 \text{ год.}$$

Отримані результати використовуємо в подальших розрахунках роботи.

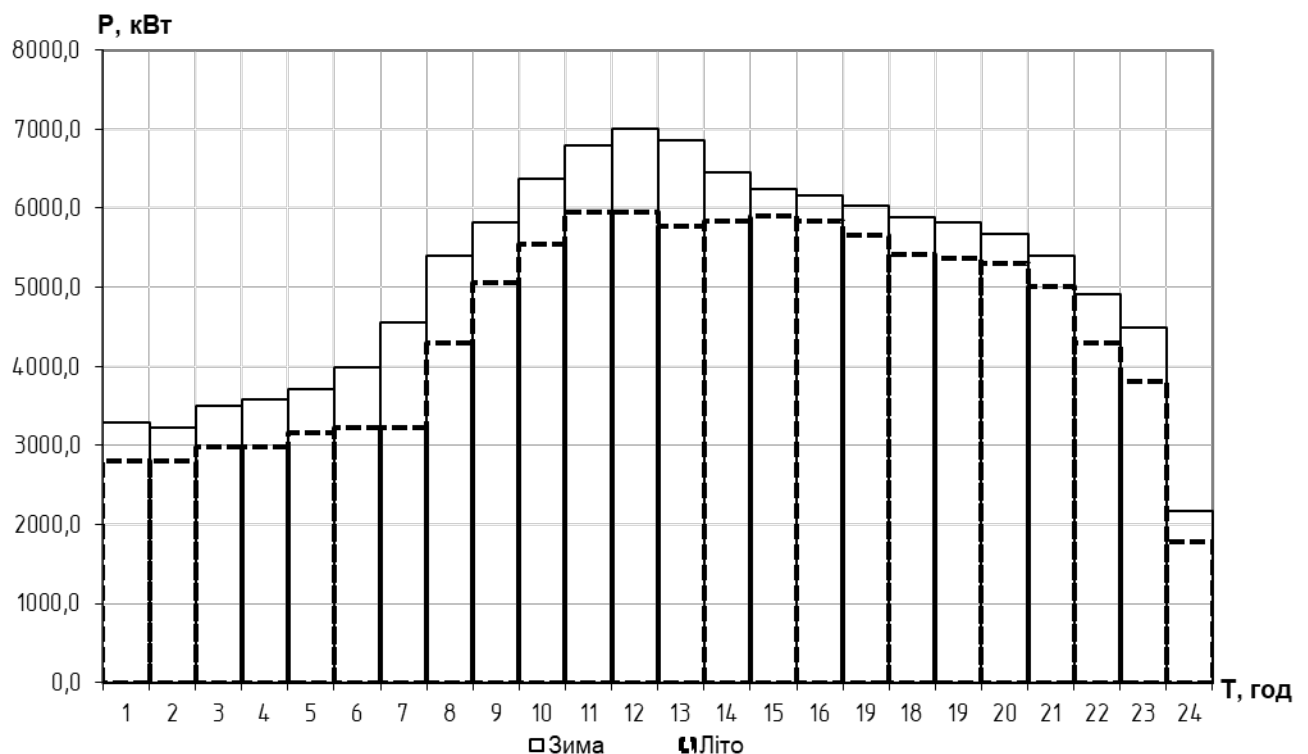


Рис. 1.1 Споживання активної потужності в робочий день

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

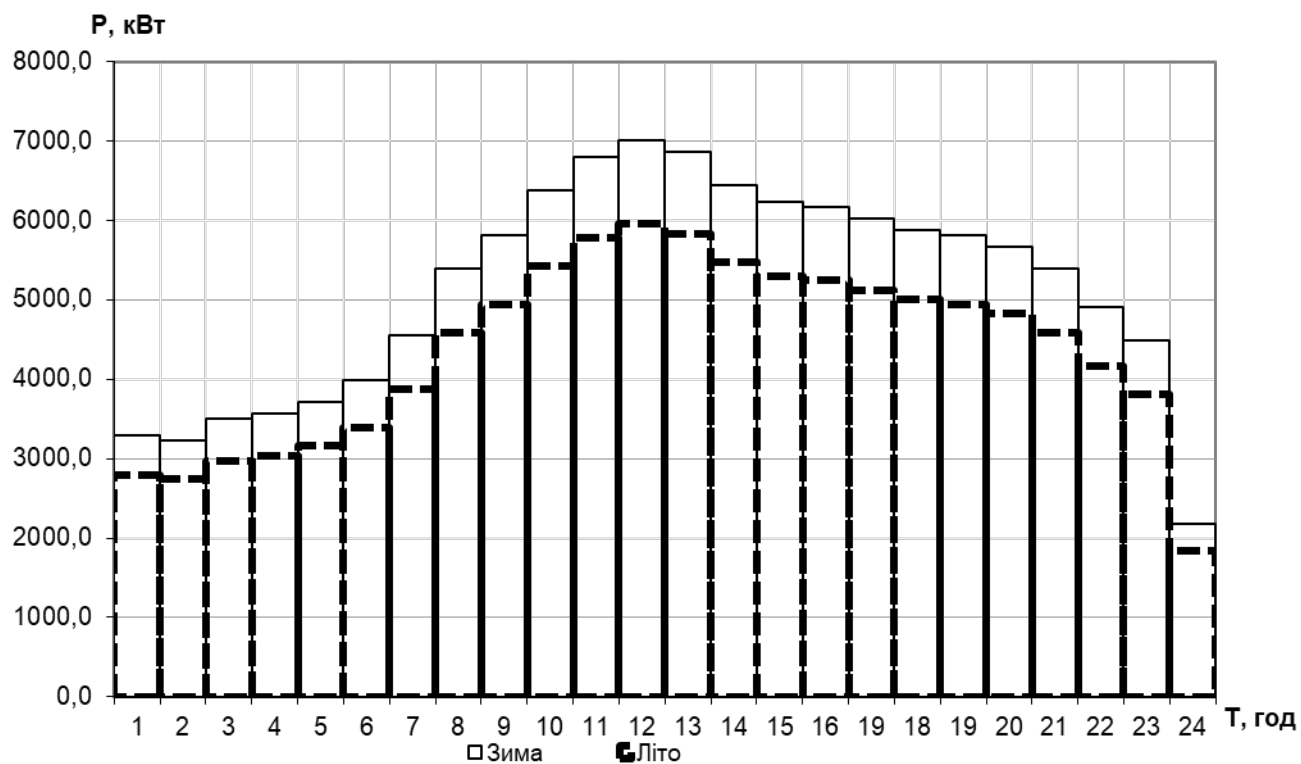


Рис. 1.2 Споживання активної потужності у вихідний день

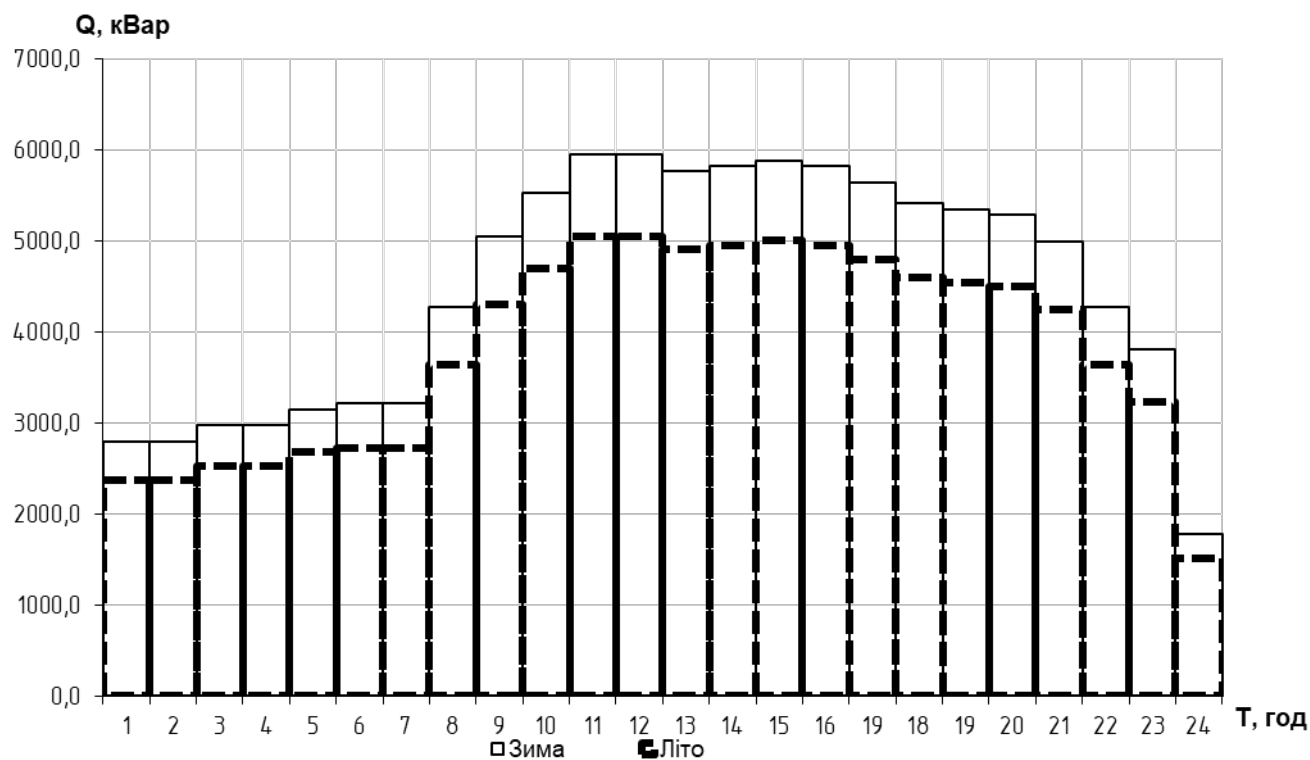


Рис. 1.3 Споживання реактивної потужності в робочий день

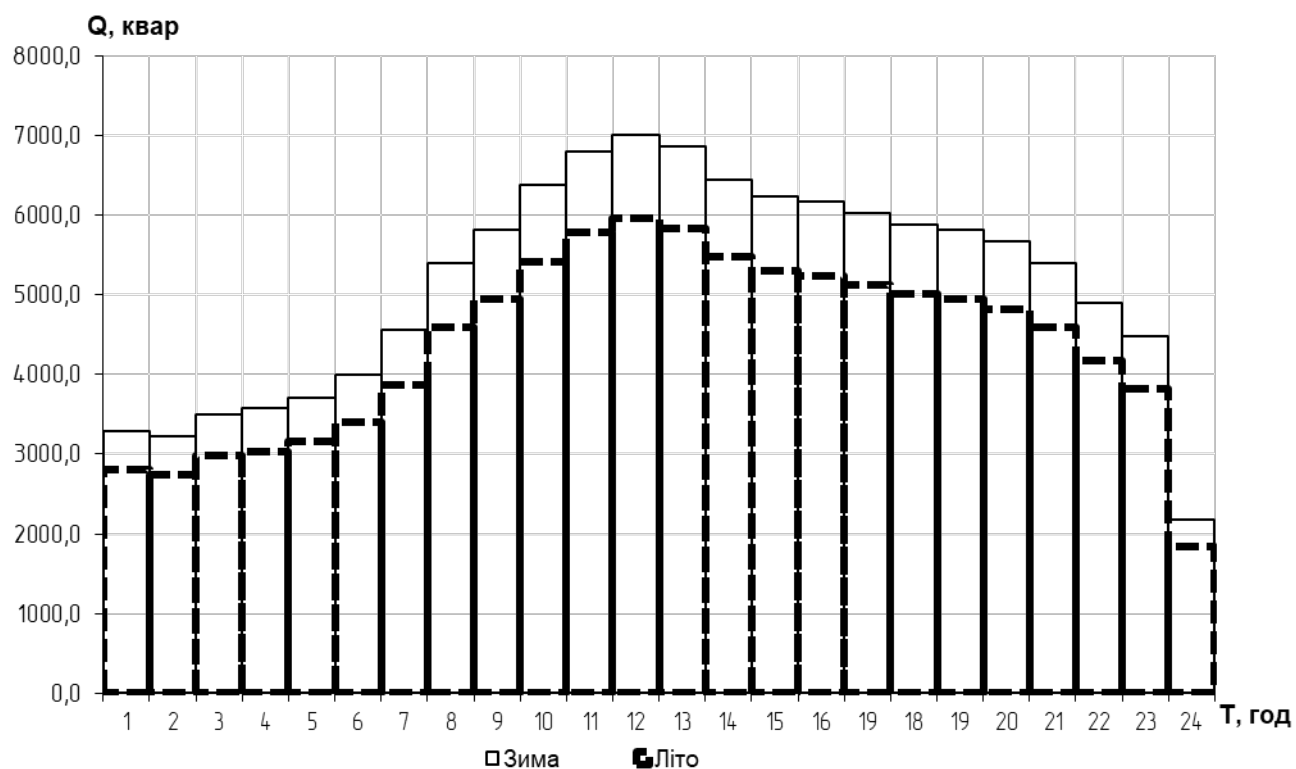


Рис. 1.4 Споживання реактивної потужності у вихідний день

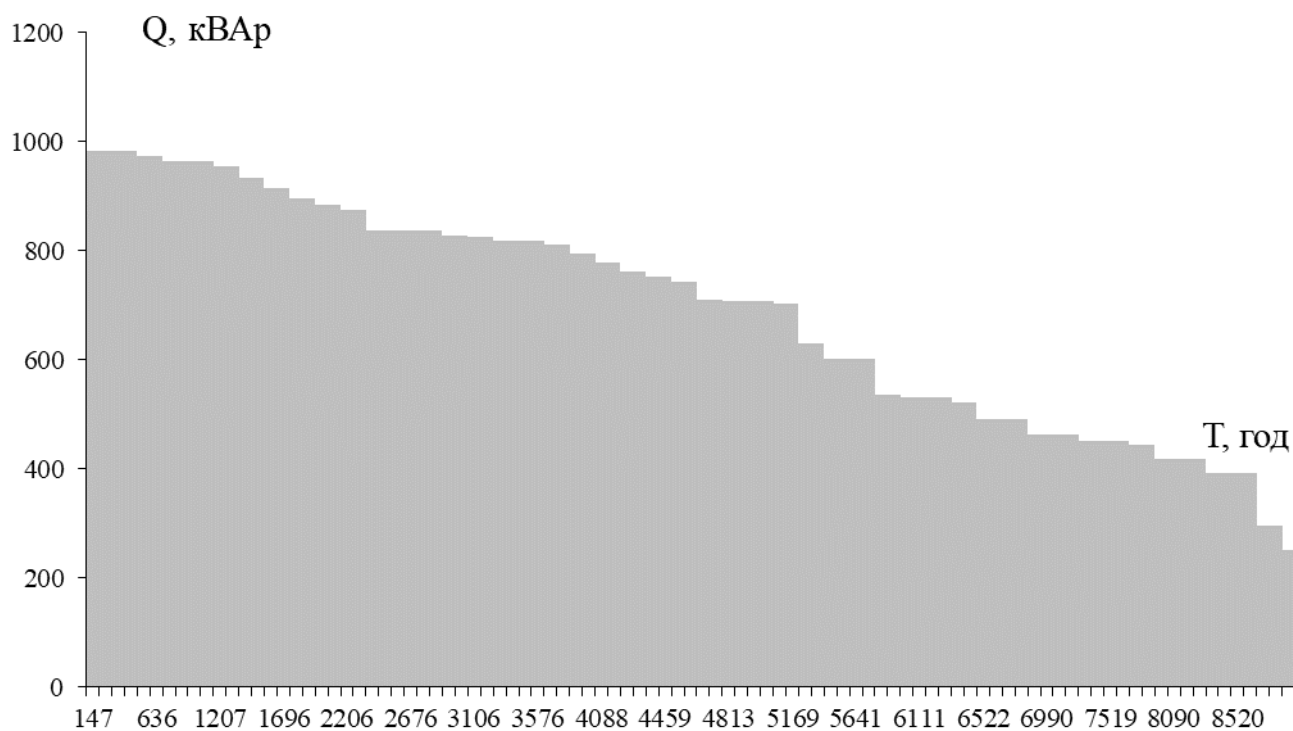


Рис. 1.5 Річний графік навантаження за тривалістю

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

2. Побудова картограми навантажень

Для визначення місць розташування ЦЕН розраховується картограма електричних навантажень. При визначенні картограми визначається радіус кола, площа якого дорівнює розрахунковому навантаженню цеха P_p .

Радіус кола:

$$R = \sqrt{\frac{P_o}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{80,52}{3,14 \cdot 0,1}} = 16,1$$

Сектор пропорційний освітлювальному навантаженню:

$$\alpha_i = 360 \cdot \frac{P_{P_i}^{осв}}{P_{p\Sigma}} = 360 \frac{4,88}{75,64} = 21,83^\circ).$$

Координати центра електричних навантажень:

$$x_0 = \sum_{i=1}^n x_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i =; 4153319,3/77,37 = 536 \text{ м}$$

$$y_0 = \sum_{i=1}^n y_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i = 811431,4/7737 = 104 \text{ м}$$

Центр електричних навантажень підприємства знаходиться у координатах $x_0 = 536 \text{ м}$, $y_0 = 104 \text{ м}$.

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

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

№ п/п	Найменування	Ррсил, кВт	Рпросв, кВт	Рр, кВт	m	R, мм	α	x, м	y, м	P*x, кВт м	P*y, кВт м
1	Офісно-побутовий центр	75,64	4,88	80,5266	0,1	16,01	21,83	800	320	64421,3	25768,5
2	Виробнича лінія №81	523,15	17,92	541,073	0,1	41,50	11,93	800	160	432858,8	86571,8
3	Комплекс приготування шихти	844,64	20,90	865,536	0,1	52,49	8,69	120	280	103864,3	242350,1
4	Логістичний склад №7	33,36	0,56	33,9193	0,1	10,39	5,98	200	240	6783,9	8140,6
5	Склад (Термінал №3)	126,78	0,78	127,568	0,1	20,15	2,21	600	100	76540,8	12756,8
6	Виробнича лінія №83	663,46	31,82	695,28	0,1	47,04	16,48	720	280	500601,4	194678,3
7	Дільниця №82	395,19	22,45	417,646	0,1	36,46	19,35	600	200	250587,4	83529,1
8	Логістичний термінал №4	96,46	0,24	96,6999	0,1	17,54	0,88	400	240	38680,0	23208,0
9	Автоматизована котельня	173,85	1,33	175,173	0,1	23,61	2,73	200	480	35034,7	84083,3
10	Склад готової продукції (Термінал №2)	52,24	2,28	54,515	0,1	13,17	15,05	600	240	32709,0	13083,6
11	Центральна насосна станція	224,96	0,68	225,644	0,1	26,80	1,08	280	100	63180,4	22564,4
12	Автозаправний комплекс	46,02	0,00	46,0203	0,1	12,10	0,03	760	80	34975,4	3681,6
13	Комплекс очисних споруд	53,54	0,40	53,9448	0,1	13,10	2,69	52	160	2805,1	8631,2
14	Склад вторинної сировини	18,06	1,81	19,8673	0,1	7,95	32,72	200	120	3973,5	2384,1
15	Універсальний склад	15,69	2,50	18,1957	0,1	7,61	49,52	760	320	13828,8	5822,6

3. Вибір напруги та електричних схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання підприємства

3.1. Вибір напруги та схеми зовнішнього електропостачання

Ефективність та експлуатаційна надійність структури системи електропостачання (СЕП) промислового об'єкта безпосередньо залежать від раціонального вибору класу напруги та конфігурації мереж зовнішнього живлення.

Процес оптимізації схеми зовнішнього енергозабезпечення та визначення її номінальної напруги підпорядкований комплексному впливу низки технічних та географічних чинників.

Остаточне інженерне рішення приймається на основі техніко-економічного аналізу шляхом зіставлення інтегральних витрат для конкурентоспроможних варіантів.

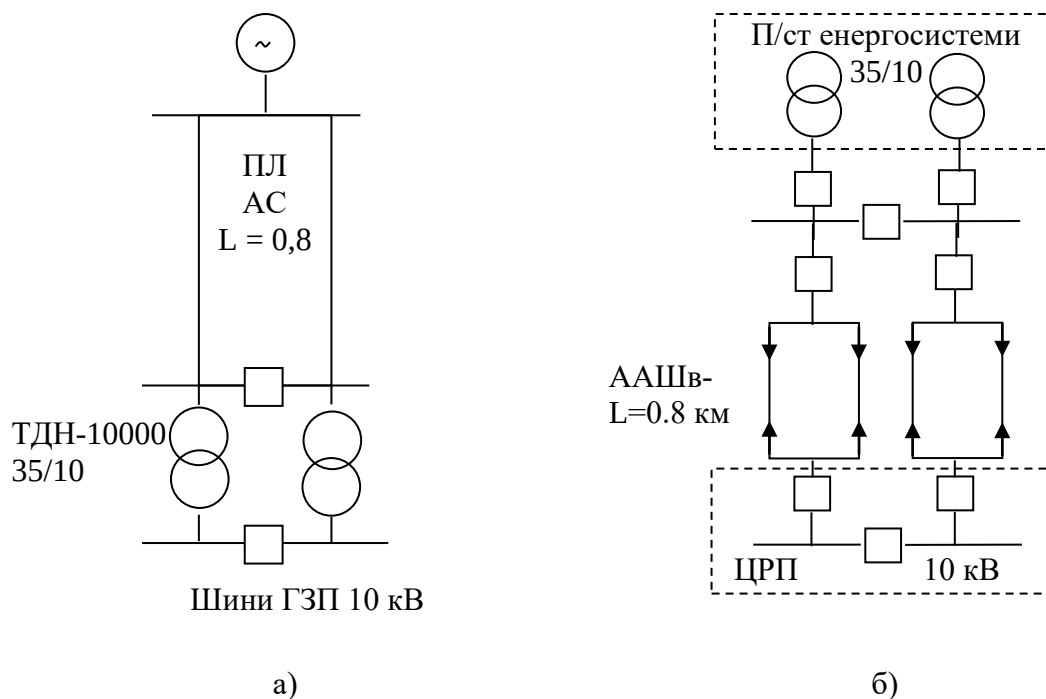


Рис 3.1. Варіанти електропостачання

Варіант №2. Живлення заводу повітряною лінією напругою 35 кВ

Розрахунковий струм в лінії:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_n} = 7007/1,73 \cdot 35 = 119,4$$

Площа перерізу ПЛ:

$$F_{ек} = I_p / j_{ек} = 119,4 / 1,1 = 108,5 \text{ А}$$

Обираємо ЛЕП з перерізом 70 мм². Параметри на один ланцюг: $\Delta P_{1км} = 125$ кВт/км; $I_{доп} = 265$ А; $K_0 = 1067,5$ тис.грн/км

Коефіцієнт завантаження лінії:

$$K_3 = I_p / (n \cdot I_{доп}) = 119,4 / (2 \cdot 265) = 0,25$$

Завантаження трансформаторів:

$$K_3 = 7007,8 / (2 \cdot 6300) = 0,57$$

Живлення навантаження в аварійному режимі

$$S = 1,4 \cdot S_{н.тр.} = 1,4 \cdot 6300 = 8820 > 7007,8 \text{ кВА.}$$

Втрати енергії в лінії:

$$\Delta P_{л} = \Delta P_{1км} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_3^2 = 125 \cdot 1,6 \cdot 0,25^2 = 12,5 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{л} = \Delta P_{1км} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_3^2 = 125 \cdot 1,6 \cdot 0,25^2 = 12,5 \text{ кВт}$$

Втрати енергії в трансформаторах:

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

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{тр}} = 2 \cdot (\Delta P_{\text{х}} \cdot t_{\text{вкл}} + \Delta P_{\text{к}} \cdot \tau \cdot K^2_3) = 2 \cdot (9,25 \cdot 8760 + 46,5 \cdot 4747 \cdot 0,57^2) = 2 \cdot (81030 + 45912,8) = 253885,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сумарні втрати енергії:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{л}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{тр}} = 37987,5 + 253885,6 = 291873,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість втрат енергії:

$$C_{\text{пот}} = \Delta \mathcal{E} \cdot C_0 = 291873,1 \cdot 9,0 = 2626860 \approx 2627 \text{ тис.грн.}$$

Варіант №2. Живлення заводу кабельною лінією напругою 10 кВ

Живлення заводу 10 кВ здійснюється кабелем до центрального розподільчого пункту (ЦРП) заводу (рис. 3.1(б)).

Розрахунковий струм в лінії:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_n} = 7007,8 / (1,73 \cdot 10) = 417 \text{ А}$$

Площа перерізу кабельної лінії:

$$F_{\text{ек}} = I_p / J_{\text{ек}} = 417,8 / 1,2 = 348,2 \text{ мм}^2$$

Обираємо дві кабельні лінії з перерізом 185 мм², кабель ААШв (3×185) з навантаженням $I_{\text{доп}} = 310 \text{ А}$, втрати потужності на 1 км.

Параметри на один ланцюг: $\Delta P_{1\text{км}} = 64 \text{ кВт/км}$; $K_0 = 690 \text{ тис.грн/км}$ [11].

Допустимий довготривалий струм навантаження:

$$I_{\text{доп}}' = I_{\text{доп}} \cdot \kappa_{\Pi} = 310 \cdot 0,84 = 260,4 \text{ А},$$

Коефіцієнт попереднього завантаження кабелю

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

$$K_3 = I_p / (n I_{\text{доп}}) = 417 / (2 \cdot 260,4) = 0,8.$$

Приймаємо кабель ААШв (3×240) з допустимим навантаженням $I_{\text{доп}} = 355 \text{ А}$, втрати потужності на 1 км Параметри на один ланцюг: $\Delta P_{1\text{км}} = 78 \text{ кВт/км}$; $K_0 = 750 \text{ тис. грн/км}$.

Допустимий струм навантаження:

$$I_{\text{доп}}' = I_{\text{доп}} \cdot K_{\Pi} = 355 \cdot 0,84 = 298,2 \text{ А},$$

Коефіцієнт завантаження кабелю:

$$K_3 = I_p / (n I_{\text{доп}}') = 417 / (2 \cdot 298,2) = 0,69.$$

Струм в аварійному режимі

$$I_{\text{АВ доп}} = n \cdot K_{\text{АП}} \cdot K_{\Pi}^{\text{ав}} \cdot I_{\text{доп}} = 2 \cdot 1,25 \cdot 0,84 \cdot 355 = 745,5 \text{ А} > 417 \text{ А},$$

Втрати потужності та енергії в лінії:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P_{\text{л}} \cdot \tau = 118,8 \cdot 4747 = 361138,2 \text{ кВт·год}$$

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{1\text{км}} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_3^2 = 78 \cdot 3,2 \cdot 0,69^2 = 118,8 \text{ кВт}$$

Вартість втрат енергії:

$$C_{\text{пот}} = \Delta \mathcal{E} \cdot C_0 = 361138,2 \cdot 15 = 4153080 \approx 4153 \text{ тис.грн.}$$

Де C_0 - вартість 1 кВт год електроенергії.

Розрахунки витрат по варіантах заносимо до таблиць 3.1 – 3.3.

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

Таблиця 3.1. Розрахунок капітальних вкладень.

№ варіанта	Найменування елемента схеми	Одиниця	Кількість	Вартість одиниці, тис.грн	Вартість всього, тис.грн
I	Вимикачі 35 кВ, що додатково встановлюються на п/ст енергосистеми	шт.	2	809	1618
	Повітряна лінія 35 кВ				1080
	АС – 70	км	1,6	675	
	ОРУ 35 кВ	шт.	1	1460	1460
	Тр – ри ТДН-10000/35	шт.	2	1820	3640
	Всього				7798
II	Вимикачі 10 кВ, що додатково встановлюються на п/ст енергосистеми	шт.	2	309	618
	Кабельна лінія 10 кВ				3500
	ААШв – 240	км	3,2	1750	
	Всього				4118

Таблиця 5.2. Розрахунок поточних витрат.

№ варіанта	Найменування елемента схеми	К _j , тис. грн.	Р _{aj} , %	С _{aj} , тис. грн.	Р _{эj} , %	С _{эj} , тис. грн.	С _j , тис. грн.
I	Вимикачі 35 кВ, що додатково встановлюються на п/ст енергосистеми	1618	15	242,7	5	80,9	323,6
	Повітряна лінія 35 кВ	108	5	54	5	54	108
	ОРУ 35 кВ	146	15	219	5	73	292
	Трансформатори	364	15	546	5	182	728
	Всього			1061,7		389,9	1452
II	Вимикачі 10 кВ, що додатково встановлюються на п/ст енергосистеми	618	15	92,7	5	30,9	123,6
	Кабельна лінія 10 кВ						
	ААШв – 240	3500	5	175	5	175	350
	Всього			262,7		205,9	373,6

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

Розрахунок вірогідних збитків від перерв в електропостачанні для варіант 1

⋮

вимикач 35 кВ: $\lambda_a=0,03$ 1/рік; $T_b=2,8 \cdot 10^{-3}$ років; $K_{\pi}=6,5 \cdot 10^{-3}$ в.о.

повітряна лінія 35 кВ: $\lambda_a=0,045$ 1/рік; $T_b=0,4 \cdot 10^{-3}$ років; $K_{\pi}=5 \cdot 10^{-3}$ в.о.

силовий трансформатор: $\lambda_a=0,02$ 1/рік; $T_b=60 \cdot 10^{-3}$ років; $K_{\pi}=7,5 \cdot 10^{-3}$ в.о.

Параметр потоку відмов одного ланцюга ЛЕП:

$$\lambda_a = \sum \lambda_{ai} = 0,03 + 0,045 + 0,02 = 0,095 \text{ 1/рік};$$

Середній час відновлення одного ланцюга:

$$T_b = \sum (\lambda_{ai} T_{bi}) / \lambda_a = (0,03 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} + 0,045 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} + 0,02 \cdot 60 \cdot 10^{-3}) / 0,095 = 13,7 \cdot 10^{-3} \text{ год/рік}$$

Коефіцієнт планового простою одного ланцюга:

$$K_{\pi} = 1,2 K_{\pi \max} = 1,2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 11,25 \cdot 10^{-3} \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт аварійного простою одного ланцюга:

$$K_a = \lambda_a \cdot T_b = 0,095 \cdot 13,7 \cdot 10^{-3} = 1,305 \cdot 10^{-3} \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт аварійного простою:

$$K_{ап} = 0,5 \cdot \lambda_a \cdot K_{\pi}^2 = 0,5 \cdot 0,095 \cdot (11,25 \cdot 10^{-3})^2 = 5,34 \cdot 10^{-6} \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт аварійного простою двох ліній:

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2 K_{ап} = (1,305 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot 5,34 \cdot 10^{-6} = 12,38 \cdot 10^{-6} \text{ в.о.}$$

Середньорічний час аварійного простою:

$$T_a = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 12,38 \cdot 10^{-6} \cdot 8760 = 0,012 \text{ год/рік.}$$

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

Збитки від аварійного недовідпуску 1 кВт · год електроенергії при $y_0=14,25$ грн.:

$$Y = y_0 P_{cp} T_a = 14,25 \cdot 3879,5 \cdot 0,012 = 197 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.3. Техніко-економічні показники варіантів (в тис.грн.)

Показники	Варіант	
	2	3
Капіталовкладення	7798	4118
Поточні затрати	1451	376,4
Вартість втрат електроенергії	2624	4153
Збитки	197	256
Приведені затрати	488,1	519,42

Як видно з розрахунків за приведеними витратами варіант живлення напругою 10 кВ є більш доцільним, приймаємо варіант живлення 10 кВ для подальшого проектування.

4. Режими реактивної потужності системи електропостачання

Одним із фундаментальних завдань, що потребує вирішення на етапах розроблення та подальшої експлуатації систем промислового електропостачання (СЕП), є мінімізація та компенсація реактивної потужності. Ефективність цього процесу безпосередньо залежить від обґрунтованого вибору технічних параметрів джерел реактивної потужності (ДРП) та їх раціонального просторового розподілу всередині внутрішньозаводської мережі підприємства.

Транспортування реактивної складової потужності від системних джерел енергосистеми через магістральні лінії та силові трансформатори заводу є економічно неефективним.

4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв

Обчислення балансу реактивної потужності на шинах цехових трансформаторних підстанцій ЦТП-1 та ЦТП-2 виконується з метою визначення оптимальної потужності та структури компенсуючих пристроїв (КП). Впровадження КП дозволяє забезпечити підтримання нормативного коефіцієнта потужності на межі балансової належності між підприємством та енергопостачальною організацією, а також мінімізувати технологічні втрати активної потужності й енергії в елементах внутрішньозаводської розподільної мережі. Фактичний коефіцієнт потужності та відповідний йому коефіцієнт реактивної потужності обчислюються на основі знайдених навантажень за такими аналітичними залежностями:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_p}{P_p}$$

Для того, щоб підвищити коефіцієнт потужності до нормативного або економічно доцільного значення (зазвичай $\cos \varphi = 0,92 \dots 0,95$), необхідно розрахувати потрібну потужність конденсаторної батареї (КБ).

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

Активне та реактивне навантаження в мережі до 1000 В (ЦТП):

$$P_H = 3675 \text{ кВт}$$

$$Q_H = 2642 \text{ квар}$$

Сумарне споживання по заводу:

$$P_p = P_B + P_H + \Delta P_{tr} = 3287 + 3675 + 44,3 = 7148,3 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_B + Q_H + \Delta Q_{tr} = 2934 + 2649 + 364,5 = 6895,4 \text{ квар}$$

Економічно потужність, що може бути передана від системи:

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_3 = 7148,3 \cdot 0,15 = 1072,2 \text{ квар}$$

Тоді сумарна потужність компенсуючих при-їв:

$$Q_{ky} = Q_p - Q_e = 6895,4 - 1072,2 = 5823,2 \text{ квар}$$

Визначаємо мінімальну кількість трансформаторів :

$$N_0 = P_H / (K_3 \cdot S_{H \text{ тр}}) = 3287 / (0,7 \cdot 630) = 10,908$$

Приймаємо $N_0 = 11$

Розглянемо варіанти компенсації при кількості трансформаторів $N = N_0$, $N = N_0 + 1$, $N = N_0 + 2$

Варіант I: $N = N_0 = 11$

Визначаємо реактивну потужність, яка може бути передана з мережі 10 кВ:

$$Q_n = \sqrt{(n \cdot S_m \cdot K_3)^2 - P_H^2} = \sqrt{(11 \cdot 630 \cdot 0,7)^2 - 3287^2} = 756,77 \text{ квар}$$

Потужність компенсуючих пристроїв в мережі 0,4 кВ:

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

$$Q_{\text{кн}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{п}} = 6245,3 - 756,77 = 5488,5 \text{ квар}$$

Приймаємо до встановлення $Q_{\text{кн}} = 5826$ квар, з них

Уточнюємо

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{кн}} = 6245,3 - 5826 = 419,3 \text{ квар}$$

Потужність КП, встановлюємих на шинах 10 кВ:

Потужність компенсуючих пристроїв 10 кВ:

$$Q_{\text{кв}} = Q_{\text{р}} - Q_{\text{кн}} - Q_{\text{е}} = 7007 - 5826 - 1072,2 = 334,63 \text{ квар}$$

Активні втрати в трансформаторах цехових ТП:

$$\Delta P_{\text{ТП}} = Q_{\text{п}}^2 * R_{\text{ек}} / U_{\text{н}}^2 = 419,3^2 * 102 / 10 = 0,18 \text{ кВт}$$

$$R_{\text{ек}} = (\Delta P_{\text{кз}} * U_{\text{н}}^2) / (N_{\text{тр}} * S_{\text{нтр}}^2) = (6,5 * 10^2) / (11 * 630) = 102,356 * 10^{-6} \text{ Ом}$$

Втрати активної потужності у НБК:

$$\Delta P_{\text{кн}} = \Delta P_{\text{пит}} * Q_{\text{кн}} = 0,003 * 5826 = 17,478 \text{ кВт}$$

Вартість низьковольтних конденсаторних батарей:

$$K_{\text{кн}} = N_{\text{бк}}^{0,4} * K_{\text{кку}}^{0,4} = 10 * 131 + 2 * 80,5 + 2 * 70,9 + = 1868,8 \text{ тис. грн.}$$

Вартість комплектних трансформаторних підстанцій:

$$K_{\text{ктп}} = N_{\text{ТП(1)}} * K_{\text{ТП(1)}} + N_{\text{ТП(2)}} * K_{\text{ТП(2)}} = 3 * 625 + 4,0 * 1073,5 = 8316 \text{ тис. грн.}$$

Розрахункові витрати на КП

$$Z_1 = E_{\text{н}} * (K_{\text{кн}} + K_{\text{кв}} + K_{\text{ктп}}) + (\Delta P_{\text{кн}} + \Delta P_{\text{кв}} + \Delta P_{\text{ТП}}) * C_0 * \tau = 0,12 * (186,88 + 0,00 + 831,60) + (17,478 + 0,00 + 0,18) * 15 * 4747 = 4277 \text{ тис. грн.}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		38

Таблиця 4.1. Баланс реактивної потужності.

Показники	Варіант I	Варіант II
Потужність КП в мережі 0,4 кВ	5826	4016
Потужність КП в мережі 10 кВ	2700	3200
Споживання реактивної потужності	1072,245	1072,245
Всього за умовою балансу	6898,245	6888,245
Затрати на компенсацію	4277	6954,3

Отже приведені затрати першого варіанту компенсації найменші, його і приймаємо для подальшого розрахунку.

4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв

Для обраного варіанту розраховуємо реактивну потужність, яку можна передати через ТП в мережі, та потужність компенсуючих пристроїв, що встановлюються в цехових мережах.

Реактивна потужність, яку потрібно скомпенсувати в мережі НН ТП 1:

$$Q_n = \sqrt{(n \cdot S_m \cdot K_3)^2 - P_n^2} = \sqrt{(2 \cdot 630 \cdot 0,7)^2 - 616,6^2} = 0 \text{ квар}$$

$$Q_{кп} = Q_n - Q_{п} = 396 - 0 = 396 \text{ квар}$$

Приймаємо до встановлення $Q_{кп} = 402$ квар

$$1 \text{ шт КРМ} - 0,4 - 402 - 67 \text{ УЗ}$$

Аналогічно проводимо інші розрахунки. Результати розрахунків зводимо в таблицю 1.4

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

5. Вибір кількості, потужності трансформаторів і підстанцій підприємства

Головні знижувальні підстанції (ГЗП) промислових підприємств у більшості проектних рішень реалізуються за двотрансформаторною схемою. Така структура комутації дозволяє гарантувати необхідний рівень надійності та безперебійності інженерних мереж для споживачів усіх категорій (зокрема I та Особливої). Спорудження однострансформаторних ГЗП допускається як виняток лише за умови, що резервування навантажень першої категорії надійності у післяаварійних режимах може бути повноцінно забезпечене через міжпідстанційні зв'язки по лініях вторинної розподільної напруги (6–10 кВ) від суміжних незалежних джерел живлення.

Розрахунок базується на критерії післяаварійного живлення: у разі раптового виходу з ладу одного з трансформаторів, той, що залишився в роботі, повинен самостійно забезпечувати безперервність основного технологічного процесу на період ремонту або заміни пошкодженого агрегату. При цьому допускається тимчасове відключення другорядних (нетехнологічних) споживачів III категорії без завдання збитків профільному виробництву, а також повне використання нормативної перевантажувальної здатності силового трансформатора згідно з вимогами державних стандартів. Отже встановлюємо на ГПП два трансформатори потужністю:

$$S_{\text{ном.тр}} = S_p / (2 \cdot 0,7) = 7007,8 / 1,4 = 5162,7 \text{ кВА}$$

Обираємо трансформатор типу ТМН – 6300/35 з такими параметрами:

$$\Delta P_k = 46,5 \text{ кВт}, \Delta P_{xx} = 46,5 \text{ кВт}, U_{k \text{ вн-нн}} = 7,5\%,$$

Завантаження трансформаторів в нормальному режимі:

$$K_3 = 7007,8 / (2 \cdot 6300) = 0,57$$

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

Таблиця 5.1. Технічні характеристики трансформатора

T_{un}	$S_{ном}$	$U_{вн}$	$U_{нн}$	$U_{к, \%}$	$\Delta P_{к}$	$\Delta P_{х}$
ТМН-6300/35	6,3	35	11	7,5	47	9,2

Отже обрані трансформатори задовольняють умовам перевантаження, і допускають подальший ріст енергетичних потужностей підприємства.

Таблиця 5.2. Вибір кількості та потужності цехових трансформаторів

№ ТП	S_p , кВА		Кількість та потужність трансформаторів, кВА	K_3	Вид ТП	Місце розташування ТП
	без КП	з КП				
ТП№1	732,2	672,8	2х630	0,53	Вбудов.	Офісно-побутовий центр
ТП№ 2,3	1411,7	1188,6	3х630	0,63	Вбудов.	Комплекс приготування шихти
ТП№4	1081,8	920,5	2х630	0,73	Вбудов.	Виробнича лінія №83
ТП№ 5	883,9	761,5	2х630	0,60	Вбудов.	Дільниця №82
ТП№6	445,6	356,5	1х630	0,59	Вбудов.	Ремонтно-механічний комплекс
ТП№ 7	391,5	351,7	1х630	0,56	Вбудов.	Енергетичний комплекс

Таблиця 5.3. Перевірка трансформаторів за аварійним навантаженням

№ ТП	S_p , кВА		K_3	$S_{н.тр} > S_p / K_1$	$S_{н.тр} > S_p / K_2$
	без КП	з КП			
ТП№1	732,2	672,8	0,53	630 > 311,5	630 > 261,5
ТП№ 2,3	1411,7	1188,6	0,63	630 > 366,8	630 > 336,1
ТП№4	1081,8	920,5	0,73	630 > 426,2	630 > 386,3
ТП№ 5	883,9	761,5	0,60	630 > 352,6	630 > 315,7
ТП№6	445,6	356,5	0,59	630 > 330,1	630 > 318,3
ТП№ 7	391,5	351,7	0,56	630 > 325,6	630 > 279,7

6. Розрахунок струмів короткого замикання, вибір високовольтного обладнання та високовольтних електричних мереж

Передумовою для проведення аналітичного розрахунку струмів короткого замикання (КЗ) є формування розрахункової схеми в однолінійному виконанні. Цей графічний документ повинен відображати всі без винятку джерела енергосистеми та внутрішньої генерації, що беруть безпосередню участь у підживленні аварійної точки, а також пасивні елементи системи електропостачання (силові трансформатори, кабельні та повітряні лінії, струмообмежувальні реактори), які геометрично та електрично розташовані між цими джерелами й безпосереднім місцем виникнення КЗ.

Під час аналізу перехідних процесів такі динамічні елементи мережі, як синхронні компенсатори, а також великі синхронні та асинхронні електродвигуни технологічних агрегатів (зокрема, потужні двигуни компресорів чи вентиляторів склозаводу), обов'язково класифікуються як додаткові джерела живлення, оскільки вони здатні генерувати зворотний струм у початковий момент аварії.

6.1 Розрахунок струмів короткого замикання

Перед розрахунком струмів КЗ складаємо розрахункову схему (рис. 6.1) на якій намічаємо точки, в яких треба розрахувати струми короткого замикання.

По розрахунковій схемі складаємо схему заміщення, на якій всі елементи представлені у вигляді опорів.

Для розрахунку струмів КЗ в проекті використовуємо розрахунковий САПР програм кафедри. Результати розрахунків представлені у вигляді таблиці.

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

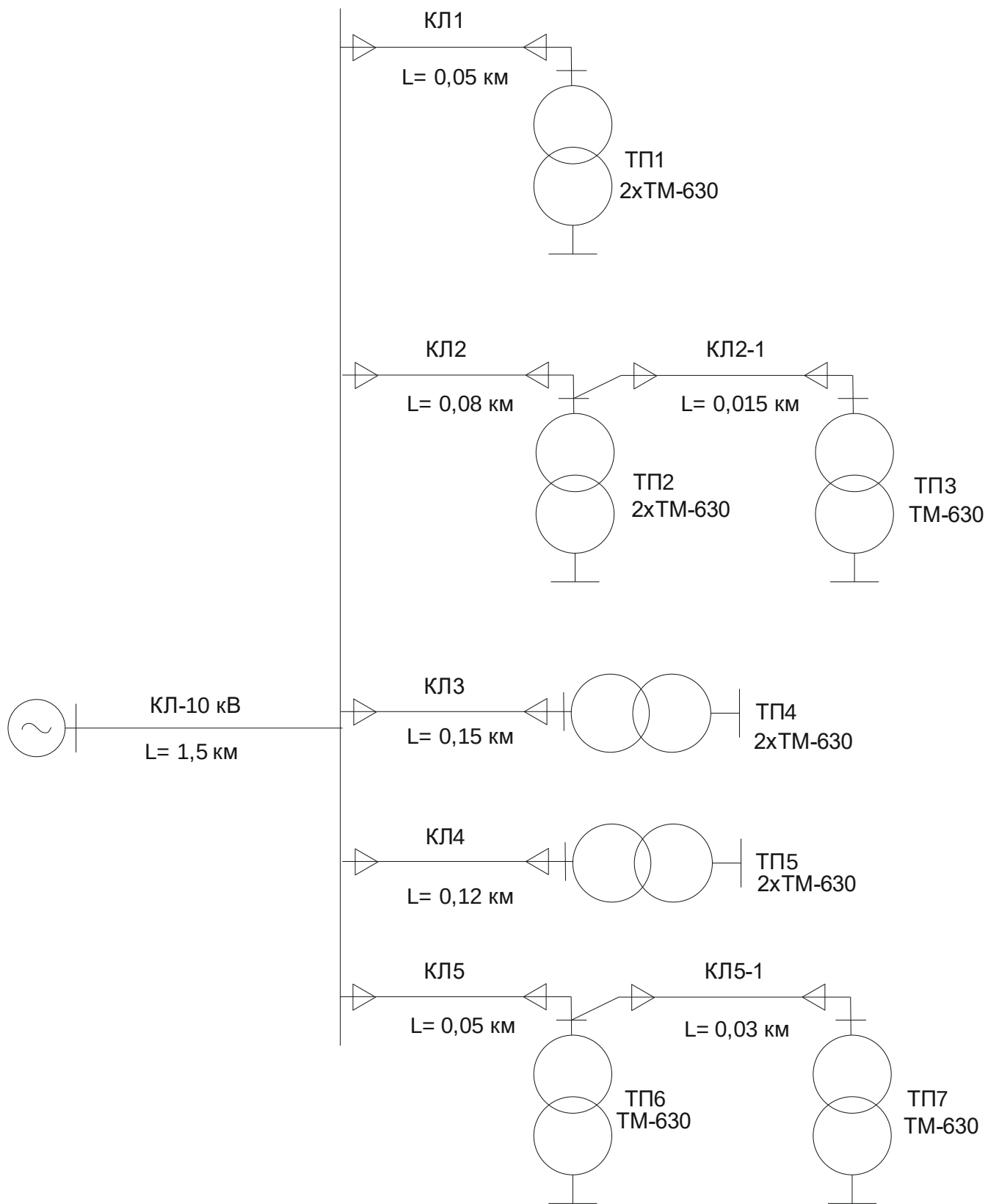


Рис.6.1 Схема для розрахунку струмів КЗ

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

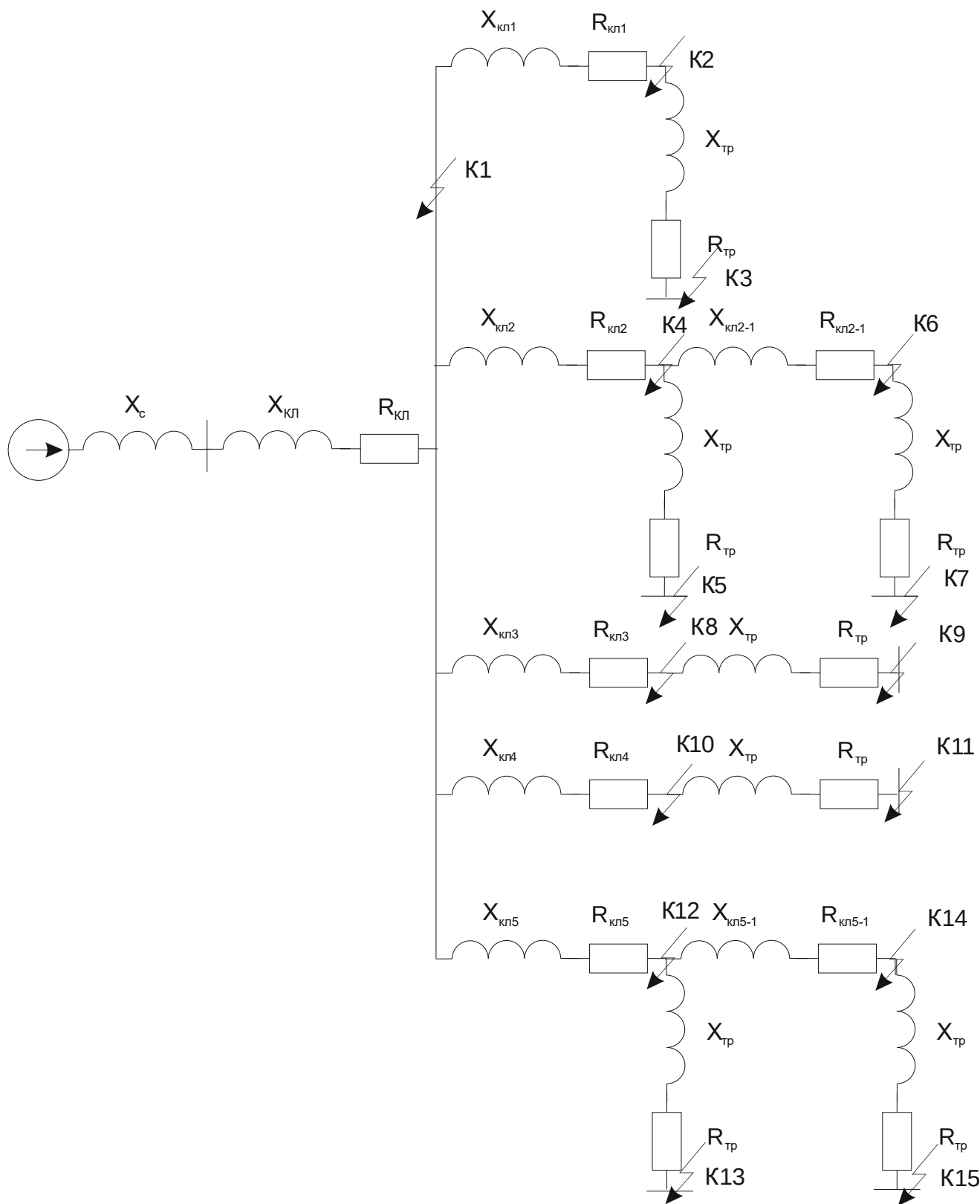


Рис.6.2 Схема заміщення для розрахунку струмів КЗ

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

Номінальна напруга кабельної лінії $U_n = 10$ кВ. Лінія виконана проводом марки ААШв довжиною $L_1 = 1,5$ км та перерізом $F = 240$ мм². Параметри лінії від ЦРП до цехової ТП Номінальна напруга кабельної лінії $U_n = 10$ кВ. Лінія виконана кабелем марки $F_{ct} = 70$ мм², довжиною $L_{кл} = 0,05$ км.

Номінальна потужність трансформатора ТП1 складає $S_{тр} = 630$ кВА. На ТП встановлений трансформатор типу: ТМ- 630 з параметрами: $\Delta P_{хх} = 1,31$ кВт ; $\Delta P_{кз} = 10$ кВт; $U_{к\%} = 5,6$ %

Реактивний опір системи:

$$X_c = S_6 / S_{кз} = 125 / 94 = 1,3$$

Реактивний опір лінії напругою 10 кВ до ЦРП :

$$X_{л1} = X_o * L * S_6 / U_{61}^2 = 0,22 * 1,5 * 100 / 11^2 = 0,30$$

Активний опір лінії напругою 10 кВ до ЦРП :

$$R_{л1} = R_o * L * S_6 / U_{61}^2 = 0,06 * 1,5 * 100 / 11^2 = 0,08$$

Для кабельної лінії напругою 10 кВ визначаємо:

Реактивний опір лінії напругою 10 кВ від ЦРП до ТП:

$$X_{кл1} = X_o * L * S_6 / U_{62}^2 = 0,48 * 0,05 * 100 / 11^2 = 0,078$$

Активний опір лінії напругою 10 кВ:

$$R_{кл1} = R_o * L * S_6 / U_{62}^2 = 0,06 * 0,05 * 100 / 11^2 = 0,010$$

Опір трансформатора напругою 10/0,4 кВ

$$R_{ТП} = \Delta P_M * S_6 / S_{2н.тр} = 10,00 * 100000 / 630^2 = 2,5$$

$$X_{тр} = \sqrt{(U_k/100)^2 - (\Delta P_M / S_{н.тр})^2} * S_6 / S_{н.тр} =$$

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

$$\sqrt{(5,55 / 100)^2 - (10,00 / 630)^2} * 100000 / 630 = 8,4$$

Спростуємо схему заміщення. Результуючий опір до точки К1

$$R_{K1} = R_{Л1} = 0,08$$

$$X_{K1} = X_c + X_{Л1} = 1,33 + 0,299 = 1,63$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{Л1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,082^2 + 1,629^2} = 1,63$$

Результуючий опір до точки К2

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{КЛ1} = 0,08 + 0,0 = 0,09$$

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{КЛ1} = 1,629 + 0,08 = 1,71$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,1^2 + 1,71^2} = 1,71$$

Результуючий опір до точки К3

$$R_{K3} = R_{тр} + R_{K2} = 2,5 + 0,1 = 3$$

$$X_{K3} = X_{тр} + X_{K2} = 8,4 + 1,7 = 10,15$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{2,6^2 + 10,1^2} = 10,5$$

Визначаємо трифазні струми К3. В точці К1 діюче значення періодичної складової струму складатиме:

$$I_{K1} = I_{б1} / Z_{K1} = 5,5 / 1,63 = 3,66 \text{ кА.}$$

Амплітудне значення струму на шинах напругою 10 кВ

$$i_{y1} = \sqrt{2} * k_y * I_{K1} = 1,4 * 1,27 * 3,375 = 9,31 \text{ кА}$$

Розрахунок для інших точок схеми зводимо до таблиці 6.1

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

Таблиця 6.1. Результати розрахунку струмів КЗ по розрахункових точках

Точка схеми	$R_{TK\Sigma}$	$X_{TK\Sigma}$	$Z_{TK\Sigma}$	$I_{K3}=I_6/Z_{K3\Sigma}$	$i_{уд}=2*k_y*I_{K3}$
TK32	0,1	1,7	1,7	3,4	8,1
TK33	2,6	10,1	10,5	13,8	29,0
TK34	0,1	1,7	1,7	3,3	7,6
TK35	2,6	10,1	10,4	13,9	29,1
TK36	0,1	1,7	1,7	3,3	7,5
TK37	2,6	10,1	10,4	13,8	29,1
TK38	0,1	1,7	1,7	3,2	7,5
TK39	2,6	10,1	10,5	13,8	29,0
TK310	0,1	1,7	1,7	3,3	7,5
TK311	2,6	10,1	10,5	13,8	29,0
TK312	0,1	1,7	1,7	3,3	8,1
TK313	2,6	10,1	10,4	13,9	29,1
TK314	0,1	1,7	1,7	3,3	7,6
TK315	2,6	10,1	10,4	13,9	29,1

6.2. Вибір кабелів напругою 10 кВ для високовольтної мережі заводу

Розрахунковий струм в лінії до ТП1:

$$I_p = \frac{S_p}{N \sqrt{3} U_n} = 433,5 / 1,73 \cdot 10 = 25,6 \text{ А}$$

Площа перерізу кабельної лінії:

$$F_{ек} = I_p / J_{ек} = 25,6 / 1,1 = 18,3 \text{ мм}^2$$

Приймаємо стандартний переріз 35 мм² кабеля. Приймаємо кабель марки ААШв – 10 (3 х 35). Кількість в лінії n = 2

Допустимий довготривалий струм навантаження в одній траншеї:

$$I_{доп}' = I_{доп} \cdot K_{\pi} = 115 \cdot 0,9 = 126 \text{ А};$$

Коефіцієнт попереднього завантаження кабеля

$$K_3 = I_p / (n \cdot I_{доп}') = 25,6 / 126 = 0,2$$

Тепловий імпульс:

$$B_k = I_{no}^2 (t_{отк} + T_a) = 3,39^2 \cdot (1,00 + 0,05) = 12,7$$

Мінімальна площа перерізу кабелю, що відповідає вимогам термічної стійкості:

$$F_{тер} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{12,7}}{92} = 37 \text{ мм}^2 > 35 \text{ мм}^2$$

Приймаємо для використання кабель марки ААШв – 10 (3х50). Для даного кабеля допустимий тривалий струм $I_{доп} = 140 \text{ А}$.

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

Зм.	
Арк.	
№ док-м.	
Підпис.	
Дата	
49	Арк.

Таблиця 6.2. Вибір кабельних ліній 10 кВ заводської мережі

№КЛ	Sp, кВА	n	Ip	Ip.ав	Гек, мм	Марка кабеля	Ідоп,А	Кп	Iав	Вк
КЛ1	336,4	1	19,4	27,2	13,9	ААШВ(3× 50)	140	0,9	145	12
КЛ2	594,3	1	34,4	34,4	24,5	ААШВ(3× 50)	140	1	161	12
КЛ2-1	396,2	1	22,9	32,1	20,8	ААШВ(3× 50)	140	0,9	145	12
КЛ3	920,5	1	53,2	74,5	38,0	ААШВ(3х 50)	140	0,9	145	12
КЛ4	761,5	1	44,0	61,6	31,4	ААШВ(3х 50)	140	0,9	145	12
КЛ5	708,2	1	40,9	57,3	29,2	ААШВ(3х 50)	140	0,9	145	12
КЛ5-1	336,4	1	19,4	27,2	13,9	ААШВ(3х 50)	140	0,9	145	12

6.3. Вибір високовольтного обладнання

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	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$450 \leq 630$
Відключаюча здатність: - симетричний струм: - аперіодична складова: - повний струм:	$I_{n\tau} \leq I_{відкл.ном}$ $i_{a\tau} \leq \sqrt{2}\beta_n I_{відкл.ном}$ $\sqrt{2}I_{n\tau} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл}(1 + \beta_n)$	$3,39 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 3,39 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $4,79 \leq 39,6$
Динамічна стійкість: - симетричний струм: - ударний струм:	$I'' \leq I_{дин.ст}$ $i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст}$	$3,39 \leq 52$ $8,38 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{TH}^2 t_{TH}$	$14,67 \leq 1200$

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

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

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

$$i_{a\tau} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 3,39 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0345}} = 0 \text{ кА}$$

Тепловий імпульс від струму к.з.:

$$B_k = I''^2 (t_{с.в.} + t_{пз.маx} + T_a) = 3,39^2 (0,042 + 1,2 + 0,0345) = 14,67 \text{ кА}^2 \text{ с}$$

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

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

Таблиця 6.4. Вибір секційного вимикача напругою 10 кВ

Параметр вимикача	Умова вибору	Розрахунок
Номінальна напруга, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 10$
Довготривалий струм, кА	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$225 \leq 630$
Відключаюча здатність: - симетричний струм: - аперіодична складова: - повний струм:	$I_{n\tau} \leq I_{відкл.ном}$ $i_{a\tau} \leq \sqrt{2}\beta_n I_{відкл.ном}$ $\sqrt{2}I_{n\tau} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл}(1 + \beta_n)$	$3,39 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 3,39 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $4,79 \leq 39,6$
Динамічна стійкість: - симетричний струм: - ударний струм:	$I'' \leq I_{дин.ст}$ $i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст}$	$3,39 \leq 52$ $8,38 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{TH}^2 t_{TH}$	$16,97 \leq 1200$

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

$$\tau = t_{pz.min} + t_{c.в} = 0,7 + 0,042 = 0,742 \text{ с}$$

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

$$i_{a\tau} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 3,39 \cdot e^{\frac{-0,742}{0,0345}} = 0 \text{ кА}$$

Тепловий імпульс від струму к.з.:

$$B_k = I''^2 (t_{c.в.} + t_{pz.max} + T_a) = 3,39^2 (0,042 + 1,4 + 0,0345) = 16,97 \text{ кА}^2 \text{ с}$$

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

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		51

Таблиця 6.5. 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	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$152,52 \leq 630$
Відключаюча здатність: - симетричний струм: - аперіодична складова: - повний струм:	$I_{n\tau} \leq I_{відкл.ном}$ $i_{a\tau} \leq \sqrt{2}\beta_n I_{відкл.ном}$ $\sqrt{2}I_{n\tau} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл}(1 + \beta_n)$	$3,39 \leq 20$ $0 \leq 11,31$ $1,41 \cdot 3,39 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $4,79 \leq 39,6$
Динамічна стійкість: - симетричний струм: - ударний струм:	$I'' \leq I_{дин.ст}$ $i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст}$	$3,39 \leq 52$ $8,38 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{TH}^2 t_{TH}$	$14,67 \leq 1200$

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

$$\tau = t_{пз.мин} + t_{с.в} = 0,9 + 0,042 = 0,942 \text{ с}$$

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

$$i_{a\tau} = \sqrt{2}I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 3,39 \cdot e^{\frac{-0,942}{0,0345}} = 0 \text{ кА}$$

Тепловий імпульс від струму к.з.:

$$B_k = I''^2 (t_{с.в.} + t_{пз.мах} + T_a) = 3,39^2 (0,042 + 1,2 + 0,0345) = 14,67 \text{ кА}^2\text{с}$$

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

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

На напругу 10 кВ приймаємо до встановлення обмежувач перенапруги типу ОПН-10/420/12-УХЛ1. Його каталожні дані:

Номинальна напруга, $U_{ном} : 10,5 \text{ кВ}$

Найбільша допустима напруга, $U_{max} : 12 \text{ кВ}$

Номинальний струм, $I_{ном} : 200 \text{ А}$

Таблиця 6.6. Вибір трансформаторів власних потреб (ЦРП)

№ п/п	Споживачі	$P_{ном},$ кВт	$n,$ шт.	$P_{сум},$ кВт	$\cos \phi$	$tg \phi$	$P_{уст},$ кВт	$Q_{уст},$ кВАр
1.	Засоби підігріву комірок КРП	0,6	12	7,2	0,97	0,25	7,2	2
2.	Опалення і освітлення приміщення КРП	6	3	18	0,97	0,25	18	5
3.	Зовнішнє освітлення КРП	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
4.	Споживання оперативними колами РЗА	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. Енергозбереження та шляхи підвищення енергетичної ефективності в асинхронних електроприводах

Прогрес у математичній теорії електричних машин змінного струму, поява високоефективних силових напівпровідникових компонентів і перетворювачів частоти на їхній основі, а також інтеграція мікропроцесорних систем керування зумовили створення прецизійних та високонадійних асинхронних електроприводів із частотним регулюванням. На сучасному етапі розвитку автоматизованого привода дана технологія посіла домінуюче становище на світовому ринку: системи змінного струму охоплюють близько 68% загального обсягу впровадження, тоді як на електроприводи постійного струму припадає лише 15%, а на механічні та гідравлічні трансмісії — 17%.

Тенденція до витіснення приводів постійного струму асинхронними машинами є об'єктивною і довготривалою, оскільки масове розгортання регульованих систем можливе лише на базі трифазних асинхронних двигунів (АД) із короткозамкненим ротором. Це підтверджується структурою машинобудування: у сегменті потужностей до 100 кВт обсяги виробництва АД у 40 разів перевищують випуск машин постійного струму.

Сучасний регульований електропривод перестав бути виключно енергосиловим вузлом для генерації механічного моменту. Сьогодні він є безпосереднім та ефективним інструментом безперервного керування технологічними параметрами, оскільки завдання оптимізації якості виробничих процесів реалізуються локальними системами керування електроприводів у координації із засобами промислової автоматики (АСУ ТП).

В умовах перманентного зростання вартості первинних енергоносіїв та обмежених темпів нарощування генерації електричної енергії, завдання підвищення енергоефективності промислових об'єктів набувають критичного значення. Енергозбереження визнано пріоритетним вектором технічної політики розвинених країн з огляду на такі глобальні фактори:

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

1. Вичерпність і невідновлюваність традиційних викопних паливно-енергетичних ресурсів;
2. Постійне ускладнення процесів видобутку енергоносіїв та зростання їхньої капіталомісткості;
3. Необхідність жорсткого зниження антропогенного навантаження на біосферу та декарбонізації виробництва.

Економічні розрахунки доводять, що енергозбереження є найбільш рентабельним і безпечним методом покриття дефіциту потужності в енергосистемі: питомі витрати на вивільнення (економію) 1 кВт потужності в 3–4 рази нижчі за капіталовкладення, необхідні для введення в експлуатацію аналогічної одиниці генерації на електростанціях.

Оскільки до 90% загальних втрат енергії фіксується безпосередньо у сфері споживання, саме тут мають бути сконцентровані основні інженерні зусилля. Враховуючи, що на частку електромеханічних систем припадає майже 70% усього промислового електроспоживання, найвагоміший потенціал оптимізації криється у впровадженні частотно-регульованих асинхронних електроприводів (ЧРП) для магістральних технологічних потоків.

Інтенсифікація переробних виробництв супроводжується стрімким збільшенням електричних навантажень підприємств. Подальший розвиток виробничої інфраструктури вимагає реалізації таких підходів, які забезпечать зниження енергоємності одиниці готової продукції. Це передбачає не лише раціональне обґрунтування номінальної потужності проектного електрообладнання, а й забезпечення його роботи в режимах максимального коефіцієнта корисної дії. Через високі тарифи на енергоносії витрати на електричну енергію формують вагомую частку в собівартості продукції, безпосередньо впливаючи на її конкурентоспроможність.

Враховуючи обмежені фінансові можливості більшості вітчизняних підприємств переробного комплексу, що ускладнює одномоментне повне технічне переоснащення, особливої ваги набуває науково обґрунтований,

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

раціональний вибір черговості етапів впровадження енергозберігаючих інженерних рішень.

7.1. Стратегічні напрямки та методи підвищення енергоефективності асинхронних електроприводів

Аналіз сучасних методів та архітектур керування електромеханічними комплексами на базі асинхронних двигунів (АД) дозволяє класифікувати ключові підходи до оптимізації їхнього енергоспоживання за трьома фундаментальними напрямками.

- **Перший напрямок: Оптимізація внутрішніх втрат електропривода.** Focus цього підходу спрямований на мінімізацію перетворення енергії в тепло безпосередньо в елементах привода під час відпрацювання заданих технологічних тахограм і графіків навантаження. Сюди відносяться:
 - *Циклічні комплекси*, що функціонують у динамічних пуско-гальмівних режимах (кранові механізми, ліфтові підйомники, позиційні приводи конвеєрів);
 - *Тривалі комплекси* з квазістаціонарним або повільно змінним навантаженням (насосні станції, вентиляційні установки, гвинтові компресори, магістральні транспортери).

Зниження втрат як в усталених, так і в перехідних процесах забезпечує тут вагомий енергозберігаючий ефект. Крім того, у кінематично зв'язаних (багатодвигунових) системах оптимізація досягається шляхом прецизійного вирівнювання навантажень між окремими одиницями АД.

- **Другий напрямок: Модернізація технологічних процесів.** Передбачає перехід від механічних методів регулювання технологічних параметрів (дроселювання у насосах, шибєрування у вентиляторах) до електромеханічних — на основі зміни кутової швидкості привода. Впровадження регульованого ЧРП у турбомеханізмах та потокових лініях

						Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

автоматично трансформує саму технологію, що, окрім безпосередньої економії кіловат-годин, забезпечує комплексне заощадження суміжних супутніх ресурсів (мережевої води, пари, рідкого чи твердого палива).

- **Третій напрямок: Інтелектуальне керування потужними енергопотоками.** Стосується специфічних об'єктів, де відносно малопотужний автоматизований електропривод виступає як керуючий елемент для процесів, чия енергоємність на порядки вища (дугові сталеплавильні та вакуумні печі, індукційні нагрівальні комплекси). У цих системах привод потужністю в кілька кіловат безпосередньо впливає на стабільність і ККД установок мегаватного класу. Критерієм енергоефективності тут є не мінімізація власного споживання привода, а його швидкодія, динамічна точність та рівень автоматизації, що мінімізують загальні питомі витрати енергії на тонну виплавленого або обробленого матеріалу.

Практичні шляхи реалізації електрозбереження в асинхронному електроприводі

У межах першого, найбільш поширеного напрямку, виділяють такі практичні інженерні заходи:

На практиці коефіцієнт завантаження значної частини експлуатованих двигунів не перевищує 50%. Це свідчить про недосконалість класичних інженерних методик розрахунку або надмірне закладання коефіцієнтів запасу проектувальниками.

- *Наслідки неефективного вибору:* Двигун заниженої потужності швидко деградує та виходить з ладу через надмірне перегрівання ізоляції. Водночас АД із суттєвим завищенням потужності працює в зоні низького ККД та вкрай незадовільного коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$), що перевантажує живильну мережу реактивними струмами та збільшує втрати в трансформаторах.

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

- *Рішення:* Впровадження передових методик розрахунку, що базуються на комп'ютерному моделюванні теплових процесів, оцінці реальних динамічних навантажень та моніторингу стану ізоляції. Також критичним є викорінення практики безсистемної заміни пошкоджених двигунів випадковими аналогами лише за геометричними параметрами вала.

Перехід на сучасні серії двигунів підвищених класів енергоефективності (**IE3, IE4, IE5** відповідно до міжнародних стандартів) забезпечує зростання ККД за рахунок оптимізації геометрії пазів, використання високоякісної електротехнічної сталі з низькими питомими втратами на перемагнічування та збільшення маси активних матеріалів (міді й заліза). Попри вищу початкову вартість, такі машини повністю окупаються: за оцінками експертів, річна вартість спожитої АД електроенергії в середньому в п'ять разів перевищує його балансову вартість. Протягом багаторічного життєвого циклу обладнання чистий економічний ефект багаторазово перекидає додаткові капіталовкладення.

Заміна енерговитратного реостатного регулювання чи систем типу «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН-АД) на повнофункціональні частотно-регульовані електроприводи (ЧП-АД). Частотне керування, особливо за умови реалізації векторних алгоритмів, є найбільш досконалим технічним рішенням з мінімальним рівнем втрат у перехідних та усталених режимах.

Для приводів, що працюють із тривалими періодами недовантаження (конвеєри з нерівномірним потоком, вентилятори), ефективним є динамічне оптимізування магнітного потоку. Це реалізується двома шляхами:

- Застосування пристроїв плавного пуску (софтстартерів) із функцією *Energy Saving*, які знижують напругу на статорі при зменшенні моменту на валу, мінімізуючи втрати в сталі;
- Активація інтегрованих енергозберігаючих алгоритмів у сучасних перетворювачах частоти, які автоматично адаптують співвідношення напруги та частоти ($\$U/f\$$) під поточний момент опору механізму.

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

7.2 Енергозбереження в електромеханічних комплексах вентиляторних установок та димососів

У загальній структурі промислових турбомеханізмів вентилятори та димососи посідають друге місце за рівнем поширення після насосних комплексів. Найбільш масовим сегментом є вентиляторні установки санітарно-технічного та кліматичного призначення, які забезпечують кондиціювання і рециркуляцію повітря у виробничих, лабораторних та адміністративних приміщеннях. Попри відносно невисоку одиничну потужність цих агрегатів (як правило, до 100 кВт), через свій масовий характер вони формують значну частку в сумарному балансі електроспоживання підприємства.

Високопотужні вентиляторні комплекси спеціального призначення інтегруються в системи оборотного водопостачання для інтенсифікації охолодження носія в градирнях. Особливістю таких агрегатів є низька кутова швидкість робочого колеса, яка зазвичай не перевищує 600 об/хв.

Збільшення лінійних розмірів (діаметра) робочого колеса, зумовлене вимогами аеродинаміки, накладає обмеження на колову швидкість кінців лопаток для запобігання виникненню критичних механічних напружень. Це вимагає пропорційного зниження номінальної частоти обертання приводного двигуна. Окрім того, вентиляторні установки характеризуються значним власним моментом інерції, який часто на порядок і більше перевищує момент інерції ротора приводного електродвигуна. Дана обставина суттєво ускладнює пускові режими (викликає тривалі пускові струми) та в окремих випадках вимагає реалізації систем електричного гальмування для забезпечення нормативної швидкої зупинки лопатей.

На відміну від компресорних чи насосних установок, вентилятори завжди функціонують на гідравлічну (аеродинамічну) мережу без статичного

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

протитиску. Через це залежність моменту статичного опору на валу $M_{\text{ст}}$ від кутової швидкості ω має суворо квадратичний характер:

$$M_{\text{ст}} = M_0 + (M_{\text{н}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2$$

Відповідно, корисна потужність, що споживається аеродинамічним колесом (без урахування втрат на тертя в підшипникових вузлах), пропорційна кубу швидкості обертання. Це дозволяє використовувати класичні закони подібності турбомашин для аналізу та розрахунку їхніх робочих режимів.

За конструктивним виконанням промислові вентилятори класифікують на відцентрові (радіальні) та осьові. Серед традиційних аеродинамічних методів керування їхньою продуктивністю поширення набуло регулювання шляхом зміни кута повороту лопаток напрямного апарата. Цей ефект реалізується внаслідок штучного зменшення площі перерізу вхідного каналу та примусового закручування повітряного потоку на вході в робочу зону колеса.

Найменш економічним і енергодеструктивним способом зміни подачі є дроселювання потоку за допомогою шиберів (заслінки) у вхідному чи вихідному повітропроводі. Цей метод є повним аналогом засувки у насосних комплексах. При шиберуванні власна робоча характеристика вентилятора залишається незмінною, а штучно коригується (збільшується) гідравлічний опір самої магістралі, що призводить до невиправданої дисипації енергії.

Найбільш прогресивним інженерним рішенням є гнучке регулювання подачі вентилятора (Q) шляхом зміни кутової швидкості обертання робочого колеса (ω). За такого підходу характеристика мережі описується параболічним законом при нульовому статичному напорі $H_{\text{ст}} = 0$, тобто $H \equiv Q^2$, а коефіцієнт корисної дії (ККД) вентилятора в усьому діапазоні технологічного регулювання підтримується на максимальному квазіпостійному рівні.

Потужність, що споживається електродвигуном вентиляторної установки з мережі (без урахування змінного характеру ККД самого вентилятора), у функції

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

від відносної продуктивності $q = Q / Q_{\text{н}}$ при зміні кутової швидкості в межах $0 \leq \omega \leq \omega_{\text{н}}$, оцінюються за наведеними нижче математичними залежностями.

- При шибєрному (дросельному) регулюванні:

$$P_{\text{шиб}} = P_{\text{н}} \cdot (0,15 + 0,85 \cdot q)$$

- При частотному регулюванні (зміні кутової швидкості):

$$P_{\text{част}} = P_{\text{н}} \cdot q^3$$

Графічна інтерпретація залежностей споживаної потужності наведена на рис. 7.1.

Пунктирними лініями на діаграмі відображено реальні графіки навантаження двигуна з урахуванням нелінійної зміни ККД вентилятора в реальних режимах. Аналіз кривих показує, що споживана потужність електромеханічної системи з частотно-регульованим електроприводом (ЧРП) є суттєво нижчою, ніж при використанні шибєрних заслінок, практично в усьому робочому діапазоні зміни витрат, за винятком єдиної точки номінального (повного) навантаження.

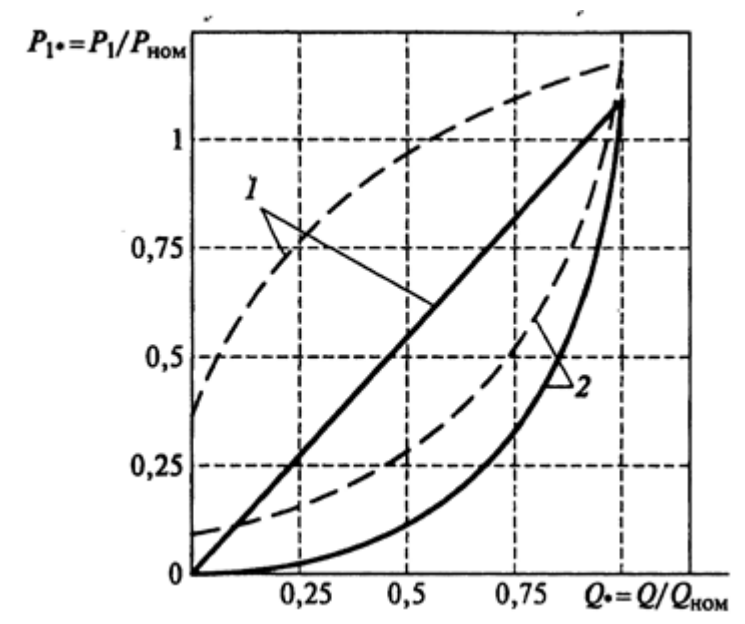


Рис. 7.1. Залежності зміни потужності, спожитої з мережі електроприводом вентилятора, при регулюванні шибєром (1) і частотному регулюванні (2).

В теперішній час тенденції переходу до регулюючого приводу для вентиляторів стали більш очевидними.

Вентелятори являються механізмами з режимом тривалого навантаження, навантаження на валу приводного двигуна спокійне, перевантажень не виникає. Вентелятори володіють великим моментом інерції, що необхідно врахувати при розрахунку пускових характеристик електроприводів.

Необхідний діапазон регулювання швидкості для вентиляторів зазвичай не перевищує 2:1. Більш глибоке регулювання використовується рідко, якщо враховувати кубічну залежність спожитої потужності від частоти обертання.

Пуск вентилятора можна виконувати як при розвантаженій машині, тобто при закритому направляючому апараті, так і при повністю відкритому. В першому випадку максимальний момент при пуску двигуна вентилятора рівний приблизно 0,4 номінального, в другому - номінальному. При пуску потужних вентиляторів з великим діаметром робочого колеса, зазвичай вимагається обмеження прискорення при пуску, щоб запобігти появу надмірних динамічних напруг в лопатках робочого колеса.

Перерахованим вимогам найбільш повністю відповідає частотно-регульований асинхронний електропривод вентилятора. При цьому, як правило, можна обмежуватися використанням простих і недорогих систем частотного регулювання.

До числа об'єктів с системі теплопостачання, для яких доцільне використання частотно-регулюючого асинхронного електропривода, відноситься дуттєвий димосос і вентилятор на ТЕЦ. Регулювання відношення палива - повітря за допомогою дутєвого вентилятора і розрядження в топці котла за допомогою димососа являється однією зважливих задач, в регламентованих межах. Але традиційний спосіб регулювання - дросельне регулювання забезпечує задовільне рішення цієї задачі не в усіх режимах роботи агрегату, тому виникає необхідність переведу вказаних турбомеханізмів на

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

регулюючий привод. З точки зору енергозбереження найбільш ефективним для цього являється використання асинхронного привода з частотним управлінням. При цьому доцільним являється перехід управління на сучасну елементну базу на основі програмуючого контролера.

Управління тягодуттєвими механізмами котельної установки (вентилятором і димососом) здійснюється за допомогою двох незалежних систем, основним призначенням яких являється управління швидкістю привідних електродвигунів так, щоб в топці котла підтримувався оптимальний режим горіння, створюючи приємні умови для повного згорання палива в усьому діапазоні продуктивності котельної установки. Для цього необхідно подати необхідну кількість повітря в топку котла в залежності від кількості поступаючого палива, а також з заданою інтенсивністю видаляти з неї продукти згорання.

Додатково ці системи повинні виконувати ряд додаткових функцій, а саме: забезпечення режиму вентиляції котла, підтримання заданого режиму в момент розпалення, управління роботою апаратури, яка застерігає вплив дестабілізуючих факторів на режими горіння і розпалення.

Підтримання оптимального режиму горіння в топці забезпечується вибором необхідної швидкості електродвигуна тягодуттєвих механізмів при повністю відкритих направляючих апаратів практично в усьому діапазоні робочої продуктивності котельної установки. Однак іноді виникає не стійкий режим горіння при розпаленні котла і в нижньому діапазоні його продуктивності: „відрив” полум’я від запальника або від пальника. Такий режим характеризується значними динамічними обуреннями тиску (розрядження) в топці котла, викликаний роботою розміщених поряд з іншими котельними установками, які пов’язані газоходами з загальною димовою трубою. Причиною „відрив” полум’я може бути також природна тяга димової труби. Дестабілізуючий вплив цих факторів необхідно зменшити або взагалі виключити. Для цього на час розпалення котла і при його невисокій

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						63

продуктивності направляючі апарати необхідно прикрити. Контур управління положенням направляючих апаратів вводиться як в систему управління вентилятором, так і в систему управління димососом. При бажанні ці контури можуть бути відключені.

Основним режимом роботи системи управління тягодуттєвими механізмами являється автоматичний. Він характеризується зміною режиму роботи котла в залежності від надходження в систему управління сигналів. Так, отриманий з системи захисту розв'язуючий сигнал переводить тягодуттєві механізми котельної установки з початкового режиму вентиляції топки в режим розпалення, а потім плавно із збільшенням кількості наданого палива - в робочий режим, в якому в усьому діапазоні продуктивності котла підтримується відношення паливо- повітря. У випадку виникнення аварійних ситуацій, при яких автоматика безпеки видає команду на відсічку котла, система управління тягодуттєвими механізмами примушує агрегат перейти в режим вентиляції. Для настройки різних систем управління агрегату передбачається ручний режим роботи тягодуттєвих механізмів з безпосереднім управлінням швидкістю двигунів. Переведення кожної системи управління з ручного режиму роботи в автоматичний і назад може бути здійснений в будь-який момент часу незалежно від режиму роботи іншої системи управління.

Для оцінки економії електроенергії при переході до частотного регулювання були проведені заміри спожитої потужності двигунами дуттєвого вентилятора і димососа. Параметри двигуна вентилятора і димососа типу А4 наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 Технічні дані двигуна типу А4.

$P_{ном}, кВт$	$n_{ном}, об/хв$	$S_{ном}, \%$	$I_{ном}, А$	$\eta_{ном}, \%$	$\cos \varphi_{ном}$	$M_{max}/M_{ном}$	$M_{п}/M_{ном}$	$I_{п}/I_{ном}$	$U_{ном}, кВ$
200	1500	1,3	29	94,2	0,87	2,3	1,0	5,7	10

Номінальна споживана активна потужність з мережі $P_{I_{ном}}$

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

Потужність, яку двигун забирає з електричної мережі за повного навантаження:

$$P_{I_{\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ном}}}{h_{\text{ном}}} = \frac{200}{0,942} \approx 212,31 \text{ кВт}$$

Перевіримо повну потужність через струм і напругу для трифазної системи:

$$S_{\text{ном}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} = \sqrt{3} \cdot 10 \text{ кВ} \cdot 29 \text{ А} \approx 502,29 \text{ кВА}$$

Повна споживана активна потужність:

$$P_{I_{\text{ном_перевірка}}} = S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} = 502,29 \cdot 0,87 \approx 436,99 \text{ кВт}$$

Фактична швидкість ротора з урахуванням ковзання:

$$n_{\text{ротора}} = n_1 \cdot (1 - S_{\text{ном}}) = 1500 \cdot (1 - 0,013) = 1480,5 \text{ об/хв}$$

Кутова швидкість ротора:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{ротора}}}{60} = \frac{2\pi \cdot 1480,5}{60} \approx 155,04 \text{ рад/с}$$

Номінальний обертальний момент:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 1000}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{200 \cdot 1000}{155,04} \approx 1290 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Економічний ефект від переходу з шибєрного регулювання на частотне (ЧРП) розраховується на основі профілю роботи вентилятора протягом року (реального часу роботи на знижених подачах).

Графік завантаження приймемо класичний для димососів/вентиляторів технологічний графік роботи на переробних заводах (сезонний або річний режим роботи $T = 6000 \text{ год/рік}$):

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

Режим	Відносна подача ($q=Q/Q_H$)	Час роботи за рік (t_i , год)
Режим 1 (Макс)	1,0	1000
Режим 2 (Ном)	0,8	2500
Режим 3 (Зниж)	0,6	2000
Режим 4 (Мін)	0,4	500

Розрахунок споживання при шибєрному регулюванні

- При $q=1,0$: $P_{\text{шиб1}}=212,31 \cdot (0,15+0,85 \cdot 1,0)=212,31$ кВт
- При $q=0,8$: $P_{\text{шиб2}}=212,31 \cdot (0,15+0,85 \cdot 0,8)=176,21$ кВт
- При $q=0,6$: $P_{\text{шиб3}}=212,31 \cdot (0,15+0,85 \cdot 0,6)=140,12$ кВт
- При $q=0,4$: $P_{\text{шиб4}}=212,31 \cdot (0,15+0,85 \cdot 0,4)=104,03$ кВт

Річне споживання при шибєрі:

$$W_{\text{шиб}}=(212,31 \cdot 1000)+(176,21 \cdot 2500)+(140,12 \cdot 2000)+(104,03 \cdot 500)=$$

$$=212310+440525+280240+52015=985090 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Розрахунок споживання при частотному регулюванні (ЧРП)

Використовуємо кубічну залежність закону подібності з урахуванням ККД

самого частотного перетворювача $\eta_{\text{чп}} \gg 97\%$ або 0,97: $P_{\text{чп}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot q^3}{\eta_{\text{чп}}}$

- При $q=1,0$: $P_{\text{чп1}} = \frac{212,31 \cdot 1,0^3}{0,97} = 218,88$ кВт
- При $q=0,8$: $P_{\text{чп2}} = \frac{212,31 \cdot 0,8^3}{0,97} = 112,06$ кВт
- При $q=0,6$: $P_{\text{чп3}} = \frac{212,31 \cdot 0,6^3}{0,97} = 47,28$ кВт

- При $q = 0,4$: $P_{чрп4} = \frac{212,31 \cdot 0,4^3}{0,97} = 14,01 \text{ кВт}$

Річне споживання при ЧРП:

$$W_{чрп} = \sum (P_{чрп_i} \cdot t_i)$$

$$W_{чрп} = (218,88 \cdot 1000) + (112,06 \cdot 2500) + (47,28 \cdot 2000) + (14,01 \cdot 500) \\ = 218880 + 280150 + 94560 + 7005 = 600595 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

Зведемо результати розрахунку в підсумкову таблицю 7.2:

Таблиця 7.2. Економічний ефект від переходу з шибєрного регулювання на частотне (ЧРП)

Показник	Значення
Річне споживання при регулюванні шибєром	985 090 кВт·год
Річне споживання при частотному регулюванні	600 595 кВт·год
Абсолютна річна економія електроенергії (ΔW)	384 495 кВт·год
Відносний рівень енергозбереження	39,03%

Розрахунок економії енергії за рахунок обмеження холостого ходу двигунів в електроприводах

У режимах відсутності корисного статичного моменту на валу асинхронний електродвигун продовжує споживати з мережі значну за величиною реактивну потужність (струм холостого ходу). Такий експлуатаційний стан призводить до додаткових технологічних втрат активної потужності як у магнітній та електричній системах самої машини, так і в лініях та трансформаторах системи електропостачання підприємства.

Проте для техніко-економічного обґрунтування такого рішення необхідно провести комплексне зіставлення: оцінити сумарні втрати енергії за час безперервного функціонування АД у режимі холостого ходу та порівняти їх із додатковими втратами електричної й термічної енергії, що неминуче виникають в обмотках під час перехідного процесу при його наступному повторному пуску. Для фрезерного станка з електродвигуном потужністю: $P_{\text{ном}} = 5,79$ кВт має $P_0^n = 1,251$ кВт. Час холостого ходу $T_{\text{всп}} = 15,8$ с.; $z = 37,8$ цикл/год;

$$a = 1,25 / 5,8 = 0,215; \quad b = 1 / (4 \cdot 16) = 0,0156 .$$

З діаграми $\varepsilon = 0,175$.

Очікувана годинна економія електроенергії

$$\Delta \mathcal{E} = 0,175 \cdot 38 \cdot 5,8 \cdot 16 / 3600 = 0,172 \text{ кВт} \cdot \text{год} .$$

Аналіз режимів роботи фрезерного верстата показує, що при тривалій експлуатації з коефіцієнтом завантаження лише 25% від номінальної потужності ($k_z = 0,25$) та за умови, що тривалість періоду холостого ходу сягає половини всього робочого часу ($k_t = 0,5$), ефективність використання енергії суттєво знижується. У такому регламенті питома витрата електричної енергії зростає до 210% порівняно з базовим (мінімально можливим) показником питомого енергоспоживання, який фіксується при стовідсотковому завантаженні технологічного обладнання.

Якщо ж оптимізувати виробничий процес шляхом підвищення коефіцієнта завантаження верстата до $k_z = 80\%$ та одночасного скорочення фази холостого обертання (що забезпечує зростання коефіцієнта використання робочого часу до $k_t = 0,9$), перевищення над мінімальною питомою витратою енергії мінімізується і становитиме лише 106%.

З огляду на, що $\beta = \Delta \mathcal{E} / \Delta \mathcal{E}_0$, де $\Delta \mathcal{E}_0 = 1,479$ кВт·ч, при $\eta_{\text{м.н.}} = 0,81$ і $\alpha = 0,902$ одержимо годинну економію електроенергії

$$\Delta \mathcal{E} = (\beta_1 - \beta_2) \cdot \Delta \mathcal{E}_0 = (2,5 - 1,06) \cdot 1,48 = 2,14 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		68

Висновок

У випускній кваліфікаційній роботі виконано інженерне розв'язання завдання з проєктування надійної, безпечної та енергоефективної системи електропостачання заводу з виробництва скляної тари. За результатами виконаних досліджень та розрахунків можна сформулювати такі висновки:

На основі аналізу технологічного процесу склозаводу проведено систематизацію електроприймачів за категоріями надійності. Встановлено, що ключові технологічні позиції (зокрема, скловарні печі та насоси охолодження) належать до споживачів I та Особливої категорій, що вимагає безперервного дубльованого живлення. За методом питомої потужності розраховано освітлення площ

На основі індивідуальних навантажень 25 цехів та об'єктів розраховано просторові координати центру електричних навантажень, що дозволило знайти точку розміщення центрального розподільчого пункту (ЦРП) з метою мінімізації довжини ліній і втрат напруги.

Шляхом техніко-економічного порівняння двох варіантів схеми зовнішнього електропостачання, доведено перевагу схеми 10 кВ. Для живлення обрано дволанцюгову лінію кабелем ААШв-(3х240). Компенсація реактивної потужності: З метою розвантаження силових трансформаторів та живильних ліній від реактивних струмів виконано розрахунок балансу реактивної потужності.

Проведено аналіз струмів короткого замикання. За отриманими величинами теплових імпульсів та ударних струмів здійснено вибір сучасного високовольтного обладнання. На вводі, секціях та відхідних лініях ЦРП прийнято до встановлення сучасні швидкодіючі вакуумні вимикачі серії ВР1, які задовольняють умовам вимикаючої здатності, динамічної та термічної стійкості. У спеціальному енергозберігаючому розділі обґрунтовано доцільність переводу магістральних турбомеханізмів (дутьового вентилятора та димососа котельні з

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

двигунами типу А4 потужністю 200 кВт) з шибєрного регулювання на частотно-кероване (ЧРП). Інженерний розрахунок підтвердив отримання значного енергетичного ефекту 384495 кВт·год, що забезпечує відносне зниження енергоспоживання цими агрегатами на 39,03%. Додатково розраховано годинний ефект від обмеження режимів холостого ходу приводів верстатного парку (фрезерний верстат), що знижує питому енергомiсткiсть обробки на 104%.

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

Література

1. Плешков П.Г. Орлович А.Ю., Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2011. – 386 с.
2. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами електропривода: Навчальний посібник.
3. Плешков П.Г. Орлович А.Ю., Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2007. – 386 с.
4. Електротехнічні системи електроспоживання / Плешков П. Г. та ін... – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с..
5. . П.Г. Плешков, А.І. Котиш, А.Ю. Орлович - Методичні вказівки до виконання дипломного проекту (електропостачання заводу). – Кіровоград: КДТУ, 2004. – 133 с.
6. Малинівський С.М. Загальна електротехніка [Текст]: підручник / С. М. Малинівський; Нац. ун-т «Львівська політехніка». — Вид. 2-ге, перероб. й допов. — Львів: Бескид Біт, 2003. — 640 с.
7. Методичні вказівки для виконання курсового проекту для напрямку 6.050701 „Електротехніка та електротехнології” зі спеціальностей 7.000008 „Енергетичний менеджмент”, 7.090603 „Електротехнічні системи електроспоживання” . Плешков П.Г., Савеленко І.В., Котиш А.І.- Кіровоград: КНТУ, 2009 – 112 с.
8. Шидловський А.К. Енергозбереження - пріоритетний напрямок державної політики України / Ковалко М.П., Денисюк С.П.; Відпов. ред. Шидловський .К. - К.: УЕЗ, 1998.- 506с.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		71