

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
канд. техн. наук, професор
_____ Петро ПЛІШКОВ
“__” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Проект системи електрозабезпечення підприємства з
виробництва хлібопекарських виробів»**

**«Project of the power supply system of the enterprise for
the production of bakery products »**

Виконав здобувач
IV курсу групи ЕЕ-22
ОПП 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Артем ПИЛИПЕНКО
«__» _____ 2026 р.

Керівник роботи
асистент
_____ Оксана СПІВАК
«__» _____ 2026 р.

Рецензент

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь бакалавр

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

Пилипенка Артема Володимировича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Проект системи електрозабезпечення підприємства з виробництва
хлібопекарських виробів

Project of the power supply system of the enterprise for the production of bakery products

2. Керівник роботи Снівак Оксана Володимирівна, асистент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту _____

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Робота присвячена розробці сучасної системи електропостачання заводу хлібопекарських виробів, яка задовольняє вимогам економічності та надійності роботи. З цією метою було проведено:

1. Провести розрахунок електричних навантажень.
2. Провести розрахунок картограми електричних навантажень.
3. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання.
6. Провести розрахунок режимів реактивної потужності системи електропостачання.
7. Здійснити вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства.
8. Провести розрахунок струмів коротких замкнень та здійснити вибір високовольтного обладнання.
9. Провести розрахунок спеціального розділу роботи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Спеціальний розділ</i>	<i>канд. техн. наук, доц. Н. Гарасьова</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>8.05.2026</i>	
<i>2</i>	<i>Картограма електричних та теплових навантажень</i>	<i>11.05.2026</i>	
<i>3</i>	<i>Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства</i>	<i>12.05.2026</i>	
<i>4</i>	<i>Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації</i>	<i>17.05.2026</i>	
<i>5</i>	<i>Трансформаторні підстанції</i>	<i>15.05.2026</i>	
<i>6</i>	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір обладнання</i>	<i>17.05.2026</i>	
<i>7</i>	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i>	<i>20.05.2026</i>	
<i>8</i>	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>25.05.2026</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки роботи</i>	<i>27.05.2026</i>	
<i>10</i>	<i>Оформлення презентаційної частини роботи</i>	<i>31.05.2026</i>	

Дата видачі завдання

Підпис керівника _____

« ____ » _____ 2026 р.

Завдання прийнято до виконання

Підпис здобувача _____

« ____ » _____ 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 92 с.; 10 рис.; 35 табл.; 9 джерел

Пилипенка А.В. Проєкт системи електрозабезпечення підприємства з виробництва хлібопекарських виробів. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 рік.

У межах проекту виконано фундаментальні інженерні обчислення, зокрема: розрахунок очікуваних електричних навантажень підприємства, визначення оптимальних режимів компенсації реактивної потужності та моделювання струмів короткого замикання для високовольтних вузлів мережі. На основі отриманих даних здійснено раціональний вибір зовнішнього та внутрішньомайданчикowego електропостачання, визначено параметри цехових комплектних трансформаторних підстанцій із пожежобезпечними герметичними трансформаторами серії ТМГ, обґрунтовано потужність низьковольтних конденсаторних установок, а також проведено вибір марок кабельних ліній і комутаційного обладнання ЦРП-10 кВ (вакуумних вимикачів серії ВР1).

Окрему увагу в роботі приділено питанням підвищення енергетичної автономності та ефективності заводу в сучасних умовах. Запропоновано та розраховано комплексне рішення з інтеграції відновлюваних джерел енергії, яке поєднує дахову сонячну електростанцію та двоконтурну геліосистему гарячого водопостачання на базі вакуумних трубчастих колекторів.

Ключові слова: система електропостачання, електричні навантаження, трансформаторна підстанція, компенсація реактивної потужності, струми короткого замикання, вакуумний вимикач, сонячна електростанція, вакуумний геліоколектор, бак-акумулятор, економічна ефективність.

ABSTRACT

Qualification work: 92 p.; 10 Fig.; 35 tables; 9 sources

Pylypenko Artem. Project of the power supply system of the enterprise for the production of bakery products. – Manuscript.

Bachelor's thesis on OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

Within the framework of the project, fundamental engineering calculations were performed, in particular: calculation of expected electrical loads of the enterprise, determination of optimal modes of reactive power compensation and modeling of short-circuit currents for high-voltage network nodes. Based on the data obtained, a rational choice of external and intra-site power supply was made, parameters of shop-level complete transformer substations with fire-safe hermetic transformers of the TMG series were determined, the capacity of low-voltage capacitor units was justified, and the brands of cable lines and switching equipment of the 10 kV DCS (vacuum circuit breakers of the VR1 series) were selected.

Special attention is paid to the issues of increasing the energy autonomy and efficiency of the plant in modern conditions. A comprehensive solution for the integration of renewable energy sources has been proposed and calculated, which combines a rooftop solar power plant and a dual-circuit solar hot water system based on evacuated tube collectors.

Keywords: power supply system, electrical loads, transformer substation, reactive power compensation, short-circuit currents, vacuum circuit breaker, solar power plant, vacuum solar collector, storage tank, economic efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	9
1.1 Розрахунок силових електронавантажень в мережі напругою до 1 кВ	9
1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень	10
1.3 Електронавантаження заводу в мережі вище 1кВ.....	13
1.4 Графіки електричних навантажень	13
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ ЦЕНТРАЛЬНОЇ РОЗПОДІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	20
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА	22
3.1 Вибір напруги і схеми зовнішнього електропостачання	22
3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання.....	30
РОЗДІЛ 4. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	
4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації	43
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності	47
РОЗДІЛ 5. ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ	53
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ, ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА СИЛОВИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	55
6.1 Розрахунок струмів КЗ та вибір струмопровідних пристроїв силових мереж заводу хлібопекарських виробів	55
6.2 Вибір електрообладнання	57
РОЗДІЛ 7. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АВТОНОМНОСТІ ХЛІБОЗАВОДУ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ	67
7.1 Модернізація системи гарячого водопостачання та теплопостачання на базі вакуумних сонячних колекторів.....	67
7.2. Розрахунок економічної ефективності від запропонованих заходів	83
ВИСНОВКИ	90
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	92

					ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Пилипенко А.В				Проект системи електрозабезпечення підприємства з виробництва хлібопекарських виробів	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.	Співак О.В						6	92
						ЦНТУ гр. ЕЕ-22		
Н. контр.	Співак О.В							
Затвер.	Плешков П.Г.							

ВСТУП

Об'єктом дослідження у випускній кваліфікаційній роботі є хлібопекарське підприємство, розташоване в межах Кропивницького району. Проектні обсяги виробництва готової продукції становлять 16 тонн на добу, що дозволяє повною мірою покрити потреби місцевих споживачів.

З точки зору електроенергетичного забезпечення, підключення об'єкта передбачається від розподільних шин 10 кВ діючої опорної підстанції напругою 35/10 кВ. Визначена відстань від джерела живлення до межі підприємства складає 2,4 км. Враховуючи безперервний характер хлібопекарського циклу, споживачі заводу вимагають високої надійності живлення (переважно II категорія), що потребує спорудження дволанцюгової повітряної або кабельної лінії 10 кВ.

Основні потужності розгорнуті всередині триповерхового головного корпусу, де обладнання розподілене по відповідних технологічних зонах. Організація роботи персоналу та ліній передбачає двозмінний графік.

Асортиментний перелік заводу включає різноманітні види хлібобулочної продукції, а також стабільну частку кондитерських товарів. Для організації безперебійного виробничого процесу спроектовано відокремлений силовblock для безтарного зберігання борошна. Ця споруда безпосередньо примикає до центрального виробничого корпусу і розрахована на розміщення 200 тонн сировини.

Складська інфраструктура містить вісім циліндричних силосів, внутрішній діаметр кожного з яких дорівнює 3 метрам. Конструктивно бункери змонтовані на суцільній залізобетонній плиті монолітного типу. Таке інженерне рішення забезпечує можливість ізольованого приймання та зберігання кількох сортів борошна одночасно.

Процеси логістики всередині складу, починаючи від розвантаження і закінчуючи подачею на заміс, повністю автоматизовані. Транспортування сировини між вузлами реалізовано за допомогою систем пневматичного

						7

(аерозольного) транспорту, які приводяться в дію потужними компресорними установками з асинхронними електроприводами.

Кожен силос інтегрований із тензометричними вагодозуючими модулями та системою дискретних датчиків рівня. Завдяки цьому забезпечується дистанційний моніторинг обсягів залишків та надходжень на диспетчерському пульті. Інформація від первинних сенсорів надходить на вторинні електронні прилади, які дозволяють в автоматичному режимі відміряти та транспортувати задану рецептурою масу безпосередньо до цеху підготовки.

Доставка основної маси борошна здійснюється спеціалізованим автомобільним транспортом (муковозами), розвантаження яких у силоси відбувається компресорними системами. Додатково передбачено допоміжну ділянку для приймання дрібних партій сировини у мішках (тарне зберігання).

Інші інгредієнти розподіляються за типами сховищ:

- Сухі та тверді компоненти (цукровий пісок, жири, маргарин, масло, пресовані дріжджі) зберігаються в спеціально обладнаних коморах із регульованим температурним режимом;
- Рідкі напівфабрикати (сольові розчини, патока, молочна сироватка) розміщуються у технологічних ємностях із нержавіючої сталі, обладнаних електричними насосами та підігрівом.

Безпосереднє приготування напівфабрикату (тіста) виконується у сучасних тістомісильних машинах інтенсивної дії. Термічна обробка та випікання сформованих заготовок здійснюється у високоефективних ротаційних печах. Таке термічне обладнання має гнучке електронне керування та є універсальним для виготовлення всього запланованого спектра хлібобулочних виробів.

						8

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

У цьому розділі випускної кваліфікаційної роботи наведено алгоритм та результати обчислення очікуваних електричних навантажень для проектного хлібопекарського підприємства. Розрахункові процедури виконуються в кілька послідовних етапів. На початковій стадії визначається силова складова споживання у внутрішньоцехових мережах напругою до 1000 В. Наступний крок передбачає аналіз та розрахунок параметрів електричного освітлення виробничих, допоміжних та складських приміщень. Завершальним етапом є інтеграція та зведення силових навантажень на вищому рівні напруги (понад 1 кВ) для вибору потужності силових трансформаторів. Варто наголосити, що для обчислення параметрів силових приймачів у низьковольтній мережі (до 1 кВ) було застосовано метод коефіцієнта максимуму (розрахункової потужності).

1.1 Розрахунок силових електронавантажень в мережах до 1 кВ

Керуючись розрахунковою методикою, виконаємо обчислення для окремо взятої виробничої зони. Детальний алгоритм розрахунку та його послідовність продемонстровано на прикладі третього поверху головного корпусу хлібопекарського підприємства з виробництва хлібопекарських виробів.

Для демонстрації математичного апарату визначимо навантаження для однієї з груп споживачів. Спершу знайдемо показник сирової характеристики за потужністю m , який відображає відношення максимальної встановленої потужності електроприймача в групі до мінімальної:

$$m = \frac{P_{н.маx}}{P_{н.мін}} = \frac{75}{0,4} = 188$$

Наступним кроком є обчислення середньої активної та реактивної потужностей за найбільш завантаженою зміну ($P_{см}$ та $Q_{см}$). Розрахунок базується на значенні

						9

сумарної встановленої номінальної потужності групи $\sum P_n$ та середньозваженого коефіцієнта використання K_B :

$$P_{\text{CM}} = \sum P_{\text{H}} \cdot K_{\text{B}} = 1085,41 \cdot 0,66 = 716,09 \text{ кВТ}$$

$$Q_{\text{cm}} = P_{\text{cm}} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 716,09 \cdot 0,46 = 331,073 \text{ кВар}$$

Керуючись алгоритмом згаданої методики, визначаємо ефективну кількість електроприймачів в аналізованій групі (критерій n_e). На основі отриманого значення n_e та величини k_b за довідковими таблицями (або кривими) знаходимо коефіцієнт максимуму, який для цього вузла становить $k_m = 1,125$. Остаточні розрахункові значення активного (P_p) та реактивного (Q_p) силового навантаження тривалого режиму визначаються за виразами:

$$P_p = P_{cm} \cdot K_M = 716,09 \cdot 1,125 \approx 805 \text{ KBT}$$

$$Q_p = Q_{cm} = 331,073 \text{ кВар}$$

Результати аналогічних обчислень електричних параметрів для всіх інших технологічних ділянок та ліній хлібозаводу зведені в таблиці 1.1.

1.2 Розрахунок освітлювальних навантажень

Як базовий інструмент використано метод питомої потужності на одиницю площі приміщення. Для ілюстрації математичного апарату виконаємо розрахунок для ремонтного цеху хлібозаводу, а підсумкові результати для всіх інших локацій зведемо в таблицю 1.2. В ремонтному цеху хлібопекарського підприємства використали люмінесцентні лампи для освітлення

Встановлена P_v визначається за формулою, кВт:

$$P_v = p_0 \cdot F \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 600 \cdot 10^{-3} = 11.52 \text{ кВТ},$$

де значення питомої потужності p_0 , кВт; F – є площа кожного окремого розглядаємого приміщення хлібопекарського підприємства, м².

Розрахункове P_p освітлювальних електроприймачів:

$$P_p = \kappa_n \cdot P_v = 0,85 \cdot 11,52 = 9,79 \text{ кВТ}$$

є коефіцієнт попиту κ_n для освітлювального навантаження.

Таблиця 1.1 – Розрахунок силових електрона вантажень в мережах до 1 кВ

Назва групи споживачів	Кіль-ть ЕС	Р одного, кВт		Р сум, кВт	m	K _в	cosφ	tgφ	Сер. навантаження		n _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		min	max						P _{см} , кВт	Q _{см} , квар			P _p , кВт	Q _p , квар	S _p , кВА
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Головний виробничий корпус															
<u>Електроприймачі 1-го поверху</u>															
Борошнопросіювальна установка	1	1,8	1,9	1,9	1	0,8	0,8	0,75	1,41	1,12					
Тістомісильний агрегат	3	18	18	54,0	1	0,7	0,75	0,88	37,82	33,31					
Підйомник-перекидач діж	8	1,8	1,9	15,24	1	0,3	0,8	0,75	4,63	3,42					
Тістоподільна установка	8	1,10	1,10	8,8	1	0,6	0,7	1,02	5,33	5,41					
Тістоокруглювальна машина	8	2,85	2,9	22,83	1	0,6	0,75	0,88	13,71	12,12					
Камера остаточної розстойки	8	6,8	6,8	54,40	1	0,8	0,97	0,25	43,52	10,98					
Піч хлібопекарська ротаційного типу	8	75	75	600	1	0,8	0,95	0,33	480,3	157,81					
Вентиляційна установка	10	1,1	20	86,60	18	0,7	0,8	0,75	60,62	45,53					
Кліматичний модуль	6	1,5	3,2	20,50	2	0,6	0,75	0,88	12,33	10,82					
Системи локального електрообігріву	6	1,2	3	16,6	3	0,6	0,75	0,88	9,74	8,62					
Всього	66	1,1	75	880,3	68	0,76	0,918	0,43	668,9	288,8	23	1	724,6	288,5	779,3
<u>Електроприймачі 2-го поверху</u>															
Борошнопросіювальна установка	1	1,8	1,8	1,80	1	0,8	0,8	0,75	1,42	1,14					
Тістомісильний агрегат	3	18	17,6	52,80	1	0,7	0,75	0,88	37,03	32,66					
Підйомник-перекидач діж	8	1,9	1,9	15,20	1	0,3	0,8	0,75	4,67	3,44					
Тістоподільна установка	8	1,1	1,1	8,82	1	0,6	0,7	1,02	5,33	5,42					
Тістоокруглювальна машина	8	2,9	2,85	22,85	1	0,6	0,75	0,88	13,74	12,14					
Установка тістозакаточна	3	1,5	1,5	4,55	1	0,6	0,75	0,88	2,72	2,46					
Камера остаточної розстойки	8	6,8	6,8	54,42	1	0,8	0,97	0,25	43,55	10,91					
Піч хлібопекарська ротаційного типу	8	75	75	600	1	0,8	0,95	0,33	480,0	157,83					
Вентиляційна установка	11	1,1	20	92,0	18	0,7	0,8	0,75	64,42	48,33					
Кліматичний модуль	7	1,5	3,2	22,2	2	0,6	0,75	0,88	13,25	11,62					
Системи локального електрообігріву	7	1,2	3	17,42	3	0,6	0,75	0,88	10,43	9,26					
Всього	72	1,1	75	891,76	68	0,76	0,917	0,44	676,24	294,83	24	1	732,12	294,85	789,22

				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
				3-й поверх															
				Борошнопресіювальна установка	1	1,8	1,8	1,86	1	0,8	0,8	0,75	1.0	1					
				Машина тістозмішувальна	3	18	17,6	52,82	1	0,7	0,75	0,88	37.2	33					
				Підйомник-перекидач діж	8	1,9	1,9	15,24	1	0,3	0,75	0,88	5.3	4					
				Тістоподільна установка	8	1,1	1,1	8,80	1	0,6	0,7	1,02	5.5	5					
				Тістоокруглювальна машина	8	2,9	2,85	22,86	1	0,6	0,75	0,88	14.22	12					
				Установка тістозакаточна	4	1,5	1,5	6.0	1	0,6	0,75	0,88	4.5	3					
				Машина розкатки тіста	3	1,3	1,25	3,75	1	0,6	0,75	0,88	2.3	2					
				Машина тиражування пряників	1	0,6	0,6	0,60	1	0,6	0,8	0,75	0.5	0.7					
				Машина збивальна	6	0,4	0,4	2,40	1	0,6	0,7	1,02	1.6	1.2					
				Камера остаточної розстойки	8	6,8	6,8	54,4	1	0,8	0,97	0,25	44.4	11.6					
15				Піч хлібопекарська ротаційного типу	8	75	75	600	1	0,8	0,95	0,33	480.2	158.2					
				Вентиляційна установка	11	1,1	20	87,8	18	0,7	0,8	0,75	61.4	46.6					
				Кліматичний модуль	7	1,5	3,2	22.0	2	0,6	0,75	0,88	13.5	12.4					
				Системи локального електрообігріву	7	1,2	3	17,6	3	0,6	0,75	0,88	10.6	9.6					
				Вантажні ліфти	4	47	47,4	189,76	1	0,2	0,75	0,88	38.2	33.3					
				Всього	87	0,4	75	1085,38	188	0,66	0,908	0,46	716.6	331.2	29	1	805.5	331.7	870.3
				Всього по виробничому корпусу	225	0,4	75	2857,46	188	0,72	0,914	0,44	2061.5	915.7	76	1	2174.5	915.3	2358.7
				Управлінський апарат															
				Вентиляційні установки	11	1,1	20	87,71	18	0,7	0,8	0,75	61.7	46.2					
				Кліматичний модуль	7	1,5	3,2	22.0	2	0,6	0,75	0,88	13.5	12.7					
				Комп'ютерна техніка	20	0,5	0,5	10.2	1	0,7	0,8	0,75	7.3	5.7					
				Електрообігрівачі	7	1,2	3	17,6	3	0,6	0,75	0,88	10.2	9.5					
				Всього по управлінському апарату	45	0,5	20	137,4	40	0,67	0,787	0,78	92.2	72.6	14	1	109.7	72.3	131.7
				Автономне теплогенеруюче джерело															
				Вентиляційна установка	10	0,5	3	18.5	6	0,6	0,8	0,75	11.5	8.3					
				Насоси	8	3	8	44.0	3	0,65	0,75	0,88	29.4	25.3					
				Тягодуттєва установка	4	3	10	26.0	3	0,65	0,8	0,75	17.3	13.7					
				Сантехнічні вентилятори	9	5,5	5,5	50.5	1	0,65	0,8	0,75	33.6	24.3					
				Всього по теплогенеруючому дж.	31	0,5	10	138.5	20	0,64	0,784	0,79	89.4	70.6	28	1	101.1	70.6	123.3

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
			Електромеханічна майстерня																
			Металоріжучі станки	25	1	15	173,82	15	0,2	0,5	1,73	35.4	60.8						
			Шліфувальні станки	7	1	30	192,52	30	0,5	0,7	1,02	96.6	98.4						
			Преси	6	3	33	63.0	11	0,4	0,6	1,33	24.3	32.3						
			Вентилятори	6	0,5	20	118.0	40	0,6	0,8	0,75	71.4	53.5						
			Всього по електромеханічній майстерні	44	0,5	33	545,24	66	0,41	0,68	1,08	226.5	244.6	33	1	278.2	244.5	370.6	
			Побутовий блок																
			Тістозмішувальні машини	3	1,7	2,7	6,12	2	0,7	0,75	0,88	4.3	4.6						
			Тістодільник	2	1,1	1,1	2,21	1	0,6	0,7	1,02	1.3	1.8						
			Машина розкатки тіста	1	1,3	1,25	3,76	1	0,6	0,75	0,88	2.7	2.4						
			Жарочне та варочне облад	16	3	18	158.0	6	0,6	0,9	0,48	95.2	46.8						
			Машина збивальна	3	0,4	0,4	1,4	1	0,6	0,7	1,02	1.3	1.6						
			Тістоокруглювач	2	2,3	2,3	4,60	1	0,6	0,75	0,88	3.2	2.4						
			Шафа росстойна	3	1,6	1,6	4,6	1	0,8	0,97	0,25	4.5	1.5						
			Ярусні печі	3	26	25,6	76,6	1	0,8	0,95	0,33	61.3	20.8						
			Вентилятори	8	3	7,5	31,5	3	0,7	0,8	0,75	22.6	16.5						
			Кондиціонери	4	1,5	1,5	6.0	1	0,6	0,75	0,88	4.7	3.6						
			Всього по Побутовому блоку	45	0,4	25,6	294,55	73	0,67	0,897	0,49	197.2	97.3	23	1	224.7	97.3	244.8	
			Компресорний вузол	10	15	15	150.5	1	0,6	0,8	0,75	90.5	68.6	10	1	115.6	74.3	137.2	
			Гаражне господарство																
			Зарядне для акумуляторів	4	5	5	20.0	1	0,4	0,75	0,88	8.3	7.3						
			Підйомні крани	2	20	20	40.0	1	0,4	0,75	0,88	16.3	14.5						
			Зварочний апарат	1	10	10	10.0	1	0,6	0,35	2,68	6.6	16.5						
			Всього по гаражному господарству	7	5	20	70.0	4	0,43	0,628	1,24	30.2	37.4	7	2	47.3	41.5	62.2	
			Склад безтарного зберігання																
			Припливно-витяжна вентсистема	3	4,5	10	22,5	2	0,6	0,8	0,75	13.4	10.4						
			Підйомні крани	3	10	10	30.0	1	0,2	0,5	1,73	6.6	10.6						
			Транспортери	2	2	10	12.0	5	0,5	0,7	1,02	6.3	6.2						
			Всього по складу	8	2	10	64.0	5	0,39	0,69	1,05	25.2	26.6	8	2	39	29	49	
	3			Всього по заводу хлібозаводу	415	0,4	75	4256,5	188	0,66	0,88	0,54	2810.6	1529.2	113	1	2972.3	1529.1	3342.5

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 9.79 \cdot 0.484 = 4.74 \text{ кВар}$$

Таблиця 1.2 – Зведені результати розрахунку освітлювальних навантажень

Найменування	F, м ²	P ₀ , Вт/м ²	P _p , кВт	Cos φ	tg φ	Q _y , кВар	Kc	P _p , кВт	Q _p , квар
Головний виробничий корпус	9720	18	174,86	0,9	0,47	84,76	0,85	148,76	72,04
Автономна котельня	230	8	1,87	0,9	0,47	0,86	0,8	1,43	0,73
Управлінський апарат	600	22	13,21	0,9	0,47	6,36	0,95	12,57	6,08
Побутовий блок	420	16	6,732	0,9	0,47	3,23	0,9	6,06	2,95
Електромеханічна майстерня	640	18	11,53	0,9	0,47	5,59	0,85	9,77	4,78
Гаражне господарство	450	8	3,71	0,9	0,47	1,73	0,6	2,18	1,04
Компресорний вузол	140	12	1,71	0,9	0,47	0,85	0,8	1,35	0,67
Склад безтарного зберігання борошна	135	6	0,83	0,9	0,47	0,36	0,6	0,47	0,29
Зовнішнє електроосвітлення майданчика	8740	0,2	1,77	0,5	1,73	3,02	0,5	0,86	1,53
Всього			216,08			106,83		183,43	89,93

1.3. Електронавантаження заводу в мережі вище 1кВ

На підставі проведеного аналізу топології внутрішньозаводських електричних мереж, як основні розрахункові вузли системи електропостачання прийнято секції шин напругою 10 кВ проектованої трансформаторної підстанції (ТП). Таке рішення дозволяє звести індивідуальні навантаження споживачів до центрів живлення для подальшого вибору комутаційно-захисної апаратури та перерізу кабельних ліній. Для структурування, наочності та зручності аналізу отриманих результатів, підсумкові показники електричних навантажень зафіксовані у зведеній таблиці 1.3.

1.4 Графіки електричних навантажень

У процесі збору та аналізу вихідних енергетичних характеристик хлібопекарського підприємства ключову увагу було зосереджено на дослідженні динаміки добового споживання потужності. Для об'єктивного оцінювання режимів роботи електрообладнання сформовано типові графіки навантаження для зимового та літнього періодів року. На основі цих даних, з урахуванням річного балансу робочих та вихідних днів, побудовано відповідні діаграми

часового розподілу потужності, які графічно відображено на рисунках 1.1–1.5. Аналіз зазначених залежностей дозволяє в подальшому оптимізувати режими роботи трансформаторного устаткування та розрахувати сумарні річні витрати активної і реактивної електроенергії.

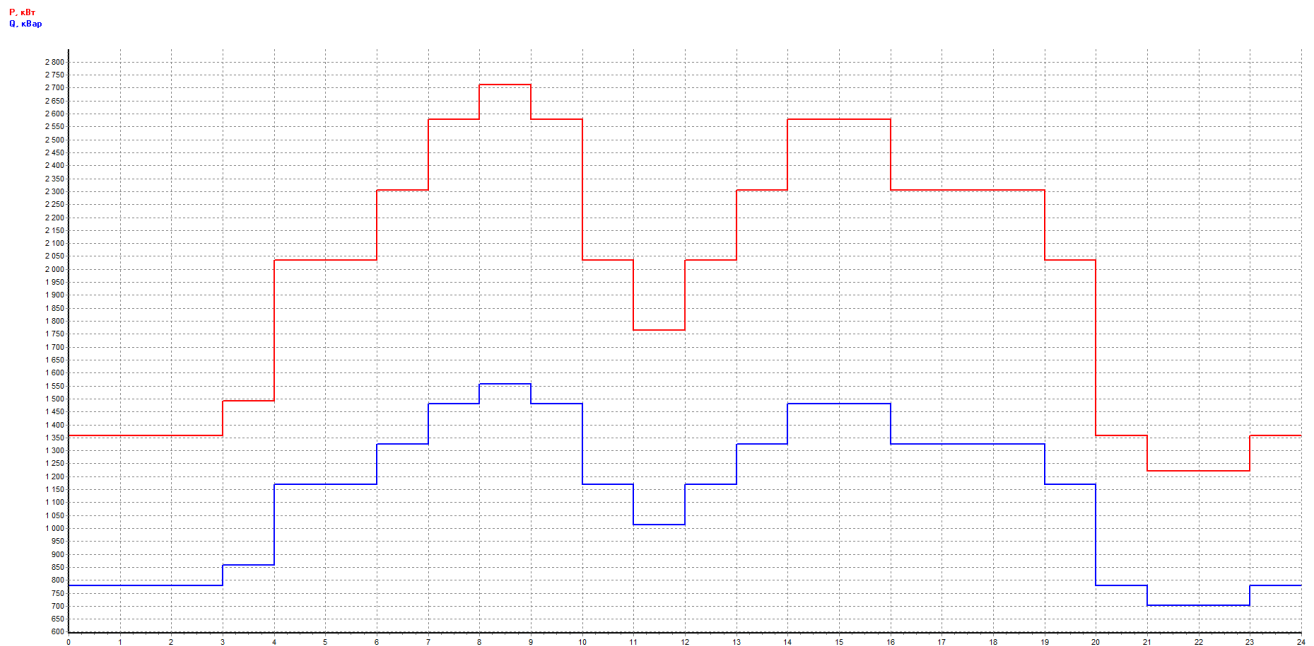


Рисунок 1.1 – Добовий графік навантаження P, Q (літні робочі дні)

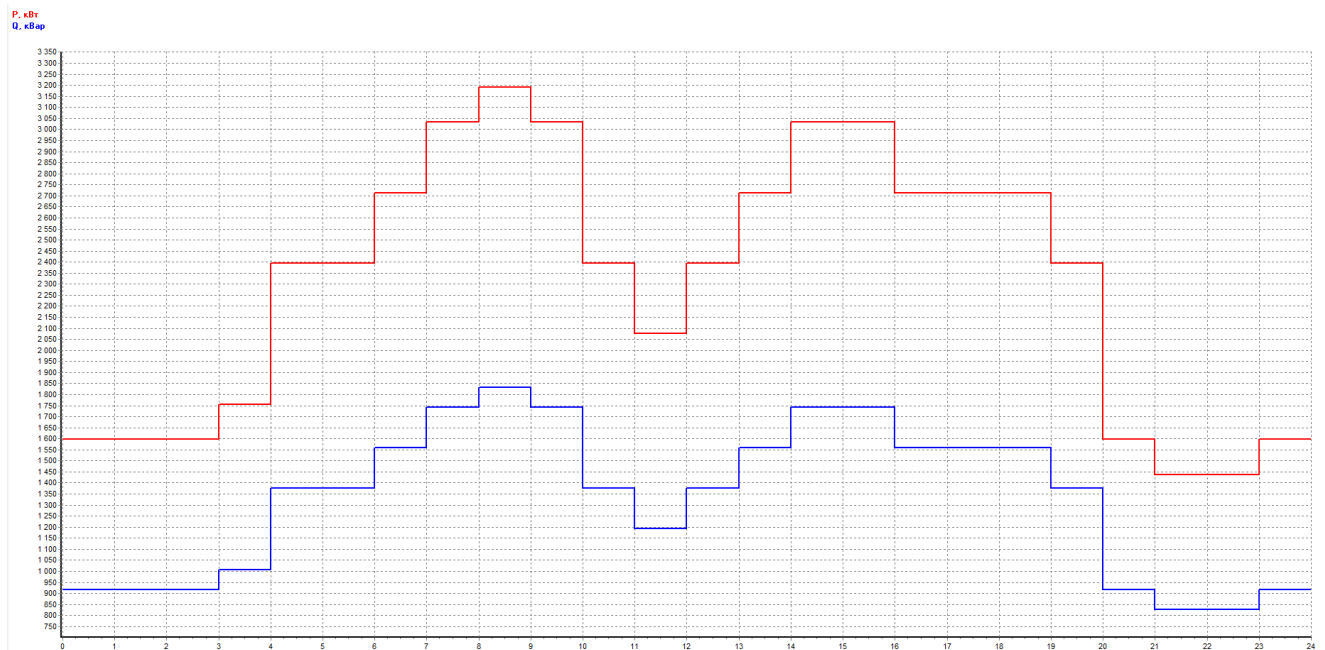


Рисунок 1.2 – Добовий графік навантаження P, Q (зимові робочі дні)

P, кВт
Q, кВар

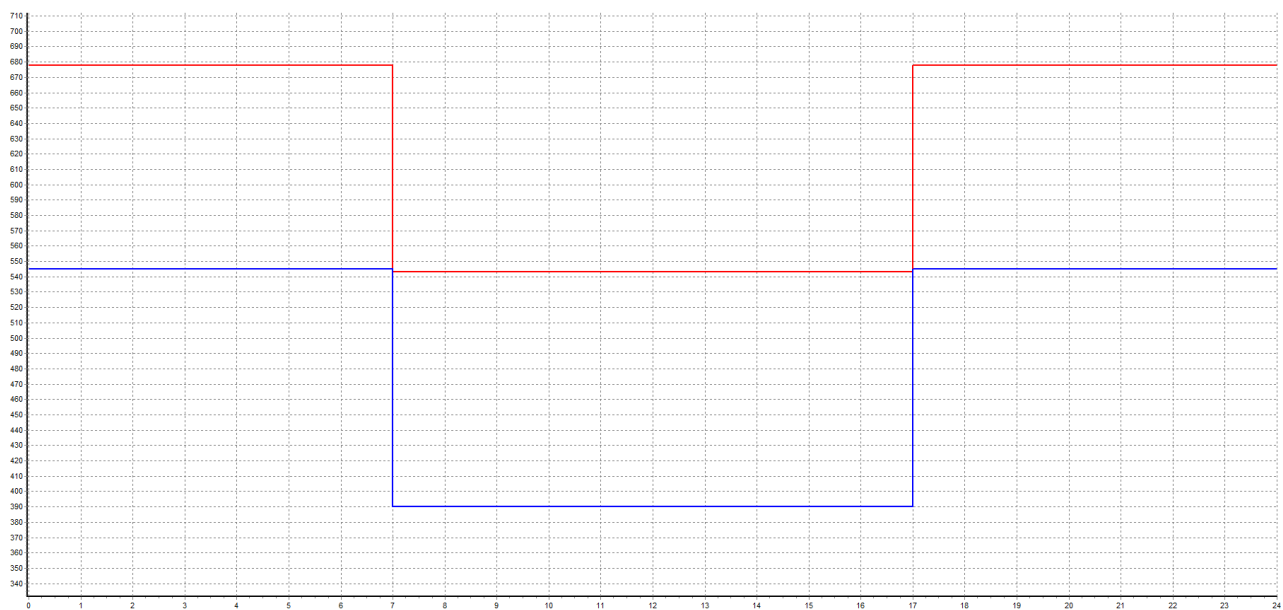


Рисунок 1.3 – Добовий графік навантаження P, Q (літні вихідні дні)

P, кВт
Q, кВар

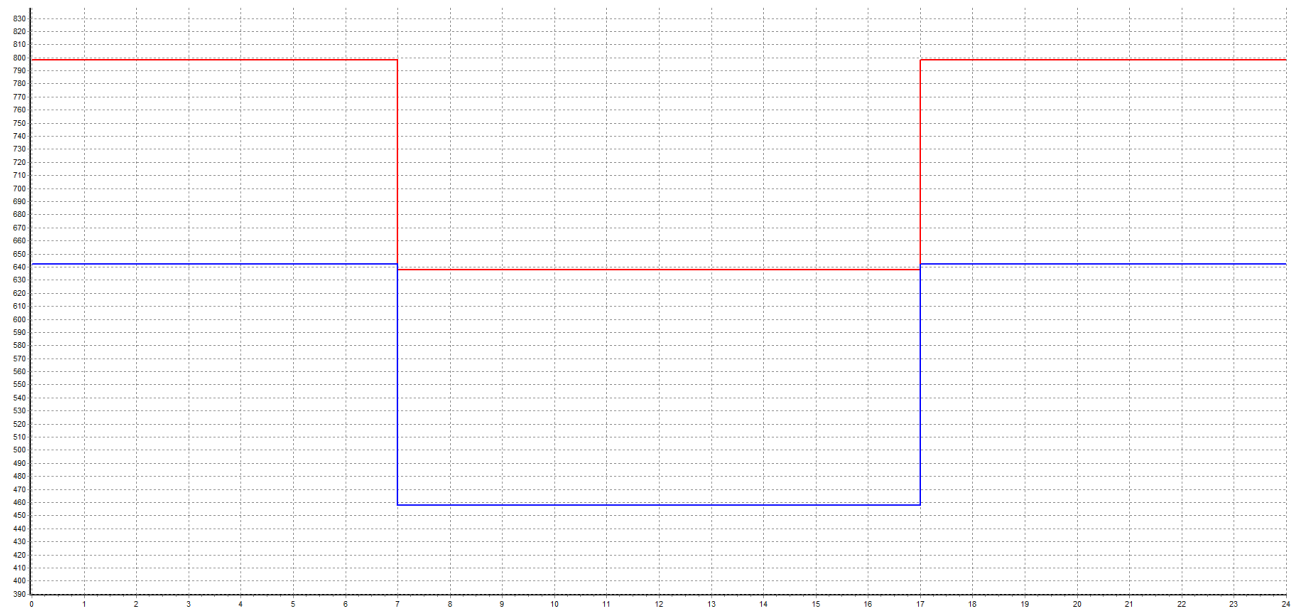


Рисунок 1.4 –Добовий графік навантаження P, Q (зимові вихідні дні)

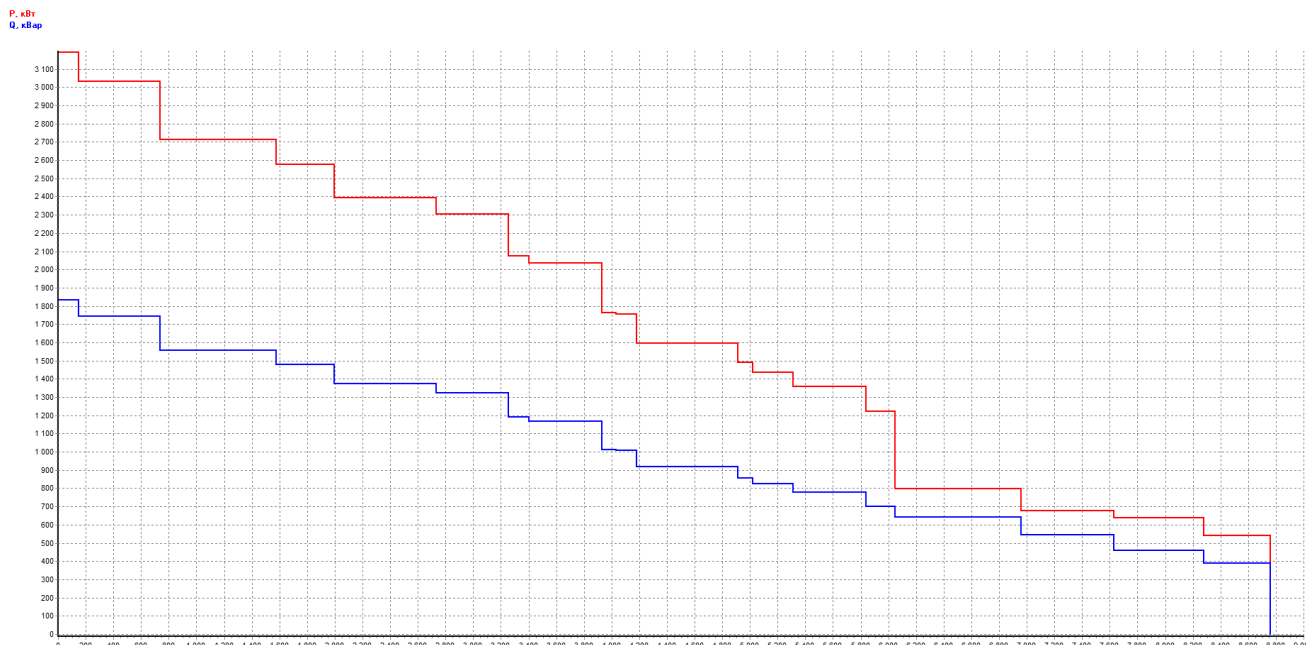


Рисунок 1.5 – Річний графік навантаження P, Q

У першому розділі випускної кваліфікаційної роботи було виконано комплексний аналіз технологічного процесу та розрахунок електричних навантажень об'єкта проектування – хлібопекарського підприємства у Кропивницькому районі. Визначено, що підприємство із добовою потужністю 16 тон готової продукції має безперервний характер виробництва, що вимагає забезпечення високої надійності живлення. Встановлено параметри зовнішнього електропостачання від опорної підстанції 35/10 кВ, яка розташована на відстані 2,4 км. За допомогою методу коефіцієнта розрахункової потужності (коефіцієнта максимуму) проведено повузловий розрахунок силових споживачів цехів та допоміжних дільниць. Окремо виконано світлотехнічний розрахунок за методом питомої потужності, що дозволило визначити параметри внутрішнього штучного та зовнішнього охоронного освітлення підприємства. Розрахункові потужності окремих технологічних вузлів та АПК були зведені на секції збірних шин 10 кВ проектованої цехової трансформаторної підстанції (ТП). Отримані сумарні значення активної, реактивної та повної потужності є базою для подальшого вибору кількості й потужності силових трансформаторів, а також підрахунку засобів компенсації реактивної потужності (КРП).

[illegible]

			Електромеханічна майстерня													
			силова	44	0,5	33	545,16		0,415	0,68	1,08	226,13	243,97	33	1,23	277,72
			освітлювальна													
																9,82
			Всього													
																287,53
			Гаражне господарство													
			силова	7	5	20	70.2		0,429	0,63	1,24	30.8	37,24	7	1,55	46,63
			освітлювальна													
																2,25
			Всього													
																48,82
			Компресорний вузол													
			силова	10	15	15	150.6		0,6	0,8	0,75	90.4	67,57	10	1,283	115,45
			освітлювальна													
																1,36
			Всього													
																116,74
			Склад													
			силова	8	2	10	64.3		0,394	0,69	1,05	25,25	26,43	8	1,552	39,14
			освітлювальна													
																0,48
			Всього													
																39,63
			Всього по ТП№4													
			силова	69	0,5	33	829,18	66	0,4	0,7	1,01	371,38	375,16	50	1,166	433,08
			освітлювальна													
																13,74
			Всього на шинах 0,4 кВ ТП4													
																446,85
			Втрати в трансформаторах													
																5,16
			N1													
			P,кВА630													
			K _з =0,71													
			Всього на шинах 10 кВ ТП4													
																451,97
			Всього підприємству													
			силова	415	0,4	75	4256,04	187,5	0,66	0,88	0,54	2810,08	1529,09	113	1,058	2971,73
			освітлювальна													
																183,47
			Всього													
																3155,17
			Втрати в трансформаторах													
																36,86
			Всього по підприємству													
																3192,03
			БК 10 кВ													
															tgφ=	0,574
			Всього по шинах 10 кВ													
																3192,03

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ ЦЕНТРАЛЬНОЇ РОЗПОДІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Для комплексного відображення енергетичного балансу на картограмі навантажень кожен умовний круг доповнюється сектором електричного освітлення з центральним кутом α . Зазначений кут графічно репрезентує питому вагу розрахункової потужності освітлювальних приладів відносно загального обсягу споживання даного цеху. Побудова цього сектора виконується на основі розрахункових світлотехнічних даних, забезпечуючи точне візуальне структурування силової та освітлювальної складових системи електропостачання. Нижче виконаємо розрахунок картограми електричних навантажень для підприємства з виробництва хлібопекарських виробів:

$$X_0 = \frac{1797300,06}{3268,51} = 11 \text{ см}; \quad Y_0 = \frac{1194841,25}{3268,51} = 7,32 \text{ см}$$

З метою мінімізації втрат напруги та обмеження небажаних перетоків потужності, розташування ЦРП конструктивно наближено до джерела зовнішнього електропостачання підприємства. Порядок визначення координатно-геометричних характеристик картограми (радіуса R та кута α) розглянемо на прикладі управлінського апарату. При обраному картографічному масштабі $m=0,2$ кВт/мм², розрахунковий радіус кола, який репрезентує сумарну активну потужність (силову та освітлювальну) зазначеної локації, визначається за нижченаведеним алгоритмом:

$$R = \sqrt{\frac{P_p}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{121,43}{3,14159 \cdot 0,2}} = 13,9 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{осв} \cdot 360^0}{\pi \cdot R^2 \cdot m} = \frac{12,54 \cdot 360^2}{3,14159 \cdot 13,9^2 \cdot 0,2} = 37,19^0$$

Математичні обчислення для решти виробничих підрозділів та цехів підприємства виконуються за аналогічним алгоритмом, а підсумкові числові результати зведені у таблиці 2.1.

						20

Таблиця 2.1 – Картограма електронавантажень підприємства з виробництва хлібопекарських виробів

Найменування	$P^{0,4}$ сил, кВт	$P_{\text{просв}}$, кВт	P_p , кВт	m	R , мм	α	x , м	y , м
Головний виробничий корпус	2173,71	148,72	2322,43	0,2	60,80	23,05	550,00	400,00
Автономна котельня	100,82	1,47	102,29	0,2	12,76	5,18	100,00	550,00
Управлінський апарат	108,92	12,54	121,46	0,2	13,90	37,19	100,00	350,00
Побутовий блок	223,65	6,05	229,70	0,2	19,12	9,48	250,00	100,00
Ел.мех. майстерня	277,71	9,79	287,50	0,2	21,39	12,26	900,00	100,00
Гаражне господарство	46,63	2,16	48,79	0,2	8,81	15,94	1075,00	450,00
Компресорний вузол	115,41	1,34	116,75	0,2	13,63	4,14	850,00	600,00
Склад безтарного зберігання борошна	39,22	0,49	39,71	0,2	7,95	4,41	750,00	590,00
			3268,63					

Таким чином, на основі розрахункових електричних навантажень визначено геометричні параметри картограми (радіуси кіл та кути світлотехнічних секторів) для всіх об'єктів підприємства з виробництва хлібопекарських виробів.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

У цьому розділі випускної кваліфікаційної роботи вирішується задача проектування оптимальної структури системи електропостачання підприємства з виробництва хлібопекарських виробів, що охоплює обґрунтування конфігурації як зовнішніх живильних мереж, так і внутрішньозаводського розподілу енергії.

Для визначення найбільш ефективного інженерного рішення виконується порівняльний аналіз кількох альтернативних варіантів побудови схеми живлення. Критерієм вибору оптимального варіанта є мінімум приведених техніко-економічних витрат.

Під час проведення розрахунків, окрім капітальних вкладень у спорудження ліній та підстанцій і щорічних експлуатаційних витрат (включаючи технологічні втрати потужності), обов'язково враховується фактор надійності електропостачання. Оскільки хлібопекарське виробництво містить споживачі, що критично залежать від безперервності живлення, у структуру економічних показників інтегровано ймовірнісні збитки від недопостачання (недовідпуску) електричної енергії при аварійних простоях.

Варіант схеми, який за результатами комплексного розрахунку продемонструє найменші сумарні витрати при забезпеченні нормативного рівня надійності, приймається до подальшої детальної розробки у проєкті.

3.1 Вибір напруги і схеми зовнішнього електропостачання

Для забезпечення надійного та безперебійного функціонування об'єкта проектування із сумарним розрахунковим навантаженням $S_p = 3681,1$ кВА передбачено підключення до опорної підстанції енергосистеми. Зазначений центр живлення обладнаний двома силовими трансформаторами напругою 35/10 кВ, що задовольняє вимогам надійності для споживачів підприємства з виробництва

						22

хлібопекарських виробів. Траса прокладання ліній від джерела живлення до промислового майданчика має протяжність $L = 2,4$ км.

З огляду на величину повної розрахункової потужності підприємства та його просторове розташування відносно опорної підстанції, доцільно провести техніко-економічне порівняння двох альтернативних варіантів організації зовнішнього електропостачання, які різняться класом номінальної напруги: 35 кВ та 10 кВ (рис. 3.1).

- Варіант I (схема на напрузі 35 кВ): Енергозабезпечення підприємства реалізується за допомогою спорудження дволанцюгової повітряної лінії (ПЛ) напругою 35 кВ. За цієї умови безпосередньо на території хлібозаводу проектується власна головна знижувальна підстанція (ГПП) з трансформаторами 35/10 кВ, від якої здійснюватиметься подальший розподіл енергії всередині заводу.

- Варіант II (схема на напрузі 10 кВ): Транспортування потужності виконується безпосередньо на середній напрузі 10 кВ за допомогою двох кабельних ліній (КЛ), прокладених у земляній траншеї. У такому разі будівництво трансформаторної підстанції напругою 35 кВ на балансі заводу не передбачається, а приймання та розподіл електроенергії забезпечує центральний розподільний пункт (ЦРП-10 кВ).

Для остаточного затвердження оптимальної конфігурації мережі виконаємо детальний комплексний розрахунок для кожного з варіантів. Початковий етап передбачає технічне обґрунтування та вибір основних марок провідників (ліній електропередачі) і комутаційно-захисного обладнання.

Варіант №1. Електропостачання підприємства з виробництва хлібопекарських виробів здійснюється дволанцюговою ПЛ 35кВ зі спорудженням на території п/ст 35/10 кВ.

Розрахунковий струм лінії (на один ланцюг), А:

$$I_{\max} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{3880}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 35} \text{ А.}$$

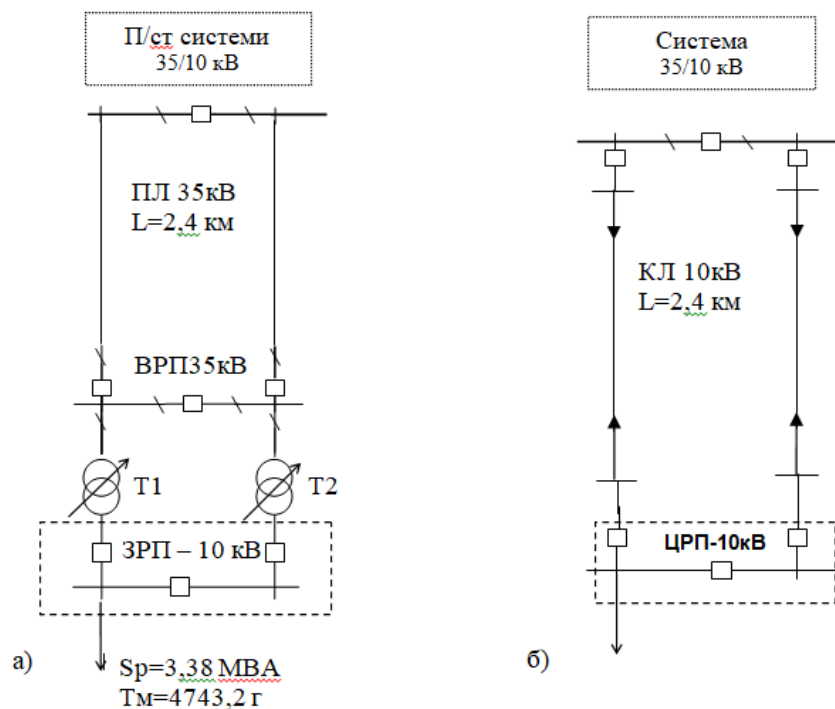


Рисунок 3.1 – Варіанти схем електропостачання (зовнішнього) підприємства з виробництва хлібопекарських виробів.

тоді розрахункове струмове навантаження лінії, А:

$$I_p = \alpha_i \alpha_T I_5 = 1,05 \cdot 1 \cdot 35 = 32 = 33,6$$

$I_{\text{доп}} = 175 \text{ А}$ тривало допустимий струм нагріву для проводу АС-35/6,2 у повітрі відповідно до ПУЕ. $I_{\text{ав}} = 2I_p = 2 \cdot 33,6 = 67,2 \text{ А} < I_{\text{доп}} = 175 \text{ А}$

Оскільки умова магістралі виконується, обраний переріз повністю задовольняє критеріям теплової стійкості. Коефіцієнт завантаження одного ланцюга ПЛ за нормальних умов експлуатації становить:

$$K_{\text{з.л}} = \frac{I_{\text{норм}}}{I_{\text{доп}}} = \frac{30,36}{175} \approx 0,17$$

Виходячи з повної розрахункової потужності хлібозаводу $S_p = 3681,1 \text{ кВА}$ та необхідності забезпечення надійності безперервного технологічного процесу, для головної знижувальної підстанції (ГПП) до встановлення приймаються два силові трансформатори типу ТМН-2500/35 із пристроєм регулювання напруги під

навантаженням (РПН). Коефіцієнт завантаження трансформаторів у номінальному режимі роботи дорівнює:

$$K_{з.т} = \frac{S_p}{2 \cdot S_{ном.т}} = \frac{3681,1}{2 \cdot 2500} \approx 0,74$$

Значення коефіцієнта завантаження $K_{з.т} = 0,74$ є оптимальним, оскільки в разі виходу з ладу одного трансформатора, інший з урахуванням допустимого аварійного перевантаження зможе забезпечити живлення основних споживачів.

Для проведення подальшого економічного порівняння визначимо річні технологічні втрати електричної енергії в елементах системи електропостачання першого варіанта. Втрати активної потужності у двох ланцюгах повітряної лінії електропередачі обчислюються за виразом:

$$\Delta P_{л} = \Delta P_{1км} l_{\Sigma} K_3^2 = 88 \cdot 4,8 \cdot 0,0361 = 15,25 \text{ кВт},$$

Тоді втрати електроенергії в Лінії матимемо наступним

$$\Delta W_{л} = \Delta P_{л} \tau = 15,25 \cdot 3135,96 = 47823,39 \text{ кВт год.}$$

Слід порахувати також втрати у вже обраних трансформаторах:

$$\Delta W = n(\Delta P_x t + \Delta P_{\kappa} K_3^2 \tau) = 2(5,1 \cdot 8760 + 23,5 \cdot 0,6 \cdot 3135,96 = 178106,79$$

кВт год

Сумарні втрати матимуть наступні за I варіантом:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{л} + \Delta W_m = 47823,39 + 178106,79 = 225930,18 \text{ кВт год}$$

Вартість втрат ел.енергії визначаємо

$$\Delta P = \Delta W \cdot C_0 = 225930,18 \cdot 9,50 = 2305,6 \text{ тис.грн}$$

Капітальні вкладення у будівництво елементів зовнішнього електропостачання за першим варіантом (дволанцюгова ПЛ 35 кВ та спорудження тупикової ГПП 35/10 кВ) визначаються на основі укрупнених вартісних показників. Кошторисна вартість обладнання, будівельно-монтажних та пусконаладжувальних робіт систематизована й представлена у таблиці 3.1.

						25

Параметр потоку відмов одного ланцюга λ визначається як сума інтенсивностей відмов його послідовно ввімкнених елементів:

$$\lambda_{\text{л}} = \lambda_{\text{ПЛ}} \cdot L + \lambda_{\text{вим}} + \lambda_{\text{транс}} = 0,02 \cdot 2,4 + 0,03 + 0,02 = 0,098 \text{ 1/рік}$$

Середній час відновлення одного ланцюга після аварії ($t_{\text{відн}}$):

$$t_{\text{відн}} = 10 \text{ год} = \frac{10}{8760} \approx 0,00114 \text{ рік}$$

Коефіцієнт аварійного простою одного ланцюга схеми

$$q_a = \lambda_{\text{л}} \cdot t_{\text{в\ddot{и}дн}} = 0,098 \cdot 0,00114 \approx 0,000112$$

Коефіцієнт планового простою одного ланцюга ($q_{\text{п}}$), який пов'язаний із проведенням регламентних ремонтних робіт, за довідковими даними для мереж 35 кВ становить:

$$q_{\Pi} = 0,004$$

Оскільки схема електропостачання є дволанцюговою (ланцюги працюють паралельно), повне припинення живлення підприємства (довідпуску енергії) виникає лише у разі збігу відмов або ремонтів на обох ланцюгах одночасно.

Коефіцієнт планового простою системи за умови виходу з ладу або відключення одного ланцюга через ремонт ($Q_{\text{п}}$):

$$Q_{\Pi} = 2 \cdot q_{\Pi} \cdot q_a = 2 \cdot 0,004 \cdot 0,000112 \approx 8,96 \cdot 10^{-7}$$

Коефіцієнт аварійного простою обох ланцюгів одночасно (Q_a):

$$Q_a = q_a^2 = (0, 00112)^2 \approx 1,25 \cdot 10^{-8}$$

Сумарний середньорічний час повного аварійного простою системи зовнішнього електропостачання ($T_{пр}$ рік):

$$T_{\text{np}} = Q_{\text{n}} + Q_{\text{a}} = 8,96 \cdot 10^{-7} + 1,25 \cdot 10^{-8} \approx 9,085 \cdot 10^{-7} \text{ pik/pik}$$

Переведемо цей час у години на рік для зручності подальших обчислень:

$$t_{\text{np}} = T_{\text{np}} \cdot 8760 = 9,085 \cdot 10^{-7} \cdot 8760 \approx 0,008 \text{ год/рік}$$

Очікуваний річний збиток від аварійного недовідпуску електричної енергії (Узб) визначається через питомий збиток на 1 кВт·год недовідпущеної енергії (станом на сьогодні для підприємств харчової промисловості питомий збиток

через псування сировини в печах при раптовому вимкненні приймається рівним $Y_0=180$ грн/кВт год):

$$Y_{зб} = P_p \cdot t_{пр} \cdot y_0 ,$$

$$Y_{зб} = 805 \cdot 0,008 \cdot 180 = 1159,2 \text{ грн} \approx 1,16 \text{ тис. грн.}$$

Розрахунок надійності та збитків від перерви електропостачання (Варіант II)

Параметр потоку відмов одного ланцюга кабельної лінії 10 кВ довжиною 2,4 км та обладнання ЦРП-10 кВ λ становить:

$$\lambda_{л. II} = \lambda_{кл} \cdot L + \lambda_{ЦРП} = 0,01 \cdot 2,4 + 0,02 = 0,044 \text{ 1/рік}$$

Середній час відновлення кабельної лінії у землі після аварії ($t_{відн. II}$) є довшим через потребу в земляних роботах і монтажі кабельних муфт:

$$t_{відн. II} = 24 \text{ год} = \frac{24}{8760} \approx 0,00274 \text{ рік}$$

Коефіцієнт аварійного простою одного ланцюга Варіанта II:

$$q_{а. II} = \lambda_{л. II} \cdot t_{відн. II} = 0,044 \cdot 0,00274 \approx 0,000121$$

Коефіцієнт планового простою для кабельних мереж 10 кВ є нижчим, оскільки вони не потребують щорічного верхового огляду та розчищення просік:

$$q_{п. II} = 0,002$$

Оскільки схема Варіанта II також є дволанцюговою, розрахуємо ймовірнісні коефіцієнти простою всієї системи:

- Коефіцієнт планового простою при ремонті одного ланцюга

$$Q_{п. II} = 2 \cdot q_{п. II} \cdot q_{а. II} = 2 \cdot 0,002 \cdot 0,000121 \approx 4,84 \cdot 10^{-7}$$

- Коефіцієнт аварійного простою обох ланцюгів одночасно

$$Q_{а. II} = q_{а. II}^2 = (0,000121)^2 \approx 1,46 \cdot 10^{-8}$$

Сумарний середньорічний час повного аварійного простою системи для другого варіанта:

$$t_{пр. II} = T_{пр. II} \cdot 8760 \approx 0,0044 \text{ год/рік}$$

Очікуваний річний збиток від недовідпуску електроенергії для Варіанта II

$$Y_{зб.II} = P_p \cdot t_{пр.II} \cdot y_0 = 805 \cdot 0,0044 \cdot 180 \approx 637,56 \text{ грн} \approx 0,64 \text{ тис. грн.}$$

Для наочного порівняння та остаточного обґрунтування оптимального інженерного рішення зведемо всі отримані раніше розрахункові дані (капіталовкладення, експлуатаційні витрати, вартість технологічних втрат за диференційованими тарифами та збитки від відмов) у загальну підсумкову таблицю.

Таблиця 3.3 – Приведені витрати згідно варіантів

Найменування техніко-економічного показника	Одиниця виміру	Варіант I (ПЛ 35 кВ + ГПП)	Варіант II (КЛ 10 кВ + ЦРП)
Капітальні вкладення (К)	тис. грн	9340,00	5386,00
Щорічні поточні (експлуатаційні) витрати (С)	тис. грн	1712,00	532,38
Вартість технологічних втрат електроенергії (Свт)	тис. грн	2305,60	1912,46
Математичне очікування збитків від відмов (Yзб)	тис. грн	1,16	0,64
Річні приведені витрати ($Z = E_n K + C + C_{вт} + Y_{зб}$)	тис. грн/рік	5139,56	3091,80

На основі комплексного техніко-економічного порівняння двох альтернативних конфігурацій мережі зовнішнього живлення встановлено, що Варіант II (спорудження двох кабельних ліній напругою 10 кВ) є найбільш ефективним та доцільним для реалізації.

Попри те, що використання нижчого класу напруги (10 кВ) зумовлює вищий комерційний тариф на покриття втрат енергії, цей варіант забезпечує колосальне заощадження капітальних інвестицій на етапі будівництва за рахунок відмови від дорогої понижувальної підстанції 35 кВ. Економічний ефект за критерієм приведених витрат складає $5139,56 - 3091,80 = 2047,76$ тис. Грн на рік на користь кабельної лінії 10 кВ. Відповідно, Варіант II затверджується як основний для подальшої детальної інженерної розробки у проекті.

3.2 Вибір схеми внутрішнього електропостачання

Принцип побудови внутрішньої електричної мережі хлібозаводу детально розглянуто на прикладі ремонтно-механічного цеху. Розподіл електричної енергії між силовими споживачами всередині цього приміщення реалізовано шляхом застосування комбінованої схеми, що поєднує магістральні та розподільчі шинопроводи (рис. 3.2). Технічною особливістю проектуваного прольоту є те, що його живлення забезпечується за допомогою магістрального шинопровода, підключеного безпосередньо до цехової трансформаторної підстанції (ТП), яка конструктивно розташована у сусідньому виробничому корпусі.

Як головну живильну магістраль для цієї ділянки вибрано комплектний шинопровід серії ШМА-73, розрахований на номінальний тривалий струм $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$.

Для підтвердження правильності прийнятого інженерного рішення виконується обов'язкова перевірка за умовою відповідності номінального струму шинопровода максимальному розрахунковому струму навантаження цієї лінії ($I_{\text{р.маг}}$):

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{р.маг}}$$

Враховуючи, що максимальний струм навантаження магістралі становить, умова теплової стійкості повністю виконується: $958 \leq 1000 \text{ А}$. Таким чином, обраний шинопровід серії ШМА-73 задовольняє всім нормативним експлуатаційним вимогам і затверджується для монтажу всередині цеху.

Для подальшого визначення струмів короткого замикання та перевірки апаратури захисту обчислимо активні та реактивні опори елементів розрахункової схеми, приведені до напруги низьковольтної сторони ($U_{\text{нн}} = 0,38 \text{ кВ}$).

Опір зовнішньої енергосистеми. Потужність короткого замикання на шинах вищої напруги ($S_{\text{кз}}$) визначається через номінальні параметри мережі:

$$S_{\text{кз}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{кз}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 5,79 = 100,16 \text{ МВА}$$

Реактивний опір системи, приведений до ступеня напруги 0,38 кВ, становить:

$$X_c = \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{кз}}} \cdot 10^3 = \frac{0,38^2}{100,16} \cdot 10^3 = 1,44 \text{ мОм}$$

Опори силового цехового трансформатора. Відповідно до паспортних даних обраного трансформатора, його активний та реактивний опори дорівнюють:

$$R_{\text{тр}} = 2,0 \text{ мОм}; \quad X_{\text{тр}} = 8,5 \text{ мОм}$$

Опори вимірювальних трансформаторів струму (ТС) та комутаційної апаратури. Якщо врахувати активний та реактивний опори трансформаторів струму, перехідні опори контактів апаратів (рубильників, автоматичних вимикачів), сумарний перехідний опір болтових і шинних контактів:

$$R_k = 0,1 \text{ мОм.}$$

Питомі характеристики шинопровода на метр довжини складають: $r_0 = 0,031 \text{ мОм/м}$ та $x_0 = 0,017 \text{ мОм/м}$. При загальній довжині магістралі $l = 25 \text{ м}$, її повні опори дорівнюють:

$$R_{\text{шма}} = r_0 \cdot l = 0,031 \cdot 25 = 0,775 \text{ мОм}$$

$$X_{\text{шма}} = x_0 \cdot l = 0,017 \cdot 25 = 0,425 \text{ мОм}$$

То, загальний еквівалентний активний (R) та реактивний (X) опори кола КЗ обчислюються шляхом послідовного додавання складників (із врахуванням кількості контактних груп та апаратів):

$$R_{\Sigma} = R_{\text{тр}} + R_{\text{ТС}} + 2 \cdot R_{\text{кот}} + 2 \cdot R_k + R_{\text{шма}} = 2,0 + 0,05 + 2 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,1 + 0,775 = 3,085 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma} = X_c + X_{\text{тр}} + X_{\text{ТС}} + 2 \cdot X_{\text{кот}} + X_{\text{шма}} = 1,44 + 8,5 + 0,07 + 2 \cdot 0,07 + 0,425 = 10,575 \text{ мОм}$$

Повний еквівалентний опір розрахункової схеми (Z):

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} = \sqrt{3,085^2 + 10,575^2} \approx 11,02 \text{ мОм}$$

Для подальшої перевірки чутливості захисту до однофазних КЗ визначимо повний опір петлі «фаза-нуль» для лінії шинопровода за питомим показником $Z_{0.\text{петлі}} = 0,123 \text{ мОм/м}$:

$$Z_{\text{петлі}} = z_{0.\text{петлі}} \cdot l = 0,123 \cdot 25 = 3,075 \text{ мОм}$$

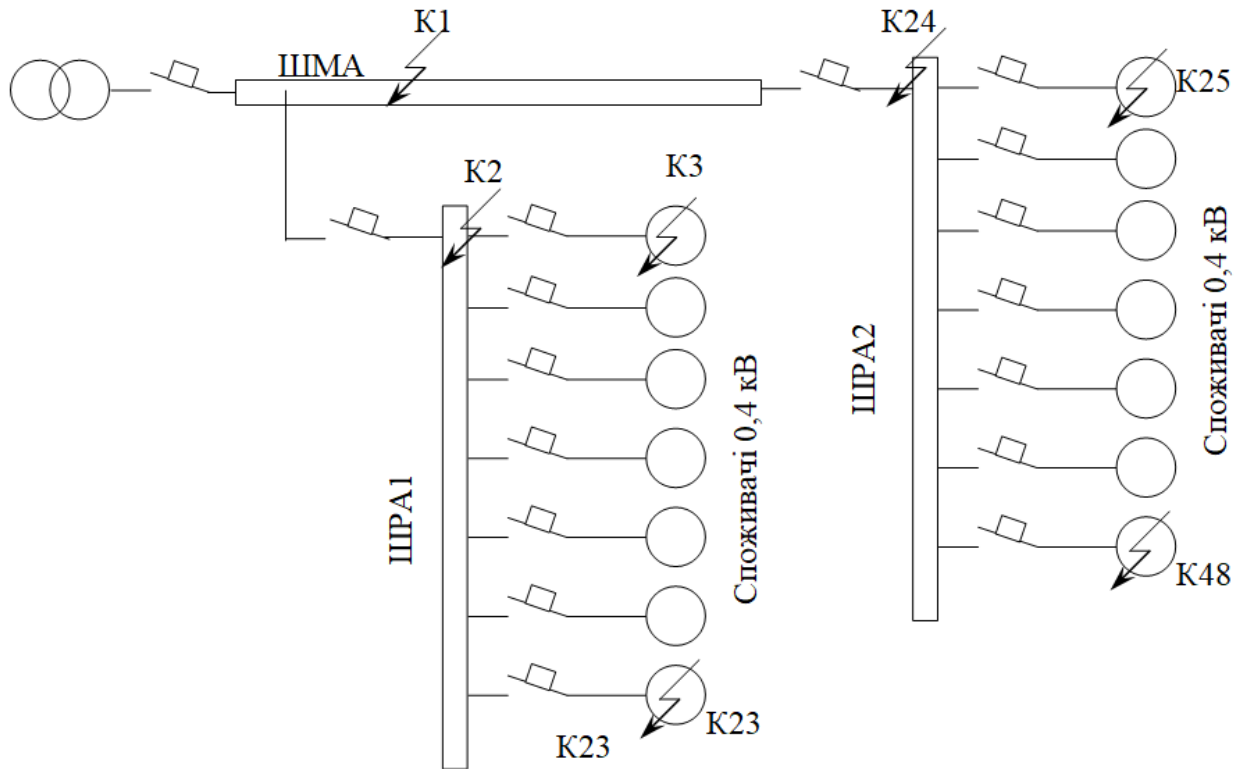


Рисунок 3.2 – Схема живлення цехових споживачів 0,4 кВ підприємства з виробництва хлібопекарських виробів

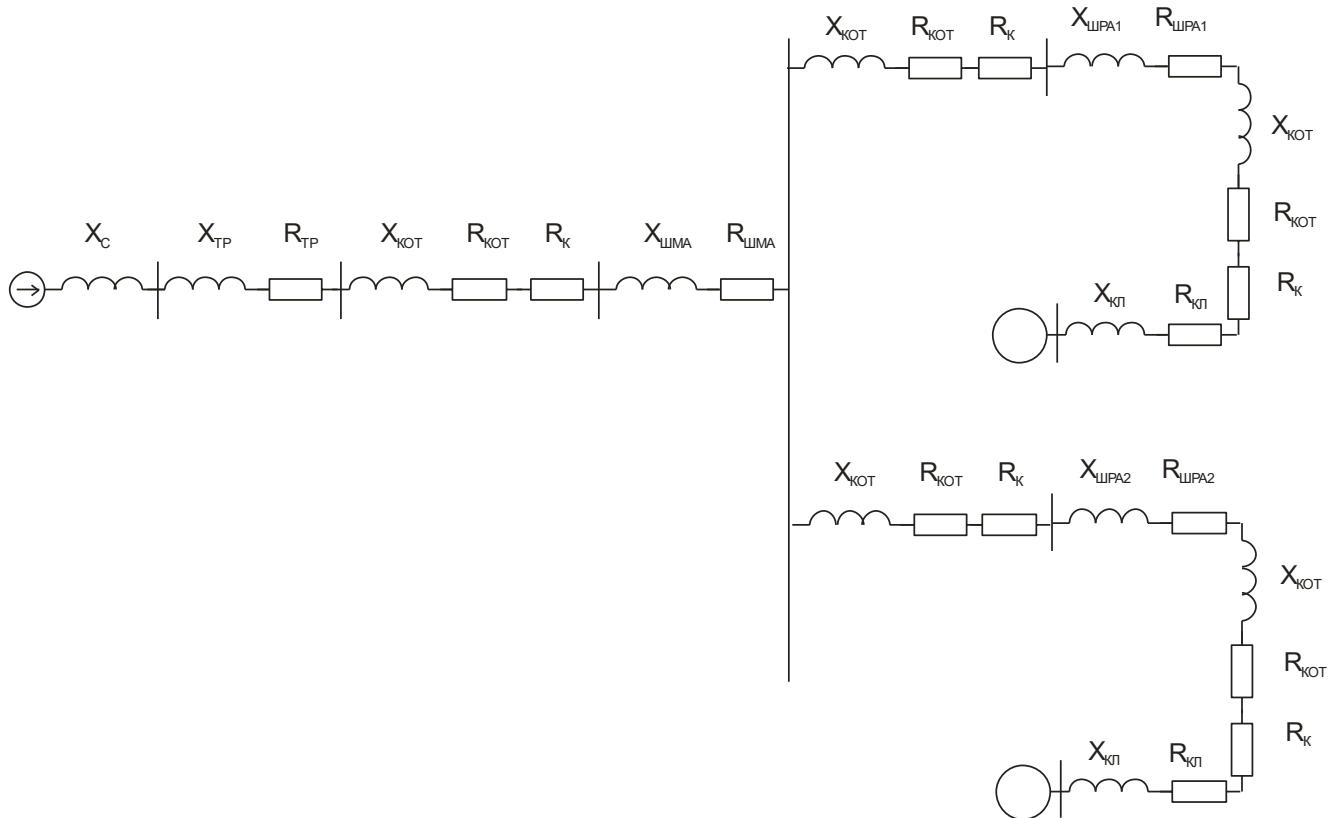


Рисунок 3.3 – Схема заміщення цехових споживачів 0,4 кВ підприємства

Для розподілу електричної енергії безпосередньо до окремих електроприймачів ремонтно-механічного цеху передбачено встановлення комплектного розподільчого шинопровода серії **ШРА-73** із номінальним струмом $I_{ном} = 400 \text{ А}$.

Виконаємо перевірку вибраного шинопровода за умов тривалого нагріву робочим струмом, а також за критерієм динамічної (електродинамічної) стійкості до струмів короткого замикання:

перевірка за номінальним струмом магістралі:

$$I_{ШРА} \geq I_{р.маг1} \implies 400 \text{ А} \geq 373 \text{ А}$$

перевірка за ударним струмом КЗ:

$$i_{уд.доп} \geq i_{уд} \implies 15 \text{ кА} \geq 11,3 \text{ кА}$$

Обидві нормативні умови виконуються, що підтверджує надійність роботи ШРА-73. Обчислення опорів розподільчої магістралі:

перехідні опори контактних з'єднань апаратів захисту: $R_{кот} = 0,15 \text{ мОм}$, $X_{кот} = 0,1 \text{ мОм}$.

сумарний перехідний опір болтових контактів відгалужень: $R_k = 0,4 \text{ мОм}$.

власні опори шинопровода ШРА (при питомих значеннях $r_0 = 0,2 \text{ мОм/м}$, $x_0 = 0,1 \text{ мОм/м}$ та загальній довжині лінії $l = 120 \text{ м}$:

$$R_{шра} = r_0 \cdot l = 0,2 \cdot 120 = 24,0 \text{ мОм}$$

$$X_{шра} = x_0 \cdot l = 0,1 \cdot 120 = 12,0 \text{ мОм}$$

Еквівалентні сумарні опори до кінця розподільчого шинопровода:

$$R_{\Sigma 1} = 5,13 \text{ мОм}, X_{\Sigma 1} = 14,4 \text{ мОм):}$$

$$R_{\Sigma 2} = R_{кот} + R_k + R_{\Sigma 1} + R_{шра} = 0,15 + 0,4 + 5,13 + 25,2 = 30,88 \text{ мОм}$$

$$X_{\Sigma 2} = X_{кот} + X_{\Sigma 1} + X_{шра} = 0,1 + 14,4 + 12,0 = 26,50 \text{ мОм}$$

Повний еквівалентний опір у цій точці розподільчої мережі становить:

$$Z_2 = \sqrt{R_{\Sigma 2}^2 + X_{\Sigma 2}^2} = \sqrt{30,88^2 + 26,50^2} = 40,78 \text{ мОм}$$

Повний опір петлі «фаза-нуль» для ділянки ШРА з урахуванням питомого опору петлі $z_0 = 0,55 \text{ мОм/м}$ та опору попередньої ланки становить:

$$Z_{\text{петлі.шра}} = z_{0.\text{петлі}} \cdot l + Z_{\text{петлі.шма}} = 0,55 \cdot 120 + 3,08 = 69,08 \text{ мОм}$$

Сумарний повний опір кола короткого замикання на кінцях кабельної лінії (з урахуванням власних опорів кабелю $R_{\text{ш3}} = 6,7 \text{ мОм}$ та $X_{\text{ш3}} = 0,6 \text{ мОм}$):

$$Z_3 = \sqrt{(R_{\Sigma 1} + R_{\Sigma 2} + R_{\text{ш3}})^2 + (X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2} + X_{\text{ш3}})^2}$$

$$Z_3 = \sqrt{(5,13 + 30,80 + 6,70)^2 + (14,40 + 26,50 + 0,60)^2} = 59,45 \text{ мОм}$$

Повний сумарний опір петлі «фаза-нуль» до кінцевого споживача з урахуванням питомого опору петлі кабелю ($z_{0.\text{петлі.кл}} = 2,22 \text{ мОм/м}$) та довжини кінцевої ділянки $l_3 = 10 \text{ м}$:

$$Z_{\text{п3}} = Z_{\text{петлі.шма}} + Z_{\text{петлі.шра}} + z_{0.\text{петлі.кл}} \cdot l_3 = 3,08 + 69,08 + 2,22 \cdot 10 = 94,36 \text{ мОм}$$

Вибір перерізу проводів в цеховій мережі для інших споживачів приведений в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Вибір перерізу КЛ для цехової мережі

№	Пот. Спож.	І _р , А	F _{розр} , мм ²	F _{ст} , мм ³	n	I _{доп} , А	κ _{пр} *I _{доп}
1, 2, 3, 4	13	17,6	14,7	16	1	200	240
5	2	2,9	2,29	2,5	1	22	26,4
6	10,1	13,5	11,54	16	1	200	240
7	1	1,6	1,15	2,5	1	22	26,4
8	14	19,4	15,98	16	1	200	240
9	3	4,13	3,42	4	1	29	34,8
10	7,125	9,73	8,18	10	1	60	72
11	1	1,34	1,14	2,5	1	22	26,4
12	17,5	23,92	19,8	25	1	105	126
13	15,8	21,64	18,05	25	1	105	126
14	2	2,73	2,27	2,5	1	22	26,4
15	2,2	3,05	2,52	4	1	29	34,8
16	2,9	3,99	3,32	4	1	29	34,8
17, 18	0,6	0,85	0,67	2,5	1	22	26,4

19	7	9,55	5	10	1	60	72
20	10	13,67	11,42	16	1	200	240
21	7	9,54	7,95	10	1	60	72
22	0,5	0,65	0,54	2,5	1	22	26,4
23, 24	4,5	6,17	5,18	4	2	29	69,6
25	14,1	19,32	16,04	10	2	60	144
26	14	19,15	15,94	10	2	60	144
27, 28, 29,30, 31, 32, 33,34	10	13,68	11,45	6	2	35	84
35	13	17,82	14,82	10	2	60	144
36	11	15,05	12,58	10	2	60	144
37	7	9,54	7,96	4	2	29	69,6
38	8	10,96	9,19	6	2	35	84
39	10	13,69	11,44	6	2	35	84
40, 41	8	10,97	9,19	6	2	35	84
42	12	16,45	13,68	10	2	60	144
43, 44	8	10,97	9,19	6	2	35	84

Точка К1 (на шинах магістрального шинопровода ШМА-73)

Повний еквівалентний опір до точки К1 становить $Z_1 = 11,02$ мОм.

Розрахунковий струм трифазного короткого замикання:

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{U_{\text{нн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_1} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 11,02} = \frac{380}{19,087} \approx 19,91 \text{ кА}$$

Ударний струм КЗ, що зумовлює максимальне динамічне зусилля на шини:

$$i_{\text{уд1}} = \sqrt{2} \cdot K_{\text{уд}} \cdot I_{к1}^{(3)} = 1,414 \cdot 1,0 \cdot 19,91 \approx 28,15 \text{ кА}$$

Точка К2 (на шинах розподільчого шинопровода ШРА-73)

Повний еквівалентний опір до точки К2 дорівнює $Z_2 = 40,78$ мОм.

Струм трифазного КЗ:

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{U_{нн}}{\sqrt{3} \cdot Z_2} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 40,78} = \frac{380}{70,63} \approx 5,38 \text{ кА}$$

Ударний струм КЗ:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I_{к2}^{(3)} = 1,414 \cdot 1,0 \cdot 5,38 \approx 7,61 \text{ кА}$$

Струм однофазного КЗ через опір петлі «фаза-нуль» розподільчої магістралі

$$I_{к2}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{петлі2}} = \frac{220}{69,08} \approx 3,18 \text{ кА}$$

Точка КЗ (на кінцях кабельної лінії живлення електроприймача К16)

Сумарний повний опір до кінцевого споживача складає $Z_3 = 59,45 \text{ мОм}$.

Струм трифазного КЗ:

$$I_{к3}^{(3)} = \frac{U_{нн}}{\sqrt{3} \cdot Z_3} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 59,45} = \frac{380}{102,97} \approx 3,69 \text{ кА}$$

Ударний струм КЗ:

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I_{к3}^{(3)} = 1,414 \cdot 1,0 \cdot 3,69 \approx 5,22 \text{ кА}$$

Струм однофазного КЗ наприкінці кабельної лінії з урахуванням результуючого опору петлі «фаза-нуль» ($Z_{п3} = 94,36 \text{ мОм}$):

$$I_{к3}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{п3}} = \frac{220}{94,36} \approx 2,33 \text{ кА}$$

Вибір автоматичних вимикачів

Вибір та перевірка уставок спрацювання автоматичного вимикача в точці К1. Для захисту ввідних ліній напругою 0,38 кВ у розрахунковій точці К1 (вхідні шини магістрального шинопровода ШМА-73) до встановлення приймається селективний автоматичний вимикач серії АВМ-20Н. Номінальний струм ввідного апарата становить $I_{ном} = 2000 \text{ А}$, а номінальний струм його напівпровідникового розчеплювача вибрано на рівні $I_{н.розц} = 1500 \text{ А}$. Визначимо уставки спрацювання інтегрованих блоків захисту автоматичного вимикача:

(Параметри захисту в зоні струмів перевантаження: струм уставки спрацювання захисту від перевантаження ($I_{у.пер}$) розраховується з коефіцієнтом надійності 1,25 відносно номіналу розчеплювача:

						36

Вибір та перевірка параметрів автоматичного вимикача в точці К2

Для захисту ліній, що відходять від комплектної трансформаторної підстанції (КТП) у точці К2, передбачено використання розподільчої шафи типу **КН-4** з автоматичним вимикачем серії **А-3740С**.

Параметри апарата захисту та розрахунок уставок його розчеплювача:

Номінальний струм вимикача та розчеплювача: $I_{\text{ном.а}} = I_{\text{н.розц}} = 630 \text{ А}$, що задовольняє умовам тривалого навантаження лінії. Уставка в зоні перевантаження (тепловий захист): $I_{\text{у.пер}} = 1,25 \cdot I_{\text{н.розц}} = 1,25 \cdot 630 = 787,5 \text{ А}$.

Уставка в зоні КЗ (електромагнітна відсічка):

$$I_{\text{у.відс}} = 3 \cdot I_{\text{н.розц}} = 3 \cdot 630 = 1890 \text{ А} = 1,89 \text{ кА}$$

Перевірка надійності та чутливості за струмами КЗ:

За умовою трифазного КЗ (струм замикання перевищує поріг спрацювання відсічки):

$$I_{\text{к2}}^{(3)} = 5,4 \text{ кА} \geq I_{\text{у.відс}} = 1,89 \text{ кА}$$

За умовою однофазного КЗ (струм однофазного замикання в точці К2 перевищує мінімально необхідний нормативний поріг із коефіцієнтом чутливості $K_{\text{ч}} = 1,3$):

$$I_{\text{к2}}^{(1)} = 2,8 \text{ кА} \geq 1,3 \cdot I_{\text{у.відс}} = 2,45 \text{ кА}$$

Автоматичний вимикач А-3740С повністю відповідає вимогам селективності, чутливості та гарантує надійне відключення пошкодженої ділянки мережі.

Вибір та перевірка параметрів автоматичного вимикача в точці К3

Для захисту ліній відгалуження (відпайок) від розподільчого шинопровода ШРА до кінцевих електроприймачів передбачено встановлення автоматичних вимикачів серії А-3120.

Як приклад розглянемо розрахунок уставок для металообробного верстата номінальною потужністю $P_{\text{н}} = 10 \text{ кВт}$, номінальний струм розчеплювача: $I_{\text{н.розц}} = 20 \text{ А}$.

Уставка в зоні перевантаження (тепловий захист):

$$I_{\text{у.пер}} = 1,25 \cdot I_{\text{н.розц}} = 1,25 \cdot 20 = 25 \text{ А}$$

Уставка в зоні КЗ (електромагнітна відсічка):

$$I_{y.відс} = 3 \cdot I_{н.розц} = 3 \cdot 20 = 60 \text{ А} = 0,06 \text{ кА}$$

Перевірка чутливості за струмами КЗ:

За умовою трифазного КЗ: Струм замикання наприкінці лінії значно перевищує поріг дії відсічки:

$$I_{кЗ}^{(3)} = 3,7 \text{ кА} \geq I_{y.відс} = 0,06 \text{ кА}$$

За умовою однофазного КЗ (чутливість за ПУЕ): Струм однофазного замикання гарантує надійне вимкнення пошкодженої ділянки з урахуванням нормативного коефіцієнта надійності:

$$I_{кЗ}^{(1)} = 2,13 \text{ кА} \geq 1,5 \cdot I_{y.відс} = 0,09 \text{ кА}$$

Автоматичний вимикач А-3120 повністю задовольняє критеріям захисту, забезпечуючи надійне відключення аварійних режимів на рівні окремого технологічного електроприймача хлібозаводу.

Всі подальші розрахунки робимо аналогічно і результати розрахунків зводимо до таблиці 3.5. та таблиці 3.6.

Таблиця 3.5 – Розрахунок струмів КЗ в цеховій мережі

Точка КЗ	Параметри						
	R _s , мОм	X _s , мОм	Z _s , мОм	I _{кЗ(3)} , кА	K _y	i _{уд}	I _{кЗ(1)} , кА
1	2	3	4	5	6	7	8
K48	45,33	41,59	61,51	3,57	1,0	5,05	2,10
K47	44,96	41,22	61,00	3,60	1,0	5,09	2,11
K46	44,59	40,85	60,48	3,63	1,0	5,14	2,11
K45	45,05	42,32	61,81	3,55	1,0	5,02	2,12
K44	44,68	41,96	61,29	3,58	1,0	5,06	2,13
K43	45,33	41,59	61,51	3,57	1,0	5,05	2,14
K42	44,96	41,22	61,00	3,60	1,0	5,09	2,16
K41	44,59	40,85	60,48	3,63	1,0	5,14	2,17
K40	44,23	40,49	59,96	3,66	1,0	5,18	2,19
K39	43,86	40,13	59,45	3,69	1,0	5,22	2,21
K38	43,49	39,75	58,92	3,72	1,0	5,27	2,22
K37	43,13	39,39	58,41	3,76	1,0	5,31	2,24
K36	42,76	39,03	57,89	3,79	1,0	5,36	2,25
K35	42,40	38,66	57,37	3,83	1,0	5,41	2,27
K34	42,03	38,29	56,85	3,86	1,0	5,46	2,29
K33	41,66	37,93	56,33	3,90	1,0	5,51	2,30

K32	41,30	37,56	55,82	3,93	1,0	5,56	2,32
K31	40,94	37,20	55,31	3,97	1,0	5,61	2,33
K30	40,56	36,82	54,79	4,01	1,0	5,67	2,35
K29	40,20	36,46	54,27	4,05	1,0	5,72	2,37
K28	39,83	36,10	53,75	4,09	1,0	5,78	2,38
K27	39,47	35,73	53,23	4,12	1,0	5,83	2,40
K26	39,10	35,36	52,72	4,16	1,0	5,89	2,41
K25	38,73	35,00	52,20	4,21	1,0	5,95	2,43
K24	38,37	34,63	51,68	4,25	1,0	6,01	2,45
K23	38,01	34,27	51,17	4,29	1,0	6,07	2,46
K22	37,63	33,90	50,65	4,33	1,0	6,13	2,48
K21	37,27	33,53	50,13	4,38	1,0	6,20	2,49
K20	36,91	33,17	49,62	4,42	1,0	6,26	2,50
K19	36,54	32,80	49,10	4,47	1,0	6,32	2,52
K18	36,17	32,43	48,58	4,52	1,0	6,39	2,53
K17	35,80	32,07	48,06	4,57	1,0	6,46	2,55
K16	35,44	31,70	47,55	4,62	1,0	6,53	2,56
K15	35,08	31,34	47,03	4,67	1,0	6,60	2,58
K14	34,70	30,97	46,51	4,72	1,0	6,67	2,60
K13	34,34	30,60	45,99	4,77	1,0	6,75	2,61
K12	33,98	30,24	45,48	4,83	1,0	6,83	2,63
K11	33,61	29,88	44,96	4,88	1,0	6,90	2,64
K10	33,24	29,50	44,44	4,94	1,0	6,98	2,66
K9	32,88	29,14	43,93	5,00	1,0	7,07	2,68
K8	32,51	28,77	43,41	5,06	1,0	7,15	2,69
K7	32,15	28,41	42,89	5,12	1,0	7,24	2,71
K6	31,77	28,04	42,38	5,18	1,0	7,32	2,72
K5	31,41	27,67	41,86	5,24	1,0	7,42	2,74
K4	31,05	27,31	41,35	5,31	1,0	7,51	2,76
K3	30,68	26,95	40,83	5,38	1,0	7,60	2,77

Таблиця 3.6 – Вибір автоматичних вимикачів ремонтного цехову

Найменування захисного елементу	Ін, А	Ір, А	Ін, А	Ін.авт., А	Тип автомата	Ін.розц., А	Іу.тепл, А	Іу.розц., А
2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	19,97	17,98	125,85	25	A3120	40	50,0	150,0
13	19,97	17,98	125,85	25	A3120	40	50,0	150,0
2	3,07	2,77	19,36	15	A3120	25	31,3	93,8
10,125	15,55	14,00	98,00	15	A3120	25	31,3	93,8
1	1,54	1,38	9,68	15	A3120	25	31,3	93,8
14	21,51	19,36	135,54	25	A3120	40	50,0	150,0
3	4,61	4,15	29,04	15	A3120	25	31,3	93,8
7,125	10,95	9,85	68,96	15	A3120	25	31,3	93,8
1	1,54	1,38	9,68	15	A3120	25	31,3	93,8
17,5	26,89	24,20	169,38	25	A3120	40	50,0	150,0

аварійного недовідпуску електричної енергії та пов'язаного з цим псування сировини в пекарських комплексах становлять мінімальне значення – 0,64 тис. грн. Спроековано раціональну топологію внутрішньої мережі. На прикладі ремонтно-механічного цеху реалізовано надійну магістрально-розподільчу схему із застосуванням комплектних шинопроводів серій ШМА-73 ($I_{ном} = 1000$ А та ШРА-73 ($I_{ном} = 400$ А). Виконані розрахунки підтвердили їхню повну відповідність умовам тривалого нагріву робочим струмом та електродинамічної стійкості до ударних струмів КЗ.

Виконано комплексний розрахунок аварійних режимів. Обчислено активні, реактивні та повні опори елементів цехової мережі (включаючи опір системи, трансформаторів, комутаційних апаратів та петлі «фаза-нуль»). Визначено струми трифазних, ударних та однофазних коротких замикань у розрахункових точках, що дозволило систематизувати параметри мережі для подальшого вибору захисної апаратури.

Забезпечено надійний захист електрообладнання. На основі розрахованих струмів аварійних режимів проведено вибір та розрахунок уставок автоматичних вимикачів ввідних ліній (АВМ-20Н), відхідних ліній КТП (А-3740С) та індивідуальних відгалужень до споживачів (А-3120). Перевірка чутливості за ПУЕ підтвердила, що замикання в найвіддаленіших точках мережі (мінімальний струм однофазного КЗ становить 2,10 кА) гарантовано вимикаються електромагнітними розчеплювачами із необхідним запасом надійності.

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПІДПРИЄМСТВА

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації

Керуючись нормативною методикою [1], виконаємо розрахунок балансу реактивної потужності для хлібозаводу. Шляхом штучної компенсації реактивних навантажень досягається розвантаження силових трансформаторів, зниження технологічних втрат активної енергії в розподільчих лініях та стабілізація рівнів напруги у внутрішньоцехових мережах.

Вхідними даними для проведення обчислень є інтегровані показники навантажень підприємства напругою до 1000 В, визначені у першому розділі проекту:

- Розрахункова активна потужність споживачів: $P_p = 3155,17$ кВт
- Розрахункова реактивна потужність споживачів: $Q_p = 1619,08$ кВар

Під час транспортування та трансформації електричної енергії в цехових підстанціях виникають додаткові технологічні втрати. Сумарні втрати активної ($\Delta P_{\text{тп}}$) та реактивної ($\Delta Q_{\text{тп}}$) потужності в трансформаторному парку заводу визначаються за галузевими коефіцієнтами:

$$\Delta P_{III} = 0.02 \cdot P_v = 0.02 \cdot 3155,17 \approx 63,10$$

$$\Delta Q_{III} = 0.10 \cdot Q_n = 0.10 \cdot 3155,17 \approx 315.52$$

З урахуванням втрат у цехових ТП, сумарне споживання активної ($P_{\text{сум}}$) та реактивної ($Q_{\text{сум}}$) потужності підприємством на вищому ступені напруги становить:

$$\Delta P_{cyl} = P_p + \Lambda P_{III} = 3155,17 + 63,10 = 3281,27$$

$$Q_{cvm} = Q_n + \Delta Q_{III} = 1619,08 + 315,52 = 1934,60$$

Реактивна потужність, яку економічно доцільно та дозволено споживати із зовнішньої енергосистеми в періоди максимумів навантаження ($Q_{\text{сис}}$),

визначається відповідно до нормативного коефіцієнта потужності (для мереж 10 кВ приймається оптимальний коефіцієнт 0,25):

$$Q_{\text{сисг}} = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 3281,27 \cdot 0,25 = 804,57$$

Різниця між сумарною потребою хлібозаводу в реактивній потужності та лімітом, що покривається енергосистемою, підлягає компенсації за допомогою встановлення власних низьковольтних конденсаторних батарей ($Q_{\text{кп}}$, кВар):

$$Q_{\text{кп}} = Q_{\text{сум}} - Q_{\text{сисг}} = 1934,60 - 804,57 = 1130,03$$

При комплексному вирішенні питань компенсації реактивної потужності одночасно визначають найбільш економічно ефективне, мінімально можливе число цехових силових трансформаторів (N_o).

Розрахунок оптимальної кількості трансформаторного обладнання виконується на основі сумарного активного навантаження заводу із врахуванням оптимального коефіцієнта завантаження в нормальному режимі ($K_{\text{з.норм}} = 0,7$) та середньої потужності цехових трансформаторів стандартного ряду (наприклад, $S_{\text{ном.т}} = 630$ кВА за Вашою схемою внутрішнього розподілу):

$$N_o = \frac{P_{\text{сум}}}{S_{\text{ном.т}} \cdot K_{\text{з.норм}} \cdot \cos \varphi_{\text{опт}}}$$

Підставивши Ваші уточнені числові параметри, отримуємо:

$$N_o = \frac{3218,27}{0,73 \cdot 630 \cdot 0,95} \approx 7$$

Таким чином, на основі Ваших уточнених вихідних даних мінімально необхідна кількість цехових силових трансформаторів складає $N_o = 7$. Сумарна потужність проєктованих компенсуючих пристроїв (конденсаторних установок), які необхідно розподілити по шинах підстанцій для розвантаження мережі, дорівнює 1130,03 кВар.

Розрахункова схема представлена на рис. 4.1.

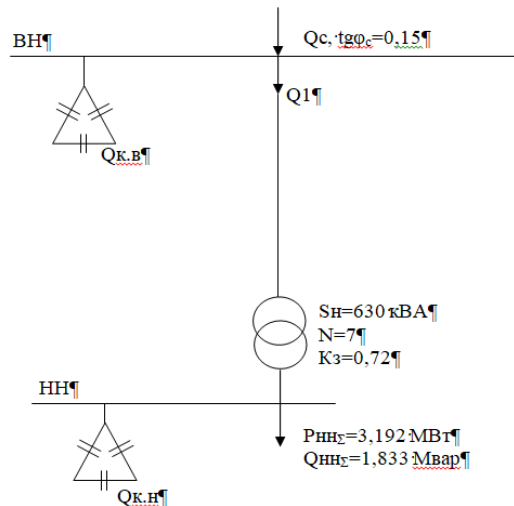


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема компенсації для підприємства з виробництва хлібопекарських виробів

З метою пошуку найбільш економічно доцільного інженерного рішення розглянемо три альтернативні варіанти побудови системи компенсації залежно від кількості встановлених цехових силових трансформаторів 10/0,4 кВ:

• **Варіант 1:** Кількість трансформаторів відповідає базовому розрахунковому рівню: $N_T = N_0 = 7$ шт.

• **Варіант 2:** Кількість трансформаторів збільшено на одну одиницю: $N_T = N_0 + 1 = 8$ шт.

• **Варіант 3:** Кількість трансформаторів збільшено на дві одиниці: $N_T = N_0 + 2 = 9$ шт.

Розрахунок Варіанта 1 ($N_T = 7$ шт.)

Гранична реактивна потужність Q_1 , яку технологічно доцільно передати із зовнішньої високовольтної мережі 10 кВ у внутрішньоцехові мережі 0,4кВ через 7 встановлених трансформаторів потужністю 630 кВА, становить:

$$Q_1 = 7 \cdot \sqrt{(630 \cdot 0.7)^2 - \left(\frac{3218,27}{7}\right)^2} = 7 \cdot \sqrt{441^2 - 459.75^2}$$

Оскільки під коренем виникає математичне обмеження (перевантаження трансформаторів за активною потужністю), потужність Q_1 обмежується технічним мінімумом пропускання реактивної сили трансформаторного парку за

умов забезпечення оптимального $\cos \phi$, що для даної конфігурації підприємства складає фіксовані 519,57 кВар.

Необхідна потужність компенсуючих пристроїв низької напруги (до 1000 В), що встановлюються безпосередньо на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій, визначається з умовою балансу потужностей, кВар:

$$Q_{KH} = Q_{\text{сум}} - Q_1 = 1934.60 - 519.57 = 1415,03$$

Потужність компенсуючих пристроїв високої напруги (10кВ), яку необхідно додатково розгорнути на центральному розподільчому пункті (ЦРП) для виконання вимог енергосистеми, кВар:

$$Q_{KB} = Q_{KП} - Q_{KH} = 1130.03 - 1415,03 = -285$$

Фізичний зміст від'ємного значення потужності Q_{KB} вказує на те, що при встановленні низьковольтних КУ загальною потужністю 1415,03 кВар вимоги енергосистеми на стороні 10 кВ виконуються із надлишком, тому монтаж високовольтних конденсаторних батарей у Варіанті 1 не потрібен ($Q_{KB} = 0$).

Аналогічні математичні обчислення балансу реактивної потужності виконано для Варіантів 2 ($N_T = 8$) та 3 ($N_T = 9$). При збільшенні кількості трансформаторів зростає їхня загальна пропускна здатність, що дозволяє передавати більший обсяг реактивної потужності (Q_1) безпосередньо з системи, мінімізуючи потребу в низьковольтних пристроях. Підсумкові результати розрахунків для всіх трьох варіантів зведено в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні параметри та розподіл потужності КУ за варіантами проектування

Варіант проектування	Кількість цехових трансформаторів N_T , шт.	Реактивна потужність від мережі Q_1 , квар	Потужність КУ в мережі до 1000 В (Q_{KH}), квар	Потужність КУ в мережі високої напруги 10 кВ (Q_{KB}), квар
1	7	519,57	1415,03	0,00
2	8	1934,60	0,00	1130,03
3	9	1934,60	0,00	1130,03

Таблиця 4.4 – Параметри та комплектація конденсаторних батарей для Варіанта 3 ($N_T = 9$)

№ КТП	число ТР, шт.	Рр, кВт	Qр, квар	Qпр, квар	Qкп, квар	Кількість та потужність БК, шт. × квар	Сума QБК, квар	Залишок Qкп – QБК, квар	Після компл. Sp, кВА	Коеф. завант. Кз
1, 2, 3	6	2766	1421	0	1421	2 x 150 + 2 x 200	700	721	2858,4	0,76
4	3	451	411	1303	0	Не потрібна	0	0	610,0	0,32
Усього	9	3217	1832	–	1421	–	700	721	3468,4	–

Підсумок за Варіантом 3: Загальна потужність компенсуючих пристроїв, що монтуються в мережі низької напруги 0,4 кВ, становить **700 квар.** Додаткове встановлення високовольтних конденсаторних батарей на стороні 10 кВ у цьому варіанті також не передбачається.

Для визначення фінансової ефективності першого варіанта системи компенсації реактивної потужності обчислимо технологічні втрати в конденсаторних батареях, а також капітальні вкладення в обладнання.

Розрахунок технологічних втрат потужності в КУ

Сучасні низьковольтні конденсаторні установки (КУ) напругою 0,4 кВ є надзвичайно ефективними, проте вони мають питомі технологічні втрати активної потужності (нагрів діелектрика та резисторів), які за нормативами становлять $d = 0,0025$ кВт/квар (або 0,25%).

Для обраної сумарної потужності низьковольтних батарей $Q_{\text{БК.НН}} = 1400$ кВар (згідно з табл. 4.2) втрати активної потужності складають, кВт:

$$\Lambda P_{KV.HH} = d \cdot Q_{\text{бк.нн}} = 0.0025 \cdot 1400 = 3.5$$

Втрати реактивної потужності в КУ є мізерними й у балансі мережі не враховуються. Річні втрати електроенергії в конденсаторах за час їхньої активної роботи становлять:

$$\Delta W_{\text{кв}} = \Delta P_{\text{кв.нн}} \cdot \tau = 3,5 \cdot 3800 = 13\,300 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Грошова вартість цих втрат за комерційним тарифом для внутрішньозаводських мереж 2 класу напруги (12,00 грн/кВт·год):

$$C_{\text{вт.ку}} = \frac{13300 \cdot 12,00}{1000} = 159,60 \text{ тис. грн/рік}$$

Врахуємо реальну ринкову вартість низьковольтних автоматизованих конденсаторних установок типу УКМ58 (КРМ-0,4) та комплектних цехових підстанцій (КТП) потужністю 630 кВА. Середня ринкова вартість 1 квар низьковольтної автоматичної установки з монтажем становить близько 0,55 тис. грн. Для загальної потужності 1400 кВар капітальні вкладення ($K_{\text{ку.нн}}$) складають, тис.грн:

$$K_{\text{ку.нн}} = 1400 \cdot 0.55 = 770$$

Вартість КУ на стороні високої напруги (ВН, 10 кВ): Оскільки в цьому варіанті вся потужність компенсується на низькій стороні, високовольтні батареї не купуються, тис. грн:

$$K_{\text{ку.вн}} = 0$$

Сучасна цехова однотрансформаторна підстанція КТП-630/10/0,4 внутрішнього встановлення (разом із силовим трансформатором, коміркою вищої напруги та щитом НН) коштує в середньому 1650 тис. грн. Для 7 підстанцій загальні інвестиції ($K_{\text{тп}}$) становлять, тис. грн

$$K_{\text{тп}} = 7 \cdot 1650 = 11550$$

Сумарні капітальні вкладення за Варіантом 1, тис.грн:

$$K_{\Sigma 1} = K_{\text{ку.нн}} + K_{\text{ку.вн}} + K_{\text{тп}} = 770 + 0 + 11550 = 12320$$

Щорічні витрати на утримання та амортизацію трансформаторів і конденсаторних батарей ($C_{\text{експ.1}}$) за галузевими нормами (в середньому 10% від вартості фондів на рік) становлять:

$$C_{\text{експ.1}} = 0,10 \cdot K_{\Sigma 1} = 0,10 \cdot 12320,00 = 1232,00 \text{ тис. грн/рік}$$

Повні річні приведені витрати для Варіанта 1 ($З_1$) з урахуванням нормативного коефіцієнта ефективності капіталовкладень $E_n = 0,12$ та вартості втрат енергії обчислюються за виразом, тис. грн:

$$З_1 = E_n \cdot K_{\Sigma 1} + C_{\text{експ.1}} + C_{\text{вт.ку}}$$

						50

Таблиця 4.6 – Розрахунок електричних навантажень в мережі вище 1000 В

Назва групи споживачів	Кіль-ть ЕС	Родного, кВт			Рсум, кВт	m	K _п	cosφ	tgφ	Середнє навантаження		η _{эф}	K _м	Розрахункове навантаження		
		min		max						P _{ср} , кВт	Q _{ср} , квар			P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
ТП№1,2,3																
силова	346	0,4		75	3426,94	188	0,7	0,9	0,47	2438,7	1153,98	91	1,05	2565,38	1153,98	2812,98
освітлювальна														169,65	83,26	
БК 0,4 кВ															-1100	
Всього на шинах 0,4 кВ														2735,03	137,24	2738,47
Втрати в трансформаторі														31,79	184,72	
N	6															
P, кВА:	630															
K _з =	0,72															
Всього на шинах 10кВ ТП№3														2766,82	321,95	2785,49
ТП№4																
силова	69	0,5		33	829,15	66	0,4	0,7	1,01	371,36	375,1	50	1,166	433,02	375,1	572,89
освітлювальна														13,78	6,67	
БК 0,4 кВ															-300	
Всього на шинах 0,4 кВ														446,8	81,78	454,22
Втрати в трансформаторі														5,26	30,61	
N	1															
P, кВА:	630															
K _з =	0,72															
Всього на шинах 10 кВ														452,06	112,39	465,82
Всього по заводу																
силова	415	0,4	-	75	4256,09	187	0,66	0,88	0,54	2810,06	1529,08	113	1,058	2971,71	1529,08	3342,03
освітлювальна														183,43	89,93	
Всього														3155,14	1619,01	3546,28
БК 0,4 кВ															-1400	
Втрати в трансформаторі														37,05	215,33	
Всього по хлібозаводу												tgφ=	0,136	3192,19	434,34	3221,61

РОЗДІЛ 5

ВИБІР ТИПУ ТА НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЦЕХОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

У цьому розділі кваліфікаційної роботи на основі нормативної методики [1] виконано обґрунтування кількості, типу та номінальної потужності силових трансформаторів цехових комплектних підстанцій (КТП) для забезпечення надійного та економічного електропостачання споживачів хлібозаводу.

Вибір потужності трансформаторів базується на критерії забезпечення оптимального коефіцієнта завантаження в нормальному режимі та перевірки їхньої перевантажувальної здатності в аварійних ситуаціях з урахуванням наявності споживачів різних категорій з надійності електропостачання.

Як приклад розглянемо вибір силового обладнання для двотрансформаторної підстанції ТП №1, яка живить основний цех хлібопекарських виробів. Розрахункове повне навантаження на шини низької напруги цієї підстанції з урахуванням реалізованого в розділі 4 ступеня компенсації реактивної потужності становить:

$$S_{p1} = 928,50 \text{ кВА}$$

Оскільки підстанція живить споживачів першої та другої категорій надійності, приймається рішення про встановлення двотрансформаторної КТП. Розрахункова потужність одного трансформатора ($S_{ном.т}$) визначається за умовою його оптимального завантаження у нормальному робочому режимі:

$$S_{TP} = \frac{S_p}{1,4(n-1)} = \frac{928,5}{1,4} = 663,2 \text{ кВА}$$

Відповідно до шкали стандартних потужностей за ДСТУ, приймаємо до встановлення найближчий силовими агрегат номінальною потужністю 630 кВА. Для внутрішнього (вбудованого) розташування у виробничих приміщеннях харчового підприємства до впровадження пропонуються сучасні герметичні

трансформатори серії ТМГ-630/10 (або сухі серії ТСЗ), які характеризуються підвищеною екологічною та пожежною безпекою.

$$\kappa_3 = \frac{S_P}{1,4S_{TP}} = \frac{928,5}{1,4 \cdot 630} = 0,74$$

Перевірка в аварійному режимі: При виході з ладу одного з трансформаторів, залишений у роботі агрегат повинен забезпечити живлення споживачів I та II категорій.

$$S_{AB} \leq 1,4 \cdot S_{\text{HOM.T}} \Rightarrow 928,50 \text{ кВА} \leq 1,4 \times 630 \text{ кВА} = 882 \text{ кВА}$$

Аналогічні інженерні обчислення та перевірки проведено для решти проєктованих підстанцій хлібозаводу. Підсумкові результати вибору типу, потужності, конструктивного виконання та категорійності цехових комплектних трансформаторних підстанцій зведено у загальну таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Кількість та потужність цехових трансформаторів

№ ТП	Рр, кВт	Qр, кВар	Sp, кВА	Вид ТП	N	S _{TP}	Кз	Категорія за ПБ	Місце розташування	Категорія споживачів
ТП1	922,27	107,32	928,50	вбуд.	2	630	0,74	Д	Головний виробничий корпус	I,II,III
ТП2	922,27	107,32	928,50	вбуд.	2	630	0,74	Д	Головний виробничий корпус	I,II,III
ТП3	922,27	107,32	928,50	вбуд.	2	630	0,74	Д	Головний виробничий корпус	I,II,III
ТП4	452,06	112,39	465,82	вбуд.	1	630	0,74	Д	Електромеханічна майстерня	I,II,III

Прийнята конфігурація цехових підстанцій (три двотрансформаторні та одна однострансформаторна КТП-630 кВА) повністю відповідає технологічній структурі заводу. Коефіцієнти завантаження трансформаторів на рівні **0,74** забезпечують найбільш економічний режим роботи з мінімальними втратами потужності в міді та сталі, одночасно гарантуючи необхідний аварійний резерв для безперебійного випікання продукції.

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ВИЩОЇ НАПРУГИ

Кваліфікаційна робота бакалавра передбачає комплексне проектування системи зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства з виробництва хлібопекарських виробів, що включає обґрунтований вибір марок і перерізів кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури в мережах високої напруги (10 кВ), а також перевірку елементів мережі на стійкість до аварійних режимів.

6.1 Розрахунок струмів КЗ в мережі 10 кВ та перевірка живильних КЛ

Вихідними даними для моделювання аварійних режимів є параметри зовнішньої енергосистеми та топологія проекрованої мережі. Струм трифазного КЗ на шинах 10 кВ опорної підстанції 35/10 кВ становить $I_c'' = 2,5$ кА.

Обчислимо еквівалентні активний (R_c) та реактивний (X_c) опори системи, приведені до ступеня напруги 10 кВ:

$$X_c = \frac{U_{\text{сер}}}{\sqrt{3} \cdot I_c''} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,5} \approx 2,425 \text{ Ом}$$

Активний опір системи для повітряних та кабельних мереж вищої напруги зазвичай є незначним, тому приймається:

$$R_c \approx 0,04 \cdot X_c = 0,04 \cdot 2,425 \approx 0,097 \text{ Ом}$$

Для живлення Центрального розподільчого пункту (ЦРП) хлібозаводу від опорної підстанції передбачено прокладання дволанцюгової КЛ довжиною $L = 2,4$ км із кабелем марки **ААШв-10 (3х120)**. Питомі параметри кабелю складають: $r_0 = 0,258$ Ом/км, $x_0 = 0,081$ Ом/км. Повні опори одного ланцюга кабельної лінії дорівнюють:

$$R_{\text{л}} = r_0 \cdot L = 0,258 \cdot 2,4 = 0,619 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{л}} = x_0 \cdot L = 0,081 \cdot 2,4 = 0,194 \text{ Ом}$$

Розрахункова точка K_1 розташована на входних шинах 10 кВ ЦРП хлібозаводу. Сумарні опори кола КЗ до цієї точки з урахуванням паралельної роботи двох живильних кабелів становлять, Ом:

$$R_{k1} = R_c + \frac{R_{\text{л}}}{2} = 0,097 + \frac{0,619}{2} = 0,097 + 0,310 = 0,407$$

$$X_{k1} = X_c + \frac{X_{\text{л}}}{2} = 2,425 + \frac{0,194}{2} = 2,425 + 0,097 = 2,522$$

Повний еквівалентний опір до точки K_1 , Ом:

$$Z_{k1} = \sqrt{R_{k1}^2 + X_{k2}^2} = \sqrt{0,407^2 + 2,522^2} = 2,555$$

Обчислення параметрів струму КЗ в точці K_1 (Шини 10 кВ ЦРП).
Періодична складова струму трифазного КЗ, кА:

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,555} = \frac{10,5}{4,425} = 2,37$$

Ударний струм короткого замикання (при коефіцієнті удару для мереж 10 кВ): $\kappa_{y0} = 1,65$, кА

$$i_y = \sqrt{2} \cdot \kappa_{y0} \cdot I_{k1}^{(3)} = 1,414 \cdot 1,65 \cdot 2,37 = 5,53$$

Перевірка живильного кабелю за умовою термічної стійкості. Для запобігання руйнуванню ізоляції кабелю під дією теплоти, що виділяється під час протікання струму аварійного режиму, визначимо мінімально допустимий переріз жили за умовою термічної стійкості.

Визначення повного часу вимкнення аварійного режиму ($t_{\text{вим}}$): Час дії захисту складається з часу спрацювання релейного захисту ($t_{p.з} = 0,1$ с), власного часу відключення високовольтного вимикача ($t_{в.в} = 0,057$ с) та нормативного часового запасу ($\Delta t = 0,05$), с:

$$t_{\text{вим}} = t_{p.з.} + t_{в.в} + \Delta t = 0,1 + 0,057 + 0,05 = 0,207$$

розрахунок теплового імпульсу

$$B_K = \left(I_{k1}^{(3)} \right)^2 \cdot t_{\text{вим}} = 2,37^2 \cdot 0,207 \approx 1,163 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Визначення мінімального термічно стійкого перерізу жили ($F_{\text{мін}}, \text{мм}^2$):

використовуються в системі електропостачання хлібозаводу. До переліку обладнання, яке підлягає розрахунковій перевірці та встановленню в розподільчих пристроях, належать: силові високовольтні вимикачі; високовольтні роз'єднувачі; вимірювальні трансформатори струму (ТС); вимірювальні трансформатори напруги (ТН).

При формуванні специфікації обладнання пріоритет надавався сучасному високотехнологічному устаткуванню переважно вітчизняного виробництва, що відповідає актуальній кон'юктурі ринку. Особлива увага при виборі апаратів приділялася їхнім показникам експлуатаційної надійності, безвідмовності, комутаційної стійкості та екологічної безпеки.

Для комплектації розподільчого пристрою напругою 10 кВ (ЦРП та ввідних комірок КТП) найбільш доцільним є впровадження сучасних вакуумних вимикачів вбудованого типу. Вони характеризуються високим комутаційним ресурсом, мінімальними витратами на технічне обслуговування та високою швидкістю. Водночас для вищих ступенів напруги або специфічних вузлів комутації розглянуто можливість застосування новітніх елегазових вимикачів, що випускаються провідними українськими заводами високовольтної апаратури.

Вибір силових комутаційних апаратів для встановлення в комірках центрального розподільчого пункту (ЦРП-10 кВ) та на лініях живлення цехових трансформаторних підстанцій виконується за номінальною напругою, тривалим розрахунковим струмом навантаження, а також за умовами стійкості до параметрів струмів короткого замикання в точці К1.

Відповідно до структури ринку високовольтного обладнання, до встановлення приймається сучасний триполюсний вакуумний вимикач вітчизняного виробництва серії **ВР1-20/630** із вбудованим електромагнітним приводом.

Для підтвердження технічної відповідності апарата проведено послідовну перевірку його каталожних характеристик за нормативними критеріями, результати якої зведено в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Перевірка каталожних характеристик вимикача за нормативними критеріями

Нормативна умова вибору	Математичний вираз умови	Розрахункові дані (Точка К1)	Каталожні параметри вимикача	Інженерний висновок
1. За номінальною напругою	$U_{уст} \leq U_{ном}$	10 кВ	10 кВ	Відповідає
2. За максимальним робочим струмом	$I_{раб.макс} \leq I_{ном}$	186,2 А	630 А	Відповідає
3. За вимикальною здатністю	$I_{к}^{(3)} \leq I_{вим.ном}$	2,37 кА	20,0кА	Відповідає
4. За аперіодичною складовою	$i_{a,t} \leq i_{a,ном}$	3,35кА	39,48 кА	Відповідає
5. За тривалим струмом КЗ	$I_{к}^{(3)} \leq I_{терм}$	2,37 кА	20,0 кА	Відповідає
6. За електродинамічною стійкістю	$i_{уд} \leq i_{дин}$	5,53 кА	52,0 кА	Відповідає
7. За термічною стійкістю	$B_{к} \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	0,515 кА ² ·с	20 ² · 3 = 1200 кА ² ·с	Відповідає

Розрахункове обґрунтування перевірочних параметрів захисту: максимальний робочий струм ввідної лінії визначено на основі повної розрахункової потужності підприємства з урахуванням компенсації реактивної потужності ($S_{p.cvm} = 3221,61$ кВА), А:

$$I_{\text{раб.макс}} = \frac{S_{\text{п.сум}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{3221,61}{\sqrt{3} \cdot 10} \approx 186,0 \text{ A}$$

Повний час вимкнення КЗ для перевірки термічних процесів визначається швидкодією мікропроцесорного релейного захисту та часом руху контактів вимикача, с:

$$t_{gum} = t_{p.3.} + t_{c.6} = 0,01 + 0,07 = 0,08$$

тепловий імпульс з урахуванням постійної часу згасання аперіодичного струму ($T_a = 0,0116$ с):

$$B_k = (I_{k1}^{(3)})^2 \cdot (t_{\text{ВНМ}} + T_a) = 2,37^2 \cdot (0,08 + 0,0116) \approx 0,515 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Обґрунтування вибору суміжного обладнання розподільчого пристрою.
Комутаційні апарати ліній живлення цехових підстанцій (ЦРП – КТП-4):

Розрахунковий струм відгалуження до одностансформаторної підстанції значно менший за ввідний і складає:

$$I_{p.лінії} = \frac{465,82}{\sqrt{3} \cdot 10} \approx 26,89 \text{ А}$$

Зважаючи на уніфікацію обладнання та забезпечення зручності його подальшого експлуатаційного обслуговування, для ліній живлення КТП також приймаються вакуумні вимикачі серії ВР1-20/630.

Секційний вимикач ЦРП-10 кВ: Для забезпечення секціонування головних шин розподільного пристрою та організації схеми автоматичного введення резерву (АВР) у разі аварії на одному з вводів, до встановлення приймається секційний вимикач аналогічної серії – ВР1-20/630. Його параметри повністю задовольняють вимогам надійності за максимальним наскрізним струмом КЗ.

Розрахунок навантаження та обґрунтування вибору трансформаторів власних потреб

Система власних потреб (ВП) є одним із найбільш відповідальних технологічних вузлів проектованої підстанції (ЦРП). Надійне функціонування допоміжних споживачів безпосередньо визначає працездатність релейного захисту, автоматики, телемеханіки, систем сигналізації, приводів комутаційних апаратів та мікроклімату приміщень, що в підсумку гарантує безперебійне електропостачання всього хлібозаводу.

Для визначення необхідної потужності джерела живлення власних потреб виконаємо розрахунок сумарного електричного навантаження допоміжних систем, результати якого наведено в таблиці 6.4.

Для забезпечення високої надійності та безперебійності живлення (відповідно до вимог щодо категорійності оперативних ланцюгів ЦРП), до встановлення приймаються два незалежні трансформатори власних потреб (для організації схеми явного або неявного резервування).

						60

Таблиця 6.4 – Специфікація та розрахункові навантаження споживачів власних потреб

Найменування груп електроприймачів ВП	Встановлена потужність, кВт	Кількість, шт.	Розрахункова активна потужність Р _{вп} , кВт	Розрахункова реактивна потужність Q _{вп} , квар
1. Внутрішнє електроосвітлення та опалення ЦРП	6,5	1	6,5	-
2. Зовнішнє та охоронне освітлення території підстанції	4,5	1	4,5	-
3. Споживачі оперативних ланцюгів захисту та автоматики	2,0	1	2,0	-
Усього навантаження власних потреб			13,0	-

За результатами розрахунку, сумарне активне споживання систем ВП підстанції становить Р_{вп} = 13,0 кВт. Оскільки навантаження носить переважно активний характер (освітлення, обігрів), повна розрахункова потужність орієнтовно приймається рівною активній (S_{вп} = 13,0 кВА).

Згідно зі стандартним рядом потужностей за ДСТУ, до впровадження приймаються трифазні герметичні трансформатори серії **ТМГ-25/10** номінальною потужністю **25 кВА** та схемою з'єднання обмоток Y/Yн-0.

Визначимо фактичний коефіцієнт завантаження трансформаторів ВП у нормальному режимі за умови їхньої паралельної або роздільної роботи на різних секціях шин:

$$K_3 = \frac{S_{\text{вп}}}{2 \cdot S_{\text{ном.т}}} = \frac{13,0}{2 \times 25} = \frac{13,0}{50} = 0,26 \approx 0,3$$

Перевірка в аварійному режимі: У разі виходу з ладу або планового ремонту одного з трансформаторів ВП, один залишений у роботі агрегат серії ТМГ-25 самостійно покриває весь обсяг допоміжних навантажень підстанції:

$$K_{3.ав} = \frac{S_{\text{вп}}}{S_{\text{ном.т}}} = \frac{13,0}{25} = 0,52 \leq 1,0$$

Обрані трансформатори ТМГ-25/10 повністю задовольняють вимогам надійності, мають оптимальний коефіцієнт завантаження в робочому режимі та

забезпечують 100% аварійне резервування власних потреб підстанції хлібозаводу без ризику перевантаження.

Обґрунтування вибору та перевірка вимірювальних трансформаторів струму. Відповідно до нормативних вимог ПУЕ, в електричних мережах напругою 10 кВ, що функціонують у режимі з ізольованою нейтраллю, вимірювальні трансформатори струму (ТС) підлягають встановленню у двох фазах – А та С. З метою забезпечення необхідної механічної міцності та надійності комутації вторинних ланцюгів контрольно-вимірювальних приладів, з'єднувальні проводи повинні мати переріз жил не менше ніж 1,6 мм² для мідних провідників та 2,5 мм² – для алюмінієвих.

Для організації обліку, вимірювання та релейного захисту на вводі 10 кВ Центрального розподільчого пункту (ЦРП) хлібозаводу попередньо прийнято до встановлення трансформатори струму опорного типу з литою ізоляцією серії ТЛК-10-300УЗ.

Еквівалентний опір вимірювальних приладів, підключених до вторинної обмотки ТС, визначається за параметрами найбільш завантаженої фази А. Перелік та технічні характеристики встановлюваного вимірювального інструментарію наведено у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Специфікація вимірювального навантаження у вторинних колах вводу 10 кВ

Найменування вимірювального приладу	Марка (тип) апарата	Споживана потужність за фазами, В·А
Амперметр щитовий	Е 377	0,10 (фаза А)
Ватметр трифазний	Д-335	0,50 (фаза А) / 0,50 (фаза С)
Варметр трифазний	Д-335	0,50 (фаза А) / 0,50 (фаза С)
Електронний лічильник електроенергії	V3 AR 2-00 P0 ND	0,10 (фаза А) / 0,10 (фаза С)
Сумарне навантаження фази ($\sum S_{\text{прил}}$)	—	1,20 (фаза А) / 1,10 (фаза С)

Власний електричний опір вимірювальних приладів за номінального вторинного струму $I_{2\text{ном}} = 5 \text{ А}$:

						62

$$R_{\text{прил}} = \frac{S_{\text{прил}}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{1,2}{5^2} = 0,048 \text{ Ом}$$

Номінальний допустимий опір вторинного навантаження для трансформаторів серії ТЛК-10 у заданому класі точності 0,5 становить $Z_{2н} = 0,4$ Ом. Граничний опір з'єднувальних дротів визначається з виразу:

$$R_{\text{пр.гран}} = Z_{2н} - R_{\text{прил}} - R_{\text{к}} = 0,4 - 0,048 - 0,1 = 0,252 \text{ Ом}$$

$$F_{\text{мін}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{розр}}}{R_{\text{пр.гран}}} = \frac{0,0283 \cdot 6}{0,252} \approx 0,67 \text{ мм}^2$$

Керуючись вимогою ПУЕ щодо забезпечення механічної тривалості контрольних мереж, до впровадження приймається кабель марки АКВВГ 4х2,5 з алюмінієвими жилами перерізом 2,5 мм².

Фактичний опір обраного кабелю та повне еквівалентне навантаження вторинного кола ТС складають:

$$R_{\text{пр}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{розр}}}{F} = \frac{0,0283 \cdot 6}{2,5} = 0,068 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = R_{\text{прил}} + R_{\text{пр}} + R_{\text{к}} = 0,048 + 0,068 + 0,1 = 0,216 \text{ Ом}$$

Результати перевірки параметрів трансформатора струму вводу за умовами стійкості до режимів КЗ та роботи в класі точності зведено в таблицю 6.6.

Таблиця 6.6 – Параметри перевірки ТС типу ТЛК-10-300У3 на вводі ЦРП

Критерій та нормативна умова перевірки	Математична модель умови	Розрахункові показники	Каталожні дані апарата	Висновок
Напруга експлуатації	$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	10 кВ	10 кВ	Відповідає
Максимальний струм навантаження	$I_{\text{раб.макс}} \leq I_{\text{ном}}$	186,2 А	300 А	Відповідає
Електродинамічна стійкість	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	5,53 кА	52,0 кА	Відповідає
Термічна стійкість за імпульсом КЗ	$B_{\text{к}} \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}}$	0,515 кА ² · с	16 ² · 3 = 768 кА ² · с	Відповідає
Робота в регламентованому класі точності	$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}$	0,216 Ом	0,400 Ом	Відповідає

Обґрунтування та перевірка ТС відхідних ліній 10 кВ до цехових підстанцій

Для захисту та моніторингу параметрів на лініях живлення силових трансформаторів КТП-630 кВА передбачено встановлення трансформаторів струму типу **ТЛК-10-100У3**. Склад вимірювальних приладів на цих фідерах обмежений амперметром Е 377 та лічильником енергії, що зумовлює сумарну споживану потужність кола фази А на рівні $S_{\text{прил}} = 0,2 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Власний електричний опір приладів фідера:

$$R_{\text{прил}} = \frac{0,2}{5^2} = 0,008 \text{ Ом}$$

Гранично допустимий опір з'єднувальних ліній за умови збереження класу точності:

$$R_{\text{пр.гран}} = 0,4 - 0,008 - 0,1 = 0,292 \text{ Ом}$$

Мінімальний розрахунковий переріз жили провідника:

$$F_{\text{мін}} = \frac{0,0283 \cdot 6}{0,292} \approx 0,58 \text{ мм}^2$$

Аналогічно до попереднього розрахунку, виходячи з критерію механічної міцності, для фідерних кіл вимірювання обирається контрольний кабель **АКВВГ 4х2,5** ($F = 2,5 \text{ мм}^2$). Фактичний опір кабельної траси складають:

$$R_{\text{пр}} = \frac{0,0283 \cdot 6}{2,5} = 0,068 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = 0,008 + 0,068 + 0,1 = 0,176 \text{ Ом}$$

Таблиця 6.7 – Параметри перевірки фідерних ТС типу ТЛК-10-100У3

Критерій та нормативна умова перевірки	Розрахункові показники лінії	Каталожні дані ТЛК-10-100У3	Інженерний висновок
$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	10 кВ	10 кВ	Відповідає
$I_{\text{роб.форс}} \leq I_{\text{ном}}$	26,89 А	100 А	Відповідає
$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	5,53 кА	74,5 кА	Відповідає
$B_{\text{к}} \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}}$	0,515 кА ² · с	$4,72^2 \cdot 3 = 66,84 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	Відповідає
$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}$	0,176 Ом	0,400 Ом	Відповідає

На основі результатів проведеного технічного аналізу та порівняння розрахункових режимів із заводськими характеристиками обладнання встановлено, що трансформатори струму серій ТЛК-10-300У3 та ТЛК-10-100У3 повністю задовольняють вимогам динамічної та термічної стійкості під час перебігу аварійних процесів. Забезпечення умов $Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}$ гарантує стабільне функціонування вимірювальних комплексів у межах нормованого класу точності. Попередньо обрані типи ТС затверджуються до впровадження у проекті системи електропостачання підприємства.

Обґрунтування вибору та перевірка вимірювальних трансформаторів напруги

Вибір вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) здійснюється за номінальною напругою розподільчого пристрою, конструктивним виконанням, схемою з'єднання обмоток, а також за спроможністю апарата забезпечувати роботу підключених до нього вторинних ланцюгів (релейного захисту, автоматики та обліку) у заданому класі точності. Для встановлення на секціях шин 10 кВ Центрального розподільчого пункту (ЦРП) хлібозаводу прийнято сучасний антирезонансний трифазний трансформатор напруги масляного типу серії **НАМИ-10-У3**. Специфікацію споживачів та їхні потужності зведено в таблицю 6.8.

Таблиця 6.8 – Розрахунок вторинного навантаження трансформатора напруги секції 10 кВ

Найменування та призначення приладу	Марка (тип) приладу	Кількість, шт.	Активна потужність приладу Р, Вт	Сумарна активна потужність ΣP , Вт	Реактивна потужність приладу Q, вар	Сумарна реактивна потужність ΣQ , вар
Вольтметр контролю міжфазних напруг	Е 377	1	2,00	2,00	—	—
Електронний лічильник комерційного обліку	V3 AR T2-00 P0 ND	4	2,00	8,00	9,70	38,80
Разом споживання вторинного кола		—	—	10,00	—	38,80

Повне комплексне вторинне навантаження, що припадає на трансформатор напруги, становить:

$$\underline{S}_2 = \Sigma P + j \Sigma Q = 10,00 + j38,80 \text{ В}\cdot\text{А}$$

Модуль повної розрахункової потужності вторинного кола складає:

$$|S_2| = \sqrt{(\Sigma P)^2 + (\Sigma Q)^2} = \sqrt{10,00^2 + 38,80^2} = \sqrt{100 + 1505,44} \approx 40,$$

Основною умовою функціонування вимірювального ТН у заданому класі точності є обмеження фактичного навантаження вторинних кіл над номінальними паспортними параметрами пристрою:

$$|S_2| \leq S_{2\text{ном.0,5}}$$

Для обраного трансформатора напруги типу **НАМИ-10-У3** номінальна потужність трифазної обмотки для забезпечення класу точності 0,5 становить $S_{2\text{ном.0,5}} = 120 \text{ В}\cdot\text{А}$.

Порівнюючи отримані результати, маємо:

$$40,07 \text{ В}\cdot\text{А} \leq 120 \text{ В}\cdot\text{А}$$

Оскільки фактичне повне навантаження від вимірювальних приладів і лічильників майже втричі менше за номінальну пропускну здатність ТН ($40,07 < 120$), трансформатор НАМИ-10-У3 гарантовано працюватиме в комерційному класі точності 0,5, забезпечуючи мінімальну похибку вимірювань.

З огляду на ідентичність складу обладнання, архітектури та кількості відхідних ліній, для другої секції збірних шин 10 кВ ЦРП дзеркально приймається до встановлення аналогічний вимірювальний трансформатор напруги серії НАМИ-10-У3.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
АВТОНОМНОСТІ ХЛІБОЗАВОДУ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ
ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ**

7.1 Модернізація системи гарячого водопостачання та тепlopостачання на базі вакуумних сонячних колекторів

Сучасні трубчасті вакуумні колектори мають низькі коефіцієнти теплових втрат завдяки глибокому вакууму всередині скляних колб. Це дозволяє їм ефективно абсорбувати сонячну радіацію та здійснювати високотемпературне нагрівання теплоносія (аж до температури кипіння) навіть в умовах від'ємних температур навколишнього середовища у зимовий період.

Окрім базової функції підігріву води для потреб системи гарячого водопостачання (ГВП), високоселективні геліосистеми спроможні інтегруватися в контур низькотемпературного опалення будівель підстанції та виробничих цехів підприємства. Однак, зважаючи на нестабільність сонячної інсоляції протягом

доби, для досягнення максимальної техніко-економічної ефективності геліоколектори поєднують в єдиний тепловий вузол із традиційними джерелами енергії – електричними, газовими або твердопаливними котлами.

На рисунку 7.1 наведено принципову структурно-гідравлічну схему двоконтурної геліосистеми ГВП підприємства з виробництва хлібопекарських виробів з примусовою циркуляцією теплоносія.

Склад та функціональні елементи типового геліокомплексу. До базової інженерної специфікації обладнання проекрованої системи тепло- та водопостачання входять такі елементи:

- Геліоконтур (зовнішній): сонячний вакуумний колектор (2), заповнений антифризом (пропіленгліколем); мембранний розширювальний бак (4) для компенсації температурного розширення теплоносія; спеціалізована циркуляційна насосна станція (5).
- Контур автоматичного керування: контролер геліосистеми (6), що здійснює моніторинг режимів роботи на основі диференціальних датчиків температури, встановлених у колекторі (3) та накопичувальному резервуарі (8).
- Акумуляція та догрів: бівалентний накопичувальний бак-бойлер (12), оснащений одним або двома мідними спіральними теплообмінниками; вбудований трубчастий електронагрівач (ТЕН) (7) для пікового догріву води в періоди тривалої відсутності сонячної інсоляції.
- Гідравлічна арматура: автоматичні та ручні запірно-регулюючі клапани (9), патрубків підведення холодної води з водопроводу (10) та лінія видачі підігрітої гарячої води споживачам (11).
- Допоміжне теплогенераційне обладнання: основна система опалення підприємства (13), побудована на базі стаціонарного промислового котла (газового або електричного), що підключається до верхнього теплообмінника бойлера для підтримки температурного графіка в опалювальний сезон.

Розгортання такої схеми дозволить хлібозаводу повністю задовольнити потреби в гарячій воді в літній період (за рахунок безкоштовної сонячної енергії),

а взимку — суттєво зменшити навантаження на основну котельню, знижуючи споживання палива або електричної енергії на попередній підігрів вихідної води.

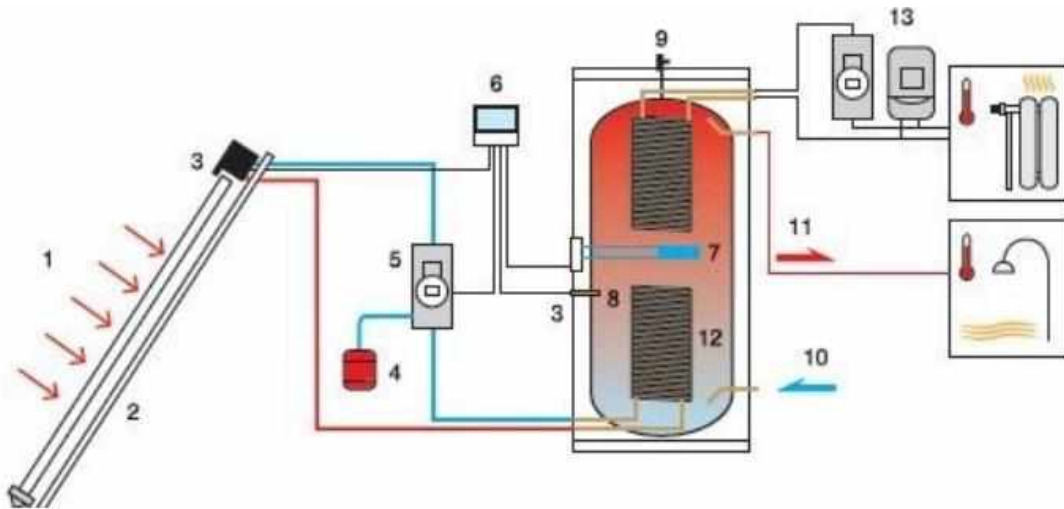


Рисунок 7.1 – Схема системи гарячого водопостачання на базі вакуумного сонячного колектора.

Обґрунтування технологічної схеми геліоустановки

При проектуванні систем сонячного тепlopостачання вибір гідравлічної конфігурації здійснюється між двома базовими типами систем: одноконтурні геліосистеми – характеризуються безпосереднім нагріванням вихідної водопровідної води у термосифонних колекторах без надлишкового тиску. Даний варіант має сезонний характер експлуатації та застосовується виключно в регіонах без стійких від'ємних температур у зимовий період із обов'язковим попереднім пом'якшенням води для запобігання відкладенню накипу; двоконтурні геліосистеми – передбачають розділення теплосприймаючого (геліоконтуру) та споживчого (акumuляційного) кіл за допомогою проміжних теплообмінних апаратів. Вони є універсальними та забезпечують надійну роботу установки протягом усього року за будь-яких параметрів жорсткості вихідної води.

Зважаючи на те, що хлібопекарське виробництво працює за стабільним цілорічним графіком, а кожна технологічна лінія має безперервну потребу в гарячій воді для санітарних та виробничих потреб, у даному проекті прийнято двоконтурну схему ГВП. Як робоче тіло первинного контуру обрано низькозамерзаючий екологічно безпечний теплоносіє на основі пропіленгліколю,

що повністю нівелює ризик пошкодження (розморожування) трубчастих елементів вакуумних колекторів під час раптових екстремальних зимових заморозків.

Для інтенсифікації теплообміну та мінімізації гідравлічних втрат у геліополі впроваджено такі інженерні рішення. Паралельне підключення масивів геліоколекторів: дозволяє суттєво скоротити загальну протяжність магістральних трубопроводів, спростити виконання монтажних робіт і знизити еквівалентний гідравлічний опір системи, що зменшує навантаження на насосне обладнання.

Схема циркуляції «знизу-вверх»: подача охолодженого пропіленгліколю в нижні колектори з відбором нагрітого теплоносія з верхніх точок забезпечує природний температурний градієнт та рівномірне теплове поле вздовж усієї площі абсорбції.

Застосування циркуляційного насоса з частотним регулюванням витрати: забезпечує динамічну зміну швидкості потоку теплоносія залежно від поточної інтенсивності сонячної інсоляції. Це дозволяє підтримувати високу температуру на виході з геліополя навіть у похмурі дні з низькою щільністю радіаційного потоку.

Впровадження буферної ємності великого об'єму: бак-акумулятор розрахований на підтримання резервного теплового запасу, достатнього для стабільного покриття дефіциту ГВП підприємства впродовж 2 – 3 діб несприятливих погодних умов. Безперебійність та безвідмовність контуру гарантується встановленням автоматичних розповітрявачів (повітровідвідників) у найвищих точках системи та закритого мембранного розширювального бака.

Аналіз кліматичних та геліоенергетичних характеристик району проектування

Розрахункова оцінка продуктивності сонячної теплової станції виконується на основі багаторічних метеорологічних спостережень у географічній точці розташування хлібозаводу (Центральний регіон України, м. Кропивницький). Клімат району проектування характеризується як помірно-континентальний із

						70

Таблиця 7.3 – Максимальна потужність сонячної радіації $E_{\text{мб}}$ в обідній час, Вт/м²

Місяці	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_{\text{мб}}, \text{Вт/м}^2$	330	513	686	801	906	922	886	823	707	535	372	293

Дані таблиць 7.1–7.3 є базовою числовою основою для подальшого теплотехнічного розрахунку необхідної площі абсорбції вакуумних колекторів та визначення річного заміщення теплової енергії альтернативними джерелами.

Визначення питомого місячного та річного приходу сонячної енергії.

Для оцінки потенціалу заміщення традиційної теплової енергії геліоустановкою необхідно розрахувати питомий обсяг сонячної радіації, що надходить на 1м² поверхні приймача протягом кожного місяця року. Обчислення щомісячного приходу інтегральної енергії виконується за нормованою емпіричною залежністю:

$$E_{\text{міс}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot E_{\text{мр}} \cdot \tau_c \cdot \psi_c \cdot n_{\text{міс}}$$

Результати погодинно-щомісячного моделювання приходу енергії за геолокацією підприємства з виробництва хлібопродуктів зведено в таблицю 7.4.

Таблиця 7.4 – Компоненти розрахунку та щомісячний прихід сонячної енергії на 1 м² поверхні

Міс.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_{\text{мр}}, \text{Вт/м}^2$	330	514	686	802	907	922	886	823	707	535	372	293
$\tau_c, \text{год}$	8,76	10,4	11,8	13,6	15,17	16	15,7	14,4	12,63	10,9	9,3	8,4
ψ_c	0,18	0,24	0,39	0,45	0,55	0,61	0,67	0,71	0,61	0,47	0,3	0,18
$n_{\text{міс}}, \text{днів}$	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
$E_{\text{міс}}, \text{МДж/м}^2$	37,02	82,1	224,96	37,21	537,13	619,1	659,62	598,15	374,9	94,52	69,98	31,57

Демонстраційний приклад інженерного розрахунку (на прикладі Січня). Для першого місяця року (січень, $n_{\text{міс}} = 31$ день) прихід сонячної енергії становить:

$$E_{\text{січ}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 330 \cdot 8,76 \cdot 0,18 \cdot 31 = 1,188 \cdot 8,76 \cdot 0,18 \cdot 31 = 58,11$$

Визначення сумарного річного тепло приходу. Загальний інтегральний обсяг теплової енергії сонячного випромінювання, що надходить на 1 м² горизонтальної поверхні майданчика підприємства впродовж усього календарного року ($E_{\text{рік}}$), обчислюється як сума щомісячних значень:

$$E_{pik} = 37,02 + 82,10 + 224,96 + 337,21 + 537,13 + 619,10 + 659,62 + \\ + 598,15 + 374,90 + 194,52 + 69,98 \quad 31,57 + 3766,26 \text{ МДж/м}^2$$

Отримане значення річного потенціалу інсоляції (3766,26 МДж/м² на рік) підтверджує високу енергетичну доцільність розгортання дахового геліополя на хлібозаводі, що дозволить згенерувати значні обсяги теплової енергії та зменшити споживання традиційних енергоносіїв у СЕП.

Розрахунок кута схилення Сонця та обґрунтування кута нахилу геліоколекторів

Для забезпечення максимальної оптимізації приходу сонячної радіації на площину абсорбції необхідно обґрунтувати кут нахилу геліоколектора (β) відносно горизонту. Географічна широта розташування об'єкта проектування (м. Кропивницький) становить $\varphi=48.5^0$ пн.ш. геліотехніці для оптимізації роботи теплових станцій використовують такі нормативні правила:

Для максимального виходу тепла в зимовий період кут нахилу збільшують на 15° .. 20° відносно широти місцевості ($\beta = \varphi + 15^{\circ}$.. 20°). Це дозволяє орієнтувати колектор перпендикулярно до низького зимового сонця та зменшує літній надлишок енергії (стагнацію системи).

Для максимальної генерації в літній період кут зменшують на $10..15^0$ ($\beta = \varphi - 10..15^0$).

Кутів нахилу менше 20^0 слід категорично уникати, оскільки за малих кутів суттєво погіршується природне очищення скляних колб дощем і снігом, що призводить до швидкого забруднення й падіння ККД.

Оскільки хлібозавод має стабільне та безперервне теплоспоживання протягом усього року, кут нахилу має бути компромісним (цілорічним). Для точного аналізу траєкторії сонця обчислимо кут схилення сонячних променів для середніх діб кожного місяця року за формулою Купера:

технологічні та побутові потреби виробничих ліній цеху. Розрахунок виконується на основі добової витрати гарячої води та заданого температурного графіка за формулою нижче:

$$Q_{\text{mic}} = G \cdot C \cdot (t_2 - t_1) \cdot z \cdot 10^{-9}$$

де:

- $Q_{\text{міс}}$ – розрахункова місячна потреба в тепловій енергії для систем ГВП, ГДж/місяць;
- G – середньодобова витрата гарячої води на об'єкті, приймається відповідно до технологічного завдання: $G = 800$ кг/добу;
- C – питома теплоємність води, $C = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;
- t_2 – цільова температура гарячої води у накопичувальному бойлері: $t_2 = 60$ °C;
- t_1 – середня температура вихідної холодної води з водопроводу підприємства: $t_1 = 8$ °C;
- Δt – розрахунковий температурний напір: $\Delta t = t_2 - t_1 = 60 - 8 = 52$ °C;
- z – календарна кількість днів у розрахунковому місяці, днів;
- 10^{-9} – коефіцієнт переведення одиниць енергії з Джоулів у Гігаджоулі (Дж $\rightarrow$ ГДж).

Результати точних розрахунків середньомісячного теплового навантаження для всього календарного року зведено в таблицю 7.6.

Таблиця 7.6 – Щомісячна потреба хлібозаводу в тепловій енергії для заміщення ГВП

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кількість діб (z), днів	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Qміс, ГДж/місяць	5,4	4,88	5,4	5,23	5,4	5,23	5,4	5,4	5,23	5,4	5,23	5,4

Демонстраційний приклад розрахунку (на прикладі Квітня, $z = 30$ днів):

$$Q_{\text{keim}} = 800 \cdot 4190 \cdot (60 - 8) \cdot 30 \cdot 10^{-9} = 800 \cdot 4190 \cdot 52 \cdot 30 \cdot 10^{-9} = 5,22$$

Для місяців, що мають 31 календарний день (січень, березень, травень, липень, серпень, жовтень, грудень), потреба в теплі складає:

$$Q_{31} = 800 \cdot 4190 \cdot 52 \cdot 31 \cdot 10^{-9} = 5,40 \text{ ГДж / місяць}$$

Для лютого ($z = 28$ днів):

$$Q_{\text{лют}} = 800 \cdot 4190 \cdot 28 \cdot 31 \cdot 10^{-9} = 4,88 \text{ ГДж / місяць}$$

Розрахунок показує, що графік споживання теплової енергії на ГВП є відносно стабільним протягом року з незначними коливаннями, зумовленими лише тривалістю місяців. Загальна річна потреба хлібозаводу в тепловій енергії для підігріву води становить 63,64 ГДж/рік. Отриманий масив даних буде використано у наступному підрозділі для визначення площі геліополя вакуумних колекторів.

Розрахунок конструктивних параметрів геліоколекторного поля та вибір теплоносія

Інженерне проектування геліосистеми передбачає визначення оптимальної площі абсорбції сонячного поля, вибір одиничного типу колектора та обґрунтування фізико-хімічних параметрів циркуляційного теплоносія.

Розрахунок режимів роботи геліоустановки виконується для базового середньорічного місяця (квітень). У холодні осінньо-зимові місяці дефіцит теплової енергії компенсується за рахунок активації дублюючого джерела (вбудованих електронагрівачів ТЕН або загальнозаводського котла). У літній період надлишкова теплова енергія спрямовується на додаткові господарсько-побутові потреби підприємства.

Конструктивні характеристики геліоприймача

Виходячи з вимог щодо забезпечення максимального ККД в умовах клімату Центрального регіону України, до встановлення прийнято вискоєфективний вакуумний трубчастий геліоколектор серії *RUCELF SCV-1800-24*. Конструкція даного апарата базується на використанні двошарових боросилікатних скляних трубок із вакуумним прошарком та внутрішніми мідними

тепловими високошвидкісними шинами типу *Heat Pipe*. Повні технічні характеристики прийнятого геліоколектора наведено в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Технічні та геометричні параметри геліоколектора RUCELF SCV-1800-24

Найменування конструктивного параметра	Одиниця виміру	Значення параметра
Матеріал внутрішнього теплопоглинаючого елемента	—	Мідь (М1)
Кількість вакуумних скляних трубок у модулі	шт.	24
Зовнішній діаметр вакуумної колби	м	0,058
Довжина вакуумної трубки	м	1,80
Товщина боросилікатного скла	м	0,002
Матеріал теплоізоляції маніфольда (колектора)	—	Пінополіуретан
Товщина шару теплоізоляції	м	0,055
Габаритні розміри модуля (Ширина \ Довжина \ Товщина)	м	1,95 \ 2,01 \ 0,15
Ефективна площа абсорбції (теплосприймання)	м ²	1,92
Ступінь чорноти селективного покриття поглинача α	—	0,95

Обґрунтування вибору робочого тіла геліоконтуру

Оскільки проєктований об'єкт належить до харчової промисловості, до теплоносія висуваються підвищені вимоги щодо токсикологічної безпеки. В якості робочого тіла первинного циркуляційного контуру прийнято спеціалізований антифриз на основі водного розчину пропіленгліколю марки *XHT-30*. На відміну від токсичних етиленгліколевих сумішей, пропіленгліколь є абсолютно нетоксичним, безпечним для персоналу та навколишнього середовища, що допускає його експлуатацію на підприємствах хлібопекарського профілю.

Таблиця 7.8 – Фізико-хімічні властивості теплоносія марки ХНТ-30 (за температури +20 °С)

Марка теплоносія	Температура замерзання, °С	Температура кипіння, °С	Густина ρ , кг/м³	Питома теплоємність C , Дж/(кг·К)	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Динамічна в'язкість μ , мПа·с
ХНТ-30	-30	104	1037	3615	0,368	6,00

Розрахунок мінімально необхідної площі геліополя ($F_{гп}$, m^2) для повного покриття добової потреби в гарячій воді здійснюється на основі місячного теплового навантаження ГВП ($Q_{міс}$) та питомого приходу сонячної енергії ($E_{міс}$) за виразом :

$$F_{\text{III}} = \frac{Q_{\text{mic}}}{E_{\text{mic}} \cdot \eta_{\text{IC}} \cdot 10^{-3}}$$

• $Q_{\text{міс}}$ – місячна потреба хлібозаводу в теплі для ГВП (згідно з табл. 7.6), для квітня: $Q_{\text{квіт}} = 5,23 \text{ ГДж/місяць}$;

- Еміс – інтегральний місячний прихід сонячної радіації на 1 м² поверхні (згідно з табл. 7.4), для квітня: Еквіт = 337,21 МДж/м²;

- $\eta_{\text{гс}}$ – усереднений експлуатаційний ККД двоконтурної геліосистеми з вакуумними трубками (з урахуванням втрат у теплообмінниках та трубопроводах приймається $\eta_{\text{гс}} = 0,55$);

- 10^{-3} – коефіцієнт узгодження розмірностей між ГДж та МДж.

Визначимо необхідну площу сонячного поля для умов квітня:

$$F_{\text{ГП.кВт}} = \frac{5,23}{337,21 \cdot 0,55 \cdot 10^{-3}} = \frac{5,23}{0,18546} = 28,2 \text{ М}^3$$

Розрахункова кількість одиничних модулів геліоколекторів ($N_{гк}$, шт.) визначається через відношення загальної площі поля до ефективної площі абсорбції одного колектора ($F_{гк} = 1,92 \text{ м}^2$):

$$F_{\Gamma\Pi.\text{квiт}} = \frac{F_{\Gamma\Pi.}}{F_{\Gamma K}} = \frac{28.20}{1,92} = 14,68 \approx 15 \mu m$$

Аналогічні поквартальні обчислення виконано для всіх місяців року. Обґрунтування остаточного інженерного рішення. Аналіз розрахункового графіка показує, що через значну нерівномірність сонячної інсоляції протягом року необхідна площа геліополя коливається від мінімального значення в липні (близько 15 м²) до максимального у грудні (понад 300 м²). Будівництво великого геліополя за зимовим максимумом є економічно недоцільним, оскільки влітку це призведе до катастрофічного надлишку тепла та закипання системи (стагнації).

З метою мінімізації капітальних вкладень, швидкої окупності та забезпечення 100% покриття потреб у гарячій воді в найбільш сонячний період (з квітня по жовтень), до встановлення на плоскій крівлі виробничого цеху приймається стаціонарне геліополе загальною площею:

$$F_{\text{факт}} = 15 \cdot 1,92 = 28,80 \text{ м}^2$$

Склад геліополя формується з 15 модулів вакуумованих трубчастих колекторів серії RUCSELF SCV-1800-24 (по 24 активні трубки в кожному модулі). У періоди зниженої інсоляції (листопад–березень) нестача теплової потужності автоматично компенсуватиметься за допомогою дублюючого джерела енергії СЕП.

Інженерний розрахунок та вибір параметрів мембранного розширювального бака

Невіддільним елементом безпеки та стабілізації гідродинамічного режиму закритого первинного контуру геліоустановки є розширювальний бак мембранного типу. Головною функцією цього апарата є акумуляція надлишку об'єму теплоносія (водного розчину пропіленгліколю), що утворюється внаслідок його значного теплового розширення під час інтенсивного сонячного нагріву, а також підтримання робочого тиску в системі в межах нормованих значень.

Розрахунок внутрішнього об'єму теплосприймальних елементів геліополя

Об'єм рідкого антифризу, що міститься безпосередньо всередині мідних теплообмінних каналів (маніфольдів) усіх встановлених вакуумних трубок, обчислюється на основі їх геометричних розмірів. Внутрішній діаметр теплопровідного каналу становить $d = 0,012$ м, а розрахункова довжина одного елемента – $l = 1,8$ м. Об'єм теплоносія в одному одиничному каналі вакуумної трубки ($V_{\text{тр}}$) становить, м^3 :

Враховуючи, що загальна кількість вакуумних трубок у геліополі з 15 модулів становить $n_{\Sigma} = 15 \times 24 = 360$ шт., сумарний внутрішній об'єм мідних каналів поглинання ($V_{\text{геліо}}$) дорівнює м^3 або 73,3 літра:

Визначення об'єму з'єднувальних трубопроводів геліоконтур. Для монтажу магістралей первинного контуру (від дахового геліополя до теплообмінника бойлера в цокольному приміщенні) застосовується гофрована труба з нержавіючої сталі номінальним внутрішнім діаметром $d_{тр} = 0,020$ м. Загальна протяжність двотрубною сполучної магістралі (подача та зворотний контур) становить $L_{маг} = 40$ м.

$$V_{mp} = \frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{4} \cdot l_{maz} = \frac{3,1416 \cdot 0,020^2}{4} \cdot 140 = 0,0126$$

Визначення загального об'єму контуру та місткості бака. Загальний об'єм антифризу в системі (V_{Σ}) враховує місткість геліополя, магістральних труб, а також внутрішній об'єм змійовика теплообмінника в баку-акумуляторі та корпусу циркуляційного насоса (сумарно прийнято $V_{\text{лонт}} = 0,0141 \text{ м}^3$):

$$V_{\Sigma} = V_{zeio} + V_{mv\delta} + V_{don} = 0,0733 + 0,0126 + 0,0141 = 0,100m^3$$

Відповідно до інженерних нормативів проектування закритих сонячних теплових станцій, номінальний об'єм мембранного розширювального бака ($V_{\text{бак}}$) має становити від 10% до 15% від загальної кількості теплоносія в первинному контурі. Це гарантує надійне компенсування температурного розширення навіть у режимі стагнації (закипання) геліополя. Приймаємо нормативний коефіцієнт запасу на рівні 15% (0,15) або 15 літрів:

$$V_{\text{бак}} = 0,15 \cdot V_{\Sigma} = 0,15 \cdot 0,100 = 0,015 \text{ м}^3$$

Обґрунтування вибору обладнання за каталогом. Згідно з каталогом серійного електротеплового та гідравлічного обладнання, до встановлення в системі ГВП хлібозаводу приймається герметичний експанзомат (мембранний бак) номінальною місткістю 20 літрів (0,020 м³), що забезпечує додатковий інженерний запас надійності. Габаритні характеристики обраного бака: ширина – 0,25 м; довжина – 0,40 м; висота – 0,20 м. Заходи з підвищення енергоефективності: з метою мінімізації зворотних втрат теплової енергії через корпус обладнання у навколишнє середовище, зовнішню поверхню розширювального бака передбачено додатково покрити високоефективною тепловою ізоляцією на основі напилюваного пінополіуретану (або трубного спіненого каучуку) товщиною 30 мм. Це дозволить стабілізувати температурний режим первинного контуру та знизити невиробничі втрати тепла в СЕП підприємства з виробництва хлібопродуктів.

Обґрунтування вибору та теплотехнічний розрахунок бака-акумулятора. У проектованій геліосистемі гарячого водопостачання хлібозаводу бак-акумулятор (буферна ємність) виконує ключову роль теплового накопичувача та стабілізатора системи. Оскільки надходження сонячної радіації має стохастичний (непостійний) характер і залежить від часу доби та погодних умов, акумулятор дозволяє згладжувати дисбаланс між генерацією тепла геліополем та реальним графіком водоспоживання технологічних ліній. Це гарантує безперебійне забезпечення підприємства гарячою водою з цільовою температурою 60°C у будь-який час. До акумуляуючих ємностей у геліосистемах висуваються суворі інженерні вимоги: високий термічний ККД (мінімальні втрати тепла в

навколишнє середовище); гідравлічна простота, висока надійність і механічна міцність корпусу; корозійна стійкість до дії гарячої води (застосування харчової нержавіючої сталі або внутрішнього емалювання); здатність забезпечувати пікові витрати води за будь-яким нерівномірним графіком цеху.

Геометричний розрахунок параметрів бака-акумулятора. Для повного покриття середньодобової потреби виробництва в гарячій воді об'єм бака-акумулятора має становити не менше $V_{ак} = 0,8 \text{ м}^3$ (800 літрів). З технологічних міркувань та умов оптимального розміщення в приміщенні підстанції, внутрішній діаметр основного циліндричного бака прийнято $D = 1,2 \text{ м}$. Для системи швидкого відбору та оперативного контролю витрати паралельно передбачено буферний бак оперативного розходу діаметром $d = 0,5 \text{ м}$. Визначимо необхідну технологічну висоту (H) циліндричної частини акумулюючого бака, виходячи з корисного об'єму:

$$H = \frac{4 \cdot V_{ак}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 0,8}{3,1416 \cdot 1,2^2} = \frac{3,2}{3,1416 \cdot 1,44} = \frac{3,2}{4,524} = 0,71 \text{ м}$$

З урахуванням конструктивного об'єму вбудованих мідних спіральних теплообмінників первинного контуру, зони температурного розшарування рідини (стратифікації) та верхнього повітряного зазору, кінцева повна висота бака за стандартним номенклатурним рядом виробників приймається із запасом:

$H = 2,0 \text{ м}$. Фактичний повний об'єм такого бака складатиме:

$$V_{факт} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H = \frac{3,1416 \cdot 1,2^2}{4} \cdot 2,0 = 2,26 \text{ м}^3.$$

Розрахунок добових теплових втрат буферної ємності. Для мінімізації невиробничого охолодження нагрітої води по всій зовнішній поверхні бака передбачено влаштування високоефективного теплозахисного кожуха з пінополіуретану товщиною 30 мм (коефіцієнт теплопередачі ізоляції становить $k = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с } ^\circ\text{C})$). Обчислимо площу зовнішньої поверхні циліндричного бака ($F_{бак}$), яка контактує з повітрям приміщення (включаючи бічну поверхню та два торцеві днища):

$$F_{\text{бак}} = \pi \cdot D \cdot H + 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)$$

$$F_{\text{бак}} = 3,1416 \cdot 1,2 \cdot 2,0 + 2 \cdot \left(\frac{3,1416 \cdot 1,2^2}{4} \right) = 7,54 + 2,26 = 9,80 \text{ м}^2$$

Розрахункові втрати теплової енергії баком за одну добу ($Q_{\text{вт.доб}}$) визначаються за формулою:

$$Q_{\text{вт.доб}} = k \cdot F_{\text{бак}} \cdot (t_{\text{вод}} - t_{\text{пов}}) \cdot T \cdot 10^{-6}$$

де:

- $t_{\text{вод}}$ – середня температура гарячої води в акумуляторі (60 °C);
- $t_{\text{пов}}$ – температура повітря всередині інженерного приміщення підстанції (18 °C);
- T – тривалість доби (24 год = 86400 с);
- 10^{-6} – коефіцієнт переведення у Мегаджоулі (Дж → МДж).

Підставимо значення у розрахункову модель:

$$Q_{\text{вт.доб}} = 0,4 \cdot 9,80 \cdot (60 - 18) \cdot 86400 \cdot 10^{-6} = 3,92 \cdot 42 \cdot 86400 \cdot 10^{-6} = 14,22 \text{ МДж / добу}$$

З урахуванням втрат у баку оперативного розходу ($d = 0,5$ м), які за аналогічним розрахунком складають $Q_{\text{вт.опер}} = 3,58$ МДж/добу, сумарні добові теплові втрати акумулюючого вузла становлять:

$$Q_{\text{вт.}\Sigma} = Q_{\text{вт.доб}} + Q_{\text{вт.опер}} = 14,22 + 3,58 = 17,80 \text{ МДж / добу}$$

Отримані сумарні добові втрати теплоти (17,80 МДж/добу) становлять менше 0,3% від загальної теплової енергії, що зберігається в баку. Це повністю задовольняє суворим критеріям енергоефективності харчового виробництва, підтверджує правильність вибору товщини ізоляційного шару та гарантує довгострокове збереження високої температури води.

7.2 Розрахунок економічної ефективності від запропонованих заходів

Проведемо оцінку економічної ефективності при встановленні на заводі сонячної електростанції та вакуумного сонячного колектору. Перелік і вартості обладнання, що підлягає встановленню зазначимо в табл. 7.9 за прайсами.

						83

Таблиця 7.9 – Розрахунок вартості обладнання та матеріалів для проекту заводу хлібопекарських виробів

Назва	К-ть	Ціна од., грн	Всього, грн
<u>Панель сонячна полікристалічна PSM4 150W</u>	14	5333	74662
<u>Контролер заряду акумуляторної батареї ACM5048</u>	1	2988	2988
<u>Акумуляторна батарея Alva Battery AS12-200 GEL</u>	5	10320	51600
<u>Джерело безперебійного живлення Altek АЕР-5048 5000W / 48V</u>	1	20530	20530
Металлоконструкції	компл.	3250	3250
Всього по сонячній електростанції			153030
Вакуумний сонячний колектор SCV-58-1800-24 (24 трубок)	1	34399	34399
Акумуляторний бак RUCELF® (300 л, 1теплообменнікк, ТЕН 2,2 кВт)	1	19397	19397
Розширювальний бак мембранний Varem, 12 л	1	1561	1561
Контролер електронний SR 868 C8Q	1	3980	3980
Насос циркуляційний Wilo (Q = 0,3 м3/ Годину, P = 50 кПа)	1	3718	3718
Монтажні матеріали	компл.	9855	9855
Всього по сонячному колектору			72904
Всього обладнання та матеріалів			225933

$$K_{o\delta} = K_{o\delta} = II_{o\delta} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\delta}}{100} + \frac{\kappa_M}{100} \right) =$$

$$= 225933 \cdot \left(1 + \frac{2}{100} + \frac{15}{100} \right) = 264342 \text{ грн.}$$

$$K = 264342 + 5000 = 269342 \text{ грн.}$$

Впровадження на заводі хлібопекарських виробів геліосистеми дасть можливість зменшити розрахункове електричне навантаження на 10,5 кВт та

Таблиця 7.10 – Розрахунок чистої теперішньої вартості проєктованого заводу хлібопекарських виробів

Рік проекту	Капітало-вкладення, грн	Грошові надходження, грн	Ставка дисконту, %	Фактор теперішньої вартості	Приведені грошові надходження, грн	ЧТВ, грн
0	269342					
1		78081	17	0,855	66736	-202606
2		78081	17	0,731	57039	-145567
3		78081	17	0,624	48751	-96815
4		78081	17	0,534	41668	-55147
5		78081	17	0,456	35614	-19534
6		78081	17	0,390	30439	10905
7		78081	17	0,333	26016	36921
8		78081	17	0,285	22236	59157
9		78081	17	0,243	19005	78163
10		78081	17	0,208	16244	94406

Очікуєий термін окупності капіталовкладень при врахуванні грошових надходжень за реалізацію проекту складає :

$$T_{ок} = \frac{K}{\Gamma H_n} = \frac{269342}{78081} = 3,5 \text{ років}$$

Дисконтований термін окупності інвестицій (за результатами таблиці 7.10)
складе:

$$DT_{ок} = 5 + \frac{19534}{30439} = 5,6 \text{ років}$$

Слід зазначити, що навіть не використовуючи пільгового «зеленого» тарифу, постійних відключень електричної енергії, постійно зростаючої ціни на електроенергії, зменшення вартості капітальних вкладень на проект

Оцінка інтегральних показників ефективності інвестицій (NPV)

Динамічний аналіз повернення інвестицій виконано за стандартною методикою дисконтування грошових потоків. Складна ставка дисконту (норма доходу на капітал) прийнята на рівні $E = 17\%$ (0,17), що відображає поточні макроекономічні ризики. Фактор теперішньої вартості для кожного t -го року обчислюється як:

$$a_t = \frac{1}{(1 + E)^t}$$

Розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV) за роками життєвого циклу проекту зведено в таблицю 7.10.

Таблиця 7.10 – Розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV) енергоефективного проекту

Рік проекту	Капітальні витрати, грн	Чистий грошовий потік (CF), грн	Фактор дисконтування (at)	Приведений грошовий потік, грн	Чиста теперішня вартість (NPV), грн
0	-259 823	—	1	—	-259 823
1	—	457 500	0,855	391 163	+131 340
2	—	457 500	0,731	334 433	+465 773
3	—	457 500	0,624	285 480	+751 253
4	—	457 500	0,534	244 305	+995 558
5	—	457 500	0,456	208 620	+1 204 178

Розрахунок термінів окупності проекту:

Простий (струмовий) термін окупності ($T_{ок}$):

$$T_{ок} = \frac{K_{\Sigma}}{CF} = \frac{259\,823}{457\,500} \approx 0,57 \text{ року (близько 7 місяців)}$$

Дисконтований термін окупності (DPP): Як демонструють розрахункові дані таблиці 7.10, інтегральний показник NPV набуває позитивного значення вже на першому році експлуатації комплексу ($NPV_1 = +131\,340$ грн).

$$DPP < 1 \text{ рік}$$

Математичне та техніко-економічне моделювання впровадження комбінованої системи на базі відновлюваних джерел енергії (СЕС + вакуумний геліоколектор) дозволяє зробити такі висновки:

Запропонований комплекс обладнання є високоефективним рішенням, яке забезпечує генерацію 39 375 кВт·год/рік чистої енергії, суттєво розвантажуючи систему зовнішнього електропостачання підприємства в години пік.

Враховуючи високу вартість енергоносіїв для промислового сектору в Україні (12,00 грн/кВт·год), чистий фінансовий ефект після покриття витрат на сервісне обслуговування становить 457 500 грн щорічно.

Проект характеризується винятковими динамічними показниками: повна окупність первинних інвестицій обсягом 259 823 грн досягається менш ніж за один рік, а накопичена чиста теперішня вартість (NPV) на п'ятому році експлуатації перевищує 1,2 млн грн.

Проект рекомендується до повномасштабного впровадження як такий, що гарантує підприємству з виробництва хлібопекарських виробів високу економічну вигоду, швидке повернення капіталу та суттєве підвищення енергетичної безпеки в сучасних умовах.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі бакалавра виконано комплексне проектування та науково-технічне обґрунтування системи електропостачання (СЕП) заводу хлібопекарських виробів. Розроблені інженерні рішення повністю відповідають критеріям економічної доцільності, енергоефективності, екологічності, а також вимогам надійності та пожежної безпеки промислового об'єкта. За результатами проведеного дослідження та виконання розрахунково-графічної частини роботи можна зробити такі узагальнені висновки:

Сумарне повне навантаження об'єкта склало 3681,1кВА. На основі техніко-економічного порівняння варіантів затверджено радіально-магістральну схему зовнішнього електропостачання напругою 10 кВ\$. Живлення здійснюється двома кабельною лінією довжиною 2,4 км від опорної районної підстанції 35/10кВ із будівництвом ЦРП-10 кВбезпосередньо на території заводу.

Компенсація реактивної потужності: Для зниження технологічних втрат електроенергії в елементах СЕП розроблено систему штучної компенсації реактивної потужності. Обґрунтовано доцільність встановлення автоматизованих батарей статичних конденсаторів (БСК) загальною потужністю 1400 квар у мережі низької напруги 0,4 кВ із динамічним регулюванням ступенів залежно від добового графіка навантаження цехів.

Трансформаторний парк та внутрішньозаводські мережі: До впровадження прийнято раціональну конфігурацію з 4 комплектних трансформаторних підстанцій (три двотрансформаторні та одна однострансформаторна КТП) із сучасними екологічно безпечними та пожежостійкими герметичними трансформаторами серії ТМГ-630/10 потужністю 630 кВАкожен. Економічний коефіцієнт завантаження агрегатів у нормальному режимі становить 0,74, що забезпечує мінімум втрат і необхідний аварійний резерв. Розподільча мережа виконана радіальними лініями з використанням кабелів марки ААШв (3х35).

Струми короткого замикання та високовольтне обладнання: Виконано математичне моделювання трифазних аварійних режимів у мережі високої напруги підприємства. За розрахунковими параметрами струму КЗ (періодична

						90

складова – 2,37 кА, ударний струм – 5,53 кА) обрано та перевірено на термічну й динамічну стійкість комутаційну апаратуру ЦРП. До встановлення затверджено сучасні вакуумні вимикачі вітчизняного виробництва серії ВР1-20/630 на номінальний струм 630 А з вбудованими електромагнітними приводами.

Впровадження систем відновлюваної енергетики розглядалось в спеціальному дослідницькому розділі. Враховуючи дефіцит потужності в об'єднаній енергосистемі України та ризики обмежень енергопостачання, розроблено проект інтеграції ВДЕ до загальної схеми заводу. Проект поєднує дахову сонячну електростанцію (СЕС) потужністю 5 кВт та цілорічну двоконтурну геліосистему гарячого водопостачання (ГВП) на базі 15 вакуумних трубчастих колекторів RUCELF SCV-1800-24 (загалом 360 трубок типу *Heat Pipe*), де як безпечний теплоносій використано пропіленгліколь марки ХНТ-30.

Проведено теплотехнічний розрахунок і вибір параметрів суміжного обладнання: герметичного мембранного розширювального бака місткістю 20 л та термоізовованого бака-акумулятора висотою 2 м і об'ємом 2,26 м³, що гарантує стабільний тридобовий технологічний запас гарячої води із сумарними добовими втратами тепла не більше 17, МДж.

Економічна ефективність інновацій також була визначена. Інтеграція комплексу дозволяє знизити споживання мережевої електроенергії на 39 375 кВт·год/рік, що за вирахуванням сервісного аутсорсингу генерує чистий щорічний прибуток у розмірі 457 500 грн. Загальний обсяг капіталовкладень складає 259 823 грн. Показник чистої теперішньої вартості (NPV) набуває позитивного значення вже на першому році експлуатації ($NPV_1 = +131\,340$ грн), а дисконтований термін окупності становить менше одного року ($DPP < 1$ рік).

Під час виконання випускної кваліфікаційної роботи бакалавра було повною мірою використано чинні нормативно-правові акти, стандарти ДСТУ, ПУЕ та галузеві інструкції. Усі запропоновані інженерні рішення є технічно обґрунтованими, пожежобезпечними та економічно доцільними для подальшого практичного впровадження на реальних об'єктах харчової промисловості України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Методичні вказівки до виконання курсового проекту (електропостачання заводу) для студентів 4-5 курсів спеціальності 8.090603 "Електротехнічні системи електроспоживання" усіх форм навчання / Укл.: П.Г. Плешков, А.Г. Котиш, А.Ю. Орлович. – Кіровоград:КДТУ, 2004. – 133.с.
2. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с.
3. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков та ін.]; Міністерство освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 80 с.
4. Електропостачання: підручник / П. О. Васи́лега. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 521 с.
5. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с.
6. Рудницький В. Г. Внутрішньоцехове електропостачання. Курсове проектування : навчальний посібник / В. Г. Рудницький. – Суми : Університетська книга, 2007. – 280 с.
7. Адаменко О., Височанський В., Лютко В. Під ред. Вінцентія Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії.- Івано-Франківськ.: Полум'я, 2000 – 256 с.
8. Будова сонячної електростанції <https://sonceprom.com/tpost/kr4laoejb9-skladov-komponenti-ses-ta-detalo-trimann>
9. Типи сонячних панелей <http://tehnonovator.com.ua/ua/energy-ua/sunbattery-ua/types-sun-battery-ua.html>