

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Розроблення системи електропостачання
заводу фармацевтичних речовин»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–22

ОПП «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Євгеній СОКУРЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук,

_____ Катерина ПЕТРОВА

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

« » 2026 р.

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

Сокурєнка Євгенія Геннадійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи електропостачання заводу
фармацевтичних речовин

Development of the power supply system of the pharmaceutical substances plant

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 29.05.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є створення оптимізованої
схеми електропостачання фармацевтичного заводу та впровадженні спеціальних
заходів резервування

Завдання: 1. Електричні навантаження в системі електропостачання. 2.
Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної
розподільної установки (головної знижувальної підстанції). 3. Техніко-економічне
обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання
підприємства. 4. Компенсація реактивної потужності 5. Трансформаторні
підстанції 6. Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання
електроустановок та силових мереж системи електропостачання. 7. Спеціальний
розділ. Висновки. Перелік посилань

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів валіфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Електричні навантаження в системі електропостачання</i>	<i>16.04.26</i>	
2	<i>Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки (головної знижувальної підстанції)</i>	<i>20.04.26</i>	
3	<i>Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства</i>	<i>27.04.26</i>	
4	<i>Компенсація реактивної потужності</i>	<i>04.05.26</i>	
5	<i>Трансформаторні підстанції</i>	<i>10.05.26</i>	
6	<i>Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання</i>	<i>15.05.26</i>	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>18.05.26</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.05.26</i>	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>28.05.26</i>	

Дата видачі завдання

«13» квітня 2026 р.

Підпис керівника _____

Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання

«13» квітня 2026 р.

Підпис здобувача _____

Євгеній СОКУРЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 73 с.; 12 рис.; 28 табл.; 14 джерел.

Сокурєнко Є.Г. Розроблення системи електропостачання заводу фармацевтичних речовин. – Рукопис.

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

Метою роботи є проєктування енергоефективної системи електропостачання підприємства фармацевтичної галузі з мінімізацією технологічних втрат в елементах мережі та впровадженням комплексних заходів щодо забезпечення безперебійного живлення критично важливих споживачів.

У роботі обґрунтовано вибір схеми зовнішнього електропостачання напругою. Проведено детальні розрахунки електричних навантажень, обрано оптимальні пристрої компенсації реактивної потужності та сучасне комутаційне обладнання з мікропроцесорним захистом. У спеціальному розділі спроектовано схему автоматичного введення резерву, виконано розрахунок та вибір автономної дизельної електростанції та промислових джерел безперебійного живлення з нульовим часом перемикавання. Також проведено розрахунки LED-освітлення та промислової вентиляції приміщення резервного джерела, визначено вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Результати роботи доцільно використовувати під час проєктування та реконструкції об'єктів критичної інфраструктури фармацевтичної промисловості.

Ключові слова: надійність, джерело безперебійного живлення (ДБЖ), автоматичне введення резерву (АВР), система електропостачання

ABSTRACT

Qualification work: 73 p.; 12 fig.; 28 tables; 14 sources.

Sokurenko Ye.H. Development of the power supply system of the pharmaceutical substances plant. – Manuscript.

Bachelor's thesis on speciality 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The objective of this thesis is to design a modern, energy-efficient power supply system for a pharmaceutical enterprise, focusing on minimizing technical losses within network elements and implementing comprehensive measures to ensure the uninterruptible power supply of critical loads.

The study justifies the selection of the external power supply configuration and voltage level. Detailed electrical load calculations were performed, and optimal reactive power compensation devices along with modern switchgear featuring microprocessor-based protection were selected. A dedicated section is devoted to the design of an automatic transfer switch (ATS) scheme, as well as the calculation and selection of an autonomous diesel generator set and industrial uninterruptible power supplies (UPS) with zero transfer time. Furthermore, calculations for LED lighting and industrial ventilation for the backup power source room were conducted, and qualification requirements for operating personnel were defined.

The results of this work are applicable to the design and reconstruction of critical infrastructure facilities within the pharmaceutical industry.

Key words: reliability, uninterruptible power supply (UPS), automatic transfer switch (ATS), power supply system

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1. Електричні навантаження в системі електропостачання.....	12
1.1. Визначення силових електронавантажень у мережах до 1000 В	12
1.2. Визначення освітлювальних електронавантажень	15
1.3. Визначення електронавантажень у силових мережах вище 1000 В	18
1.4. Графіки електричних навантажень.....	23
2. Картограма електричних навантажень та місце розташування головної знижувальної підстанції (ГЗП)	27
3. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства	30
3.1. Схема приєднання та вибір напруги живлення.....	30
3.2. Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання	34
4. Компенсація реактивної потужності.....	36
4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації.....	36
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності	36
5. Трансформаторні підстанції	43
5.1. Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій	43
5.2. Компоновка та місце розташування трансформаторних підстанцій	44
6. Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електро- установок та силових мереж системи електропостачання	46

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Є.Сокурєнко				Розроблення системи електропостачання заводу фармацевтичних речовин	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	К. Петрова							
Н.контр.	К. Петрова				Development of the power supply system of the pharmaceutical substances plant	ЦНТУ гр. ЕЕ-22		
Затв.	П. Плєшков							

6.1. Розрахунок струмів КЗ.....	46
6.2. Вибір струмопровідних пристроїв силових мереж.....	48
6.3. Вибір електрообладнання.....	51
7. Заходи із забезпечення безперебійного електропостачання критичної інфраструктури фармацевтичного підприємства	58
7.1. Обґрунтування вимог до надійності СЕП в умовах фармацевтичного виробництва	58
7.2. Проектування мікропроцесорної системи автоматичного вводу резерву (АВР) напругою 0,4 кВ	59
7.3. Розрахунок параметрів та вибір автономної дизельної електростанції (ДЕС).....	60
7.4. Впровадження систем безперебійного живлення для надкритичних споживачів.....	62
7.5. Загальний алгоритм взаємодії систем резервування при аварії	64
7.6. Проектування системи штучного освітлення приміщення дизельної електростанції.....	66
7.7. Розрахунок промислової вентиляції генераторного приміщення.....	67
7.8. Нормативні вимоги до оперативного персоналу з обслуговування автономних джерел.....	68
ВИСНОВКИ	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АВР	— автоматичне ввімкнення резерву
АФІ	— активний фармацевтичний інгредієнт
ВП	— власні потреби
ГЗП	— головна знижувальна підстанція
ГРЩ	— головний розподільний щит
ДБЖ	— джерело безперебійного живлення
КЗ	— коротке замикання
КРП	— комплектний розподільний пристрій
НН	— низька напруга
ПУЕ	— Правила улаштування електроустановок
РЗА	— релейний захист та автоматика
РПН	— регулювання напруги під навантаженням
СЕП	— система електропостачання
ТВП	— трансформатор власних потреб

						Арк.

ВСТУП

Робота присвячена розробці раціональної та енергоефективної системи електропостачання сучасного заводу з виробництва фармацевтичних речовин. У процесі виконання проєкту здійснено аналіз та вибір оптимальних схем живлення, проведено детальний розрахунок електричних навантажень (як силових, так і освітлювальних), обґрунтовано вибір та розміщення установок компенсації реактивної потужності. Також виконано розрахунок струмів короткого замикання для перевірки надійності обраного високовольтного та низьковольтного комутаційного обладнання. Окрему увагу приділено питанням безперебійності живлення технологічних ліній: у спеціальному підрозділі запропоновано ефективні технічні рішення для підвищення надійності електропостачання споживачів першої категорії (зокрема, за рахунок інтеграції додаткового автономного резервного джерела живлення).

Опис технологічного процесу промислового об'єкту

Технологічний цикл заводу з виготовлення фармацевтичних препаратів є складним багатоступеневим процесом, який вимагає суворого дотримання санітарних норм та міжнародних стандартів якості (GMP). До основних етапів виробництва належать:

1. Підготовка сировини та водопідготовка (етап охоплює приймання, вхідний контроль, зважування та попередню підготовку активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) і допоміжних речовин; критично важливим процесом для галузі є глибоке очищення води (отримання води очищеної та води для ін'єкцій), що використовується для приготування розчинів та миття обладнання).

2. Синтез та приготування лікарських мас (на цій стадії у спеціальних реакторах, змішувачах та грануляторах відбувається хімічна взаємодія або точне механічне змішування компонентів; залежно від типу продукції (тверді, м'які чи

						Арк.

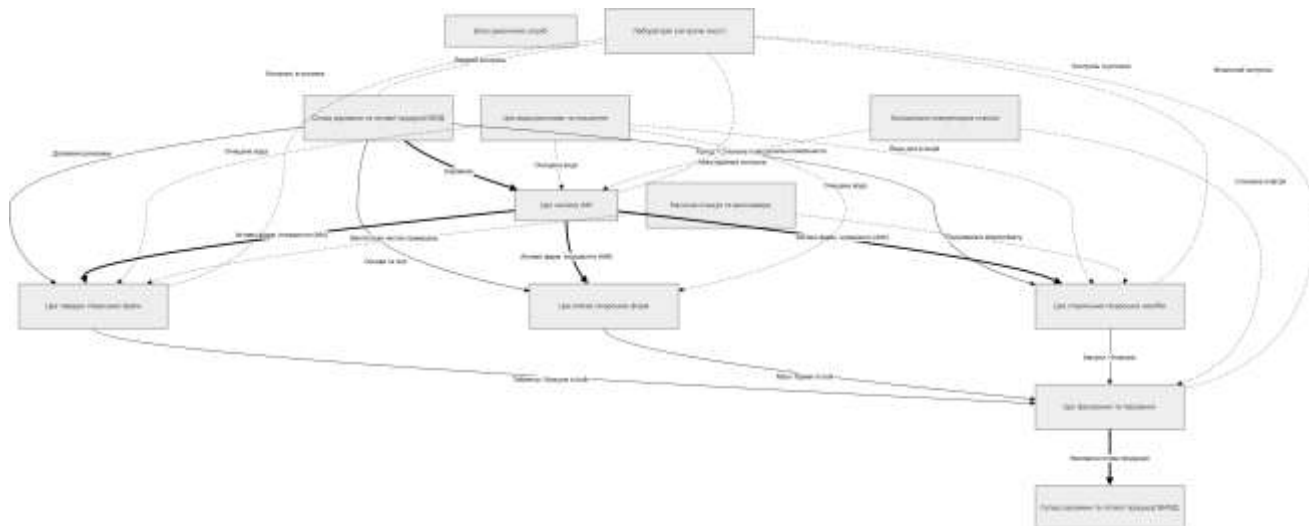


Рис.1. Схема технологічного процесу

рідкі форми), процеси можуть включати гранулювання, сушіння, гомогенізацію або термічне оброблення).

3. Формування та фасування (готові фармацевтичні маси перетворюються на кінцеві лікарські форми: таблетування, капсулювання, фасування мазей у туби або розлив стерильних розчинів в ампули чи флакони. Цей етап відбувається в умовах «чистих приміщень» з жорстко контрольованим мікрокліматом, тиском та фільтрацією повітря).

4. Пакування та маркування (продукція проходить етапи первинного (блістери, ампули) та вторинного (картонні пачки) пакування; обов'язковим є нанесення серійного номера, терміну придатності та спеціального маркування для забезпечення простежуваності кожної випущеної партії ліків).

5. Контроль якості (лабораторний супровід здійснюється на всіх етапах — від перевірки вхідної сировини до фінального тестування готових препаратів; використовуються високоточні аналітичні методи (високоєфективна рідинна хроматографія, спектроскопія, мікробіологічний скринінг) для гарантування повної безпеки та ефективності продукції).

До складу виробничої інфраструктури сучасного фармацевтичного підприємства входять такі основні цехи та допоміжні підрозділи: цех синтезу АФІ, цех водопідготовки та очищення, цех твердих лікарських форм, цех

стерильних лікарських засобів, цех м'яких лікарських форм, цех фасування та пакування, лабораторія контролю якості, холодильно-компресорна станція, насосна станція та венткамера, склад первинної сировини та готової продукції (ССГП), адміністративно-побутовий корпус, а також блок ремонтних служб.

Метою кваліфікаційної роботи є проектування енергоефективної системи електропостачання промислового об'єкта з виробництва фармацевтичних речовин, що забезпечить мінімізацію втрат електроенергії в мережах та гарантуватиме безперебійне живлення критично важливого технологічного обладнання.

Результати роботи можна використовувати при виконанні проєктів нових або реконструкції діючих систем електропостачання об'єктів фармацевтичної і біотехнологічної промисловості. Крім того, запропоновані рішення можуть бути застосовані для підвищення рівня надійності будь-яких промислових об'єктів наявністю відповідальних електроприймачів та/або безперервним циклом роботи.

						Арк.

1. ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Визначення силових електронавантажень у мережах до 1000 В

Оцінка очікуваних енергетичних витрат проєктованого фармацевтичного підприємства реалізована із застосуванням імовірнісного методу коефіцієнта максимуму (впорядкованих діаграм). Цей підхід дозволяє найбільш точно врахувати нерівномірність роботи обладнання протягом зміни.

Як приклад, наведемо детальну процедуру обчислення для найбільш енергоємного підрозділу — Цеху синтезу активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ). Згідно з вихідними даними (див. табл. 1.1), для даного цеху маємо наступні показники:

Крок 1. Визначення середньозмінних навантажень. Середня активна потужність за найбільш завантажену зміну обчислюється на основі сумарної встановленої потужності та коефіцієнта використання:

$$P_{cm} = \sum P_H \cdot K_B = 638,5 \cdot 0,65 = 415,03 \text{ кВт}$$

Середня реактивна потужність визначається через коефіцієнт реактивної потужності:

$$Q_{cm} = P_{cm} \cdot \operatorname{tg} \phi = 415,03 \cdot 0,541 \approx 224,85 \text{ кВар.}$$

Крок 2. Обчислення ефективної кількості електроприймачів. Для врахування впливу найбільш потужних агрегатів на пікове споживання, визначаємо ефективне число приймачів n_E :

$$n_e = \frac{2 \cdot \sum P_H}{P_{max}} = \frac{2 \cdot 638,5}{71} = 17,98.$$

Отримане значення округлюємо до найближчого цілого, приймаємо $n_E = 18$.

Крок 3. Визначення розрахункових (максимальних) навантажень. Виходячи з розрахованого $n_E = 18$ та заданого $K_B = 0,65$, за довідковими матеріалами встановлюємо коефіцієнт максимуму $K_M = 1,17$.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Максимальна (розрахункова) активна потужність складе:

$$P_p = P_{cm} \cdot K_M = 415,03 \cdot 1,17 = 485,59 \text{ кВт.}$$

Оскільки ефективна кількість приймачів перевищує 10 ($n_E > 10$), розрахункова реактивна потужність приймається рівною середньозмінній:

$$Q_p = Q_{cm} = 224,85 \text{ кВар.}$$

Повна розрахункова потужність цеху обчислюється геометричним додаванням активної та реактивної складових:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{485,59^2 + 224,85^2} = 535,12 \text{ кВА.}$$

Аналогічний розрахунок здійснено для всіх інших технологічних та допоміжних підрозділів підприємства. Зведені результати обчислень представлені у таблиці 1.1.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1. Розрахунок електричних навантажень в мережі до 1000 В

Підрозділ промислового об'єкта	n	Р одного		P_{Σ}	K_B	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	Середнє		n_E	K_M	Розрахункове навантаження		
		min	max					P_{CM} , кВт	Q_{CM} , квар			P_P , кВт	Q_P , квар	S_P , кВА
Цех синтезу активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ)	33	0,5	- 71	639	0,65	0,88	0,54	415,03	224,85	18	1,17	485,59	224,85	535,12
Адміністративно- побутовий корпус	36	0,2	- 8,0	104	0,6	0,83	0,66	62,29	41,1	30	1,1	68,52	41,1	79,9
Цех водопідготовки та очищення	28	0,5	- 30	223	0,55	0,77	0,83	122,62	101,74	15	1,25	153,28	101,74	183,97
ССГП	18	0,2	- 18	55,7	0,39	0,7	0,93	21,5	20,01	6	1,68	36,1	22,01	42,25
Блок ремонтних служб	25	0,4	- 25	75,3	0,35	0,72	0,96	26,35	25,39	6	1,65	43,47	25,39	50,34
Цех твердих лікарських форм	35	0,5	- 33	198	0,6	0,74	0,9	118,55	106,09	12	1,3	154,11	106,09	187,09
Холодильно-компресорна станція	20	1,0	- 16	77,8	0,55	0,74	0,9	42,78	38,37	10	1,35	57,75	38,37	69,34
Лабораторія контролю якості	32	0,2	- 16	140	0,65	0,7	0,9	90,81	84,56	17	1,15	104,43	84,56	134,37
Цех фасування та пакування	48	0,5	- 16	366	0,7	0,73	0,92	256,49	236,03	46	1,05	269,31	236,03	358,11
Цех стерильних лікарських засобів	30	0,4	- 24	83,1	0,45	0,77	0,83	37,39	31,19	7	1,55	57,96	31,19	65,82
Насосна станція та венткамера	40	1,1	- 14	271	0,8	0,8	0,74	216,66	160,95	39	1,05	227,49	160,95	278,68
Цех м'яких лікарських форм	45	1,1	- 18	230	0,65	0,78	0,8	149,5	119,9	26	1,1	164,45	119,9	203,52
Всього на стороні 0,4 кВ	390	0,2	- 71	2462	0,63	0,794	0,77	1560	1190	69	1,08	1690,1	1190,2	2067,14

1.2. Визначення освітлювальних електронавантажень

Визначення потужності, необхідної для живлення систем штучного освітлення на об'єкті, виконано із використанням методу питомої потужності. Цей підхід дозволяє врахувати призначення приміщень та їх геометричні параметри. Детальний алгоритм обчислень продемонструємо на прикладі найважливішого технологічного вузла — цеху синтезу активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ).

Вихідні архітектурно-технічні параметри приміщення:

- загальна площа приміщення $F = 1650 \text{ м}^2$;
- нормативне значення питомої потужності освітлення $p_0 = 18 \text{ Вт/м}^2$.

Крок 1. Визначення встановленої потужності Встановлена (номінальна) активна потужність системи освітлення цеху (P_y) обчислюється як добуток площі на питому потужність:

Крок 1. Визначення встановленої потужності Встановлена (номінальна) активна потужність системи освітлення цеху (P_y) обчислюється як добуток площі на питому потужність:

$$P_y = p_0 \cdot F \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 1650 \cdot 10^{-3} = 29,7 \text{ кВт.}$$

Крок 2. Розрахунок активного навантаження Для переходу від встановленої потужності до розрахункової (P_p) враховуються два додаткові фактори: коефіцієнт попиту на освітлення ($K_c = 0,8$) та коефіцієнт, що враховує втрати потужності в пускорегулювальній апаратурі світильників ($K_1 = 1,2$):

$$P_p = P_y \cdot K_c \cdot K_1 = 29,7 \cdot 0,8 \cdot 1,2 \approx 28,5 \text{ кВт.}$$

Крок 3. Визначення реактивного та повного навантаження Виходячи з типу застосованих джерел світла, середній коефіцієнт потужності становить $\cos \varphi = 0,9$. Відповідне значення тангенса кута зсуву фаз дорівнює $\text{tg} \varphi \approx 0,4843$. Розрахункова реактивна потужність освітлювальної установки (Q_p) становить:

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 28,5 \cdot 0,484 \approx 13,8 \text{ квар.}$$

Повна розрахункова потужність системи освітлення (S_p) знаходиться шляхом геометричного додавання активної та реактивної складових векторів:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{28,5^2 + 13,8^2} \approx 31,7 \text{ кВА}$$

Використовуючи наведену математичну модель, було здійснено розрахунки освітлювальних навантажень для всіх інших виробничих, адміністративних підрозділів, а також для системи зовнішнього освітлення території фармацевтичного підприємства. Підсумкові результати зведено до Таблиці 1.2.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2. Підсумкові результати визначення освітлювальних навантажень підрозділів об'єкту

№	Найменування об'єкту	F , м ²	ρ_0 , Вт/м ²	P_B , кВт	K_C	K_1	$\cos \varphi$	$tg \varphi$	P_P , кВт	Q_P , кВар	S_P , кВА
1	Цех синтезу активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ)	1650	18	29,70	0,8	1,2	0,9	0,48	28,5	13,8	31,7
2	Адміністративно-побутовий корпус	2050	20	41,00	0,8	1,2	0,9	0,48	39,4	19,1	43,7
3	Цех водопідготовки та очищення	750	14	10,50	0,8	1,12	0,5	1,73	9,4	16,3	18,8
4	ССГП	3100	6	18,60	0,6	1	1	0,00	11,2	0,0	11,2
5	Блок ремонтних служб	1150	16	18,40	0,9	1,1	0,5	1,73	19,6	33,9	39,2
6	Цех твердих лікарських форм	1600	18	28,80	0,8	1,2	0,9	0,48	27,6	13,4	30,7
7	Холодильно-компресорна станція	480	8	3,84	0,85	1,2	0,9	0,48	3,9	1,9	4,4
8	Лабораторія контролю якості	350	22	7,70	0,9	1,2	0,9	0,48	8,3	4,0	9,2
9	Цех фасування та пакування	2100	16	33,60	0,85	1,2	0,9	0,48	34,3	16,6	38,1
10	Цех стерильних лікарських засобів	880	20	17,60	0,95	1,2	0,9	0,48	20,1	9,7	22,3
11	Насосна станція та венткамера	720	12	8,64	0,8	1,12	0,5	1,73	7,7	13,4	15,5
12	Цех м'яких лікарських форм	640	18	11,52	0,95	1,2	0,9	0,48	13,1	6,4	14,6
13	Освітлення території фармацевтичного заводу	145000	0,2	29	0,6	1,12	0,5	1,73	19,5	28,1	34,2
	Всього			259					242,6	176,6	313,52

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.3. Визначення електронавантажень у силових мережах вище 1000 В

Для розрахунку навантаження на стороні високої напруги (живлення трансформаторних підстанцій) необхідно врахувати втрати активної та реактивної потужності в силових трансформаторах.

Продемонструємо розрахунок на прикладі двотрансформаторної підстанції ТП №1. Для забезпечення надійності електропостачання споживачів другої та третьої категорій тут передбачено встановлення двох трансформаторів типу ТМ-630/10.

Паспортні характеристики обраного трансформатора наведені нижче:

- Номінальна потужність, $S_{НОМ}$: 630 кВА
- Напруга короткого замикання, $U_{КЗ}$: 5,5%
- Струм неробочого ходу, I_{HX} : 2,0%
- Втрати короткого замикання, ΔP_K : 7,6 кВт
- Втрати неробочого ходу, ΔP_{HX} : 1,31 кВт

Перед визначенням втрат обчислюється фактичний коефіцієнт завантаження трансформаторів (K_3) у нормальному режимі роботи (коли працюють обидва трансформатори, ($n = 2$)):

$$K_3 = \frac{S_{p0,4}}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{781,8}{2 \cdot 630} \approx 0,62$$

Втрати активної потужності в трансформаторах ТП №1 визначаються як сума втрат холостого ходу (незалежних від навантаження) та втрат короткого замикання (нагрів обмоток):

$$\Delta P_T = n \cdot (\Delta P_{HX} + \Delta P_K \cdot K_3^2) = 2 \cdot (1,31 + 7,6 \cdot 0,62^2) \approx 8,5 \text{ кВт}$$

Втрати реактивної потужності обчислюються на основі струму неробочого ходу та напруги короткого замикання:

$$\Delta Q_T = n \cdot \left(\frac{I_{HX}}{100} \cdot S_{НОМ} + \frac{U_K}{100} \cdot S_{НОМ} \cdot K_3^2 \right)$$
$$\Delta Q_T = 2 \cdot \left(\frac{2,0}{100} \cdot 630 + \frac{5,5}{100} \cdot 630 \cdot 0,62^2 \right) \approx 51,9 \text{ квар}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

З урахуванням знайдених втрат, загальне розрахункове навантаження ТП №1 на стороні 10 кВ становитиме:

- Активна складова:

$$P_{10} = P_{0,4} + \Delta P_T = 606,8 + 8,5 = 615,3 \text{ кВт}$$

- Реактивна складова:

$$Q_{10} = Q_{0,4} + \Delta Q_T = 493,0 + 51,9 = 544,9 \text{ квар}$$

- Повна потужність підстанції:

$$S_{10} = \sqrt{P_{10}^2 + Q_{10}^2} = \sqrt{615,3^2 + 544,9^2} \approx 821,9 \text{ кВА}$$

Аналогічна методика була застосована для обчислення втрат і навантажень на високовольтній стороні інших проєктованих підстанцій. Зведені результати інтегровані до розрахункової Таблиці 1.3.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 1.3. Обчислення електричних навантажень у системі внутрішньозаводського електропостачання (вище 1 кВ)

№	Назва групи споживачів	Кіл ькі сть ЕС	Р одного			Р сума рна	m	Кв	cosφ	tgφ	Середнє		п _{еф}	К _м	Розрахункове навантаження		
			min	...	max						Р _{см} , кВт	Q _{см} , квар			Р _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ТП №1 (2х630)																	
1	Цех водопідготовки та очищення																
	Силове навантаження	28	0,5	-	30	223	28	0,55	0,77	0,83	122,6	101,7	15	1,25	153,3	101,7	184,0
	Освітлювальне нав-ння										10,5	18,2			9,4	16,3	18,8
	Всього по цеху										133,1	119,9			162,7	118,0	201,0
2	Цех твердих лікарських форм																
	Силове навантаження	35	0,5	-	33	198	35	0,6	0,74	0,9	118,6	106,1	12	1,3	154,1	106,1	187,1
	Освітлювальне нав-ння										28,8	13,9			27,6	13,4	30,7
	Всього по цеху										147,4	120,0			181,8	119,5	217,5
3	Холодильно-компресорна станція																
	Силове навантаження	20	1	-	16	77,8	20	0,55	0,74	0,9	42,8	38,4	10	1,35	57,8	38,4	69,3
	Освітлювальне нав-ння										3,8	1,9			3,9	1,9	4,4
	Всього по станції										46,6	40,2			61,7	40,3	73,6
4	Цех стерильних лікарських засобів																
	Силове навантаження	30	0,4	-	24	83,1	30	0,45	0,77	0,83	37,4	31,2	7	1,55	58,0	31,2	65,8
	Освітлювальне нав-ння										17,6	8,5			20,1	9,7	22,3
	Всього по цеху										55,0	39,7			78,0	40,9	88,1
5	Насосна станція та венткамера																
	Силове навантаження	40	1,1	-	14	271	40	0,8	0,8	0,74	216,7	161,0	39	1,05	227,5	161,0	278,7
	Освітлювальне нав-ння										8,6	15,0			7,7	13,4	15,5
	Всього по насосній										225,3	175,9			235,2	174,4	292,8
Всього силова по ТП 1		153	0,4	...	33	853	83	0,63	0,78	0,81	538,0	438,3	52	1,00	538,0	438,3	694,0

Продовження таблиці 1.3

2		3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Всього освітлювальна по ТП 1											69,4	57,5			68,8	54,7	87,9
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 1											607,4	495,8			606,8	493,0	781,8
Втрати в тр-рах ТП 1															8,5	51,9	52,6
Всього на шинах 10 кВ по ТП 1															615,3	544,9	821,9
ТП №2 (2х630)																	
1	Цех синтезу АФІ																
	Силове навантаження	33	0,5	-	71	140	33	0,65	0,88	0,54	415,0	224,9	18	1,17	485,6	224,9	535,1
	Освітлювальне										29,7	14,4			28,5	13,8	31,7
	Всього по цеху										444,7	239,2			514,1	238,7	566,8
2	Блок ремонтних служб																
	Силове навантаження	25	0,4	-	25	75,3	25	0,35	0,72	0,96	26,4	25,4	6	1,65	43,5	25,4	50,3
	Освітлювальне										18,4	31,9			19,6	33,9	39,2
	Всього по блоку										44,8	57,3			63,0	59,3	86,6
	Освітлення території										29,0	50,2			19,5	28,1	34,2
Всього силова по ТП 2		58	0,4	...	71	215	178	2,41	0,83	0,67	518,5	346,7	6	1,00	518,5	381,4	643,6
Всього освітлювальна по ТП 2											77,1	96,5			67,6	75,8	101,6
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 2											595,6	443,2			586,1	457,2	743,3
Втрати в тр-рах ТП 2															7,9	49,3	49,9
Всього на шинах 10 кВ по ТП 2															599,3	594,0	506,6
ТП № 3 (2х630)																	
1	Адміністративно-побутовий корпус																
	Силове навантаження	36	0,2	-	7,5	104	36	0,6	0,83	0,66	62,3	41,1	30	1,1	68,5	41,1	79,9
	Освітлювальне										41,0	19,9			39,4	19,1	43,7
	Всього по АПК										103,3	61,0			107,9	60,2	123,5

Продовження таблиці 1.3

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	2
2	ССГП															
	Силове навантаження	18	0,2	-	18	55,70	18	0,39	0,7	0,9	21,52	20,01	6	1,68	36,1	42,2
	Освітлювальне навантаження										18,6	0,0			11,2	11,2
	Всього по складу										40,1	20,0			47,2	52,1
3	Лабораторія контролю якості															
	Силове навантаження	32	0,2	-	16	140	32	0,65	0,7	0,9	90,8	84,6	17	1,15	104,4	134,4
	Освітлювальне навантаження										7,7	3,7			8,3	9,2
	Всього по лабораторії										98,5	88,3			112,7	143,4
4	Цех фасування та пакування															
	Силове навантаження	48	0,5	-	16	366	48	0,7	0,7	0,9	256,5	236,0	46	1,05	269,3	358,1
	Освітлювальне навантаження										33,6	16,3			34,3	38,1
	Всього по цеху										290,1	252,3			303,6	394,9
5	Цех м'яких лікарських форм															
	Силове навантаження	45	1,1	-	18	230	45	0,65	0,78	0,8	149,5	119,9	26	1,1	164,5	203,5
	Освітлювальне навантаження										11,5	5,6			13,1	14,6
	Всього по цеху										161,0	125,5			177,6	217,9
Всього силова по ТП 3		179	0,2	...	18	895,7	90	0,65	0,76	0,86	580,6	501,6	100	1,00	580,6	767,2
Всього освітлювальна по ТП 3											112,4	45,4			106,2	116,8
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 3											693,0	547,0			686,8	878,4
Втрата в тр. ТП 3 (2х630)															10,0	59,7
Всього на шинах 10 кВ по ТП 3															696,8	923,8
Всього на стороні 0,4 кВ															1879,6	2382,1
Загальні втрати в тр-рах ТП 1-3															26,1	160,9
Всього на стороні 10 кВ															1905,7	2502,6
Всього по об'єкту															1905,7	2502,6

1.4. Графіки електричних навантажень

Формування добових та річних графіків електричних навантажень (ГЕН) проєктованого об'єкта здійснювалося за допомогою спеціалізованого програмного середовища Microsoft Excel. Вхідними параметрами для генерації профілів слугували відносні показники споживання активної та реактивної потужності залежно від часу доби. Розподіл цих параметрів у відсотковому еквіваленті для характерних робочих і неробочих днів зведено до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Відносні показники добового електроспоживання для моделювання ГЕН

№ з/п	Робочі дні		Вихідні дні	
	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %
1	2	3	4	5
1	80	82	65	66
2	80	82	65	66
3	80	82	65	66
4	78	80	65	66
5	78	80	65	66
6	82	80	65	66
7	88	85	68	65
8	92	90	70	68
9	98	95	75	72
10	100	98	78	75
11	100	100	78	75
12	98	97	78	75
13	95	92	78	75
14	98	95	78	75
15	100	98	78	75
16	100	100	78	75
17	98	96	75	72
18	92	90	70	68

1	2	3	4	5
19	88	85	68	68
20	85	85	65	66
21	85	82	65	66
22	82	80	65	66
23	80	80	65	66
24	80	80	65	66

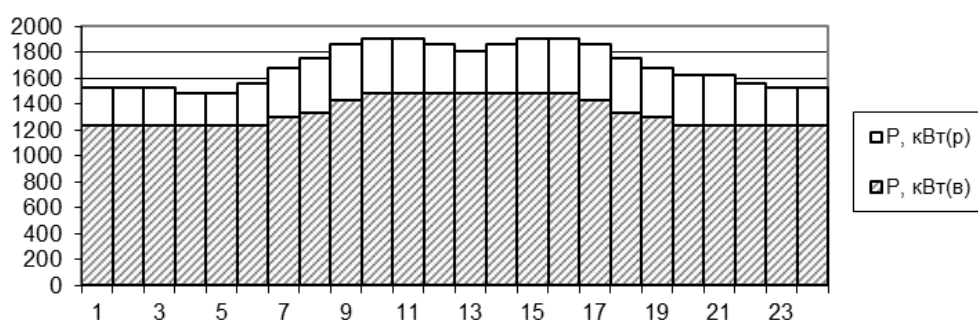


Рисунок 1.1. Профіль добового споживання активної потужності (робочий та вихідний режими, зимовий сезон)

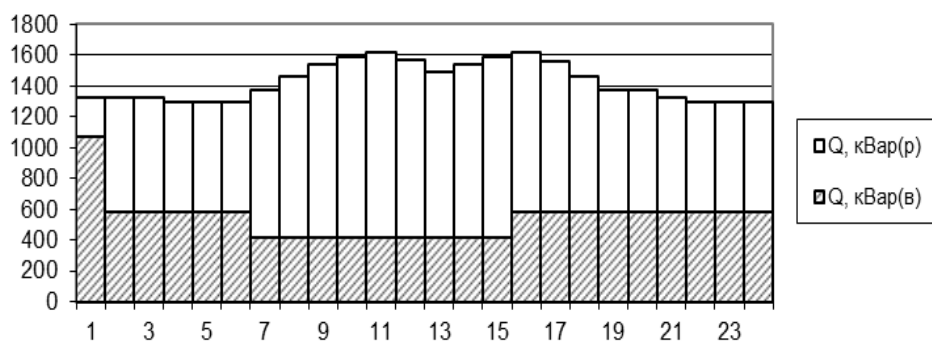


Рисунок 1.2. Профіль добового споживання реактивної потужності (робочий та вихідний режими, зимовий сезон)

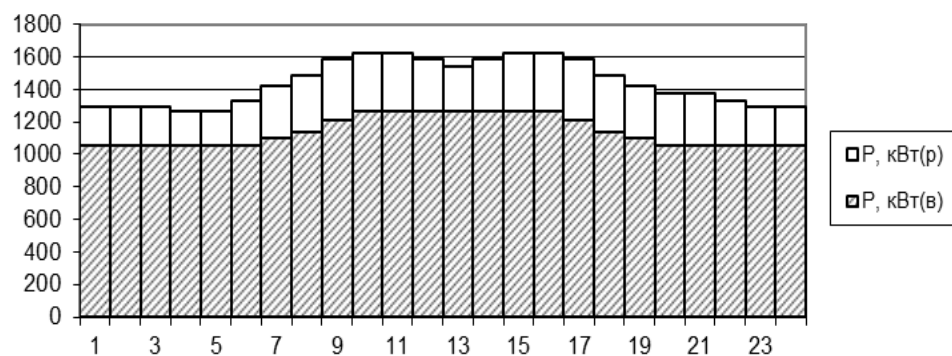


Рисунок 1.3. Профіль добового споживання активної потужності (робочий та вихідний режими, літній сезон)

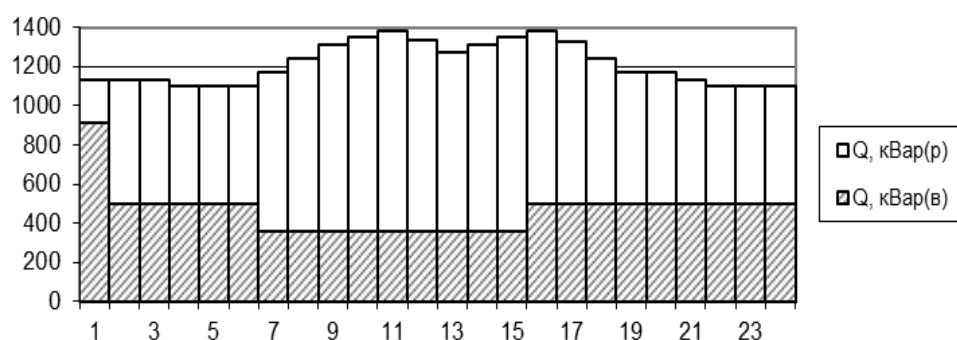


Рисунок 1.4. Профіль добового споживання реактивної потужності (робочий та вихідний режими, літній сезон)

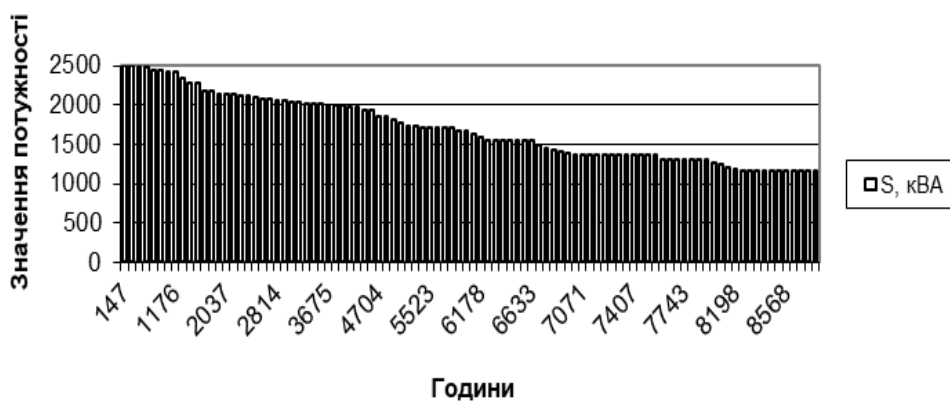


Рисунок 1.5. Річний графік тривалості повного електричного навантаження

Базуючись на отриманих контурах навантаження, визначаються ключові техніко-економічні показники ефективності роботи електромережі.

Річне число годин використання максимуму навантаження T_{MAX} становить:

$$T_M = \sqrt{\frac{W_P^2 + V_P^2}{S_P^2}} = \frac{12840114}{1905,73} = 6738 \text{ год.}$$

Еквівалентний час максимальних втрат потужності τ :

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{6738}{10^4} \right) \cdot 8760 = 5576 \text{ год.}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ ГОЛОВНОЇ ЗНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІЇ (ГЗП)

З метою мінімізації втрат потужності в розподільних мережах та оптимізації довжини кабельних трас, необхідно визначити теоретичний центр електричних навантажень (ЦЕН) підприємства. Для наочного представлення розподілу потужностей по території об'єкта будується картограма навантажень. Вона являє собою план підприємства, на якому електричні навантаження кожного підрозділу зображені у вигляді кіл, площі яких пропорційні розрахунковим потужностям цих об'єктів.

Продемонструємо методику обчислення параметрів картограми на прикладі цеху синтезу АФІ. Приймаємо масштаб площі кола $m = 0,4 \text{ Вт/мм}^2$.

Радіус кола (R_i), який репрезентує сумарне активне навантаження даного цеху, визначається за геометричним співвідношенням площі та потужності:

$$R_1 = \sqrt{\frac{\Sigma P_{p1}}{\pi m}} = \sqrt{\frac{514,10}{3,14 \cdot 0,4}} = 20,23 \text{ мм},$$

Для візуального розділення силового та освітлювального навантажень всередині кола виділяється відповідний сектор. Кут сектора (α_1), що відповідає частці освітлювального навантаження, розраховується за формулою:

$$\alpha_1 = \frac{P_{\text{осв1}} \cdot 360^\circ}{\pi \cdot R_1^2 \cdot m} = \frac{28,51 \cdot 360^\circ}{3,14 \cdot 20,23^2 \cdot 0,4} \approx 19,971^\circ$$

За аналогічним алгоритмом було обчислено радіуси та кути секторів для всіх інших виробничих і допоміжних будівель підприємства. У таблиці 2.1 наведено вихідні дані та результати обчислень.

Наступним кроком є визначення координат (X, Y) ідеального центру навантажень усього фармацевтичного заводу. ЦЕН визначається за принципом знаходження центру мас системи матеріальних точок:

									Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата					

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{418712,80}{2065,0} = 202,8 \text{ м},$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{421470,58}{2065,0} = 204,1 \text{ м}.$$

Отримані координати ($X_0 = 202,8 \text{ м}$; $Y_0 = 204,1 \text{ м}$) вказують на енергетично найвигідніше місце для спорудження головної знижувальної підстанції (або головного розподільного щита). На генеральному плані підприємства ГЗП проєктується максимально близько до знайденого теоретичного центру, з урахуванням архітектурних, пожежних та технологічних обмежень.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Зм			Таблиця 2.1. Зведені дані для візуалізації центру електричних навантажень промислового об'єкту							
Арк										
№ Підпис										
Дата										
	</									

ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Схема приєднання та вибір напруги живлення

Енергозабезпечення проєктованого промислового об'єкта може бути реалізовано за двома альтернативними конфігураціями:

- Варіант 2 живлення по повітряній лінії (ПЛ) 35 кВ зі спорудженням власної Головної знижувальної підстанції (ГЗП), (рисунок 3.1 б).

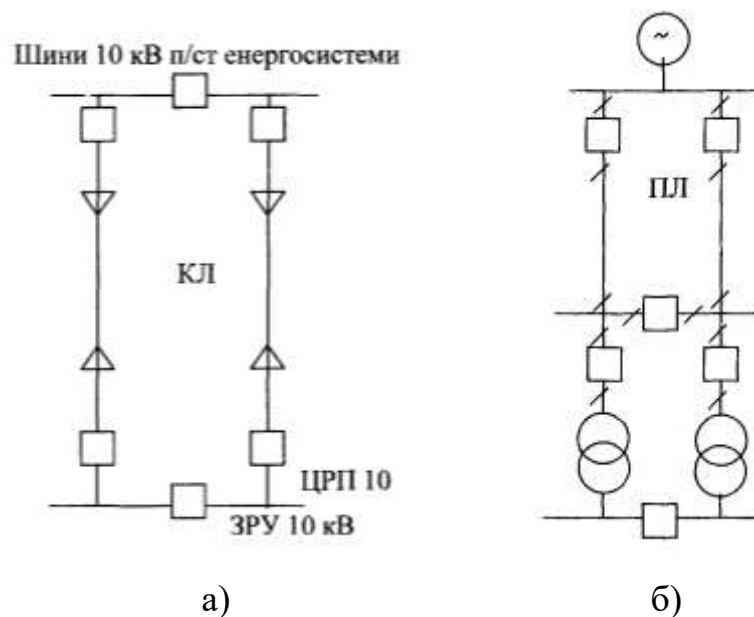


Рисунок 3.1. Альтернативні конфігурації системи зовнішнього електропостачання об'єкту

Для обґрунтування оптимального рішення проведемо розрахунок технічних параметрів для Варіанту №1. Розрахунковий струм у кабельній лінії за умови передачі максимальної потужності визначається як:

$$I_p = \frac{S'_p}{2\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{2502,6}{21,732 \cdot 10,5} = 68,80 \text{ А.}$$

Визначаємо економічно доцільну площу перерізу струмопровідних жил (приймаємо нормоване значення економічної густини струму $j_{ЕК} = 1,3 \text{ А/мм}^2$):

$$F_{ЕК} = \frac{I_p}{j_{ЕК}} = \frac{68,80}{1,3} = 52,92 \text{ мм}^2$$

Прийmemo ААШв (3х50) з $I_{доп} = 120 \text{ А}$, втратами потужності на 1 км $\Delta P_{1км} = 16 \text{ кВт/км}$ та вартістю 1 км - $K_0 = 500 \text{ тис.грн/км}$.

Найближчим стандартизованим перерізом є 50 мм². До встановлення приймаємо кабельну лінію марки ААШв (3х50) з допустимим струмовим навантаженням $I_{доп} = 120 \text{ А}$. Довжину кабельної траси з урахуванням рельєфу та 5% запасу на вигини приймаємо $l_{\Sigma} = 1,01 \text{ км}$.

Розраховуємо фактичний коефіцієнт завантаження кабельної лінії у нормальному експлуатаційному режимі:

$$K_3 = \frac{I_p}{n \cdot I_{доп}} = \frac{68,80}{1 \cdot 120} = 0,573$$

Втрати активної потужності (ΔP_x) та річні втрати електроенергії (ΔW_a) в лінії складуть:

$$\Delta P_x = \Delta P_{1км} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_3^2 = 16 \cdot 1,01 \cdot 0,573^2 = 5,30 \text{ кВт},$$

$$\Delta W_a = \Delta P_x \cdot \tau = 5,30 \cdot 5576 = 29553 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартісний еквівалент щорічних втрат електроенергії розраховується з урахуванням актуального комплексного тарифу для промислових споживачів Кіровоградської області. Оскільки точка приєднання у Варіанті 1 знаходиться

						Арк.

на рівні 10 кВ (2-й клас напруги), орієнтовний тариф складає $C_0 = 6,80$ грн/кВт·год:

$$C_{втр} = \Delta W C_0 = 176390,2 \cdot 5,5488 \cdot 10^{-3} = 977,21 \text{ тис. грн.}$$

Для зіставлення двох концепцій виконано розрахунок капітальних інвестицій (Таблиця 3.1) та щорічних експлуатаційних витрат (Таблиця 3.2).

Таблиця 3.1. Оцінка капітальних вкладень за варіантами

Варіант	Найменування елементів мережі	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн	Загальна вартість, тис. грн
Варіант 1 (10 кВ)	Комірки КРУ з вакуумними вимикачами	шт.	2	150	300
	Кабельна лінія (довжина траси 2·ІΣ)	км	2,02	1150	2323
	Земляні роботи (траншея)	км	2,02	600	1212
	Всього по Варіанту 1				3835
Варіант 2 (35 кВ)	Повітряна лінія 35 кВ на опорах	км	2,02	560	1131,2
	Відкритий розподільний пристрій 35 кВ	комп.	1	930	930,0
	Силові тр-ри	шт.	2	680,0	1360
	Всього по Варіанту 2				3411,2

Таблиця 3.2. Розрахунок щорічних амортизаційних та експлуатаційних витрат

Варіант	Найменування об'єкту	Кі, тис. грн	Норма відрахувань, %	Витрати (Сп), тис. грн
1	2	3	4	5
Варіант 1	Комірки КРУ 10 кВ	300	20	60

						Арк.

1	2	3	4	5
	Кабельні лінії та траншеї	3535	10	353,5
	Всього поточних витрат			413,5
Варіант 2	Повітряна лінія 35 кВ	1131,2	10	113,1
	ВРП 35 кВ та трансформатори	2280	20	456
	Всього поточних витрат			569,1

Остаточна економічна доцільність визначається за критерієм мінімуму зведених витрат, де застосовується нормативний коефіцієнт дисконтування. Слід зазначити, що у Варіанті 2 підприємство приєднується на напрузі 35 кВ, що переводить його до 1-го класу споживачів. Це дозволяє купувати електроенергію за нижчим тарифом, тому вартість витрат у цьому варіанті є пропорційно меншою.

Таблиця 3.3. Зведені витрати за двома варіантами, т.грн.

Показник	Варіант 1 (10 кВ)	Варіант 2 (35 кВ)
Капітальні вкладення (К)	3835	3411,2
Поточні експлуатаційні витрати (C _n)	413,5	569,1
Вартість витрат електроенергії (C _{втр})	201	172,9*
Зведені витрати ($3 = K \cdot E_H + C_n + C_{втр}$)	1189,8	1253,7

Аналіз техніко-економічних показників демонструє, що зведені витрати за Варіантом 2 (живлення напругою 35 кВ) становлять 1253,7 тис. грн, що лише на 5,4% перевищує показники кабельної лінії 10 кВ (1189,8 тис. грн). Відповідно до норм технологічного проектування промислових об'єктів, якщо перевищення зведених витрат варіанта з вищою напругою знаходиться в межах 10–20%, він вважається пріоритетним. Застосування ГЗП 35/10 кВ гарантує значно вищу

якість електроенергії, покращену надійність роботи технологічних ліній та створює необхідний резерв потужності для перспективного розширення заводу. З огляду на це, до впровадження однозначно приймається Варіант №2.

3.2. Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання

Оскільки зовнішнє живлення підприємства здійснюється через ГЗП напругою 35 кВ, для подальшого розподілу електроенергії по території заводу до цехових трансформаторних підстанцій (ТП) приймається напруга 10 кВ. Вибір напруги 10 кВ замість застарілого стандарту 6 кВ є технічно та економічно обґрунтованим рішенням. Використання вищого класу напруги дозволяє знизити струмові навантаження в лініях приблизно на 40%, що пропорційно зменшує втрати активної потужності та дозволяє використовувати кабелі меншого перерізу. Безпосереднє живлення силового технологічного устаткування та освітлювальних приладів у цехах реалізується від цехових ТП на стандартному рівні 380/220 В.

Забезпечення надійності та вибір топології мережі. Фармацевтичне виробництво (зокрема цех синтезу АФІ, цех стерильних лікарських засобів та холодительно-компресорна станція) характеризується наявністю безперервних хіміко-технологічних процесів. Більшість споживачів підприємства відносяться до I та II категорій надійності електропостачання. Перерва в їх живленні може призвести до браку дороговартісної продукції або порушення санітарних норм.

З огляду на це, внутрішньомайданчикова розподільна мережа 10 кВ проектується за змішаною топологією, що поєднує радіальні та магістральні принципи побудови:

1. *Радіальні лінії* застосовуються для живлення найбільш відповідальних і потужних вузлів навантаження (наприклад, насосно-фільтрувальної станції). Вони виконуються двома взаєморезервуючими лініями, підключеними до різних секцій шин 10 кВ на ГЗП.

						Арк.

2. *Магістральні кільцеві схеми* застосовуються для групи менш потужних цехових ТП (наприклад, склад сировини, адміністративно-побутовий корпус). У нормальному режимі кільце розімкнене на одному з апаратів для зменшення струмів короткого замикання, а в аварійному — автоматично або вручну замикається, відновлюючи живлення від неушкодженої гілки.

Конструктивне виконання мережі. Розподільна мережа 10 кВ виконується виключно кабельними лініями (КЛ). Враховуючи сучасні тенденції проектування систем електропостачання, до використання пропонуються кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену (ЗПЕ) з алюмінієвими жилами. Такі кабелі мають вищу пропускну здатність, низьку питому пошкоджуваність, є екологічно безпечними та не містять масла, що усуває ризик його витікання.

Прокладання кабельних трас по території фармацевтичного заводу передбачається комбінованим способом. У зонах з низькою щільністю забудови кабелі прокладаються у земляних траншеях. У місцях скупчення інженерних комунікацій або поблизу цехів із хімічно активними речовинами передбачено прокладання КЛ на надземних кабельних естакадах. Це рішення полегшує візуальний огляд мереж, спрощує ремонтні роботи та унеможливорює пошкодження кабелів у разі розлиття промислових стоків у ґрунт.

Запропонована конфігурація внутрішньозаводської мережі гарантує високу надійність живлення, електробезпеку персоналу та створює оптимальні умови для подальшої експлуатації і можливого розширення промислового об'єкту.

						Арк.

4. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації

Впровадження засобів компенсації реактивної потужності (КРП) є необхідним кроком для зниження втрат електроенергії в мережах підприємства та виконання технічних умов енергопостачальної організації.

Згідно з попередніми розрахунковими графіками та зведеними відомостями, сумарне розрахункове навантаження на рівні 10 кВ (з урахуванням втрат у цехових трансформаторах) становить: $P_{10} = 1905,7$ кВт; $Q_{10} = 1622,0$ квар; $S_{10} = 2502,6$ кВА.

- Відповідно до вимог оператора систем розподілу (ОСР), гранично допустиме значення тангенса кута зсуву фаз у точці приєднання не повинно перевищувати $\operatorname{tg} \varphi_e = 0,15$ (що відповідає $\cos \varphi \approx 0,99$). Дозволена реактивна потужність, яку підприємство може споживати з енергосистеми без нарахування штрафних санкцій, становить:

$$Q_e = P_{10} \cdot \operatorname{tg} \varphi_e = 1905,7 \cdot 0,15 = 285,9 \text{ кВар.}$$

Сумарна потужність компенсувальних установок, необхідна для нормалізації режиму, визначається різницею:

$$Q_{K\Sigma} = Q_{10} - Q_e = 1622,0 - 285,9 = 1336,1 \text{ кВар.}$$

Для досягнення максимального економічного ефекту КРП доцільно розділити на два ступені: індивідуальну/групову компенсацію на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій та централізовану компенсацію на шинах 10 кВ ГЗП.

4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності

Оскільки на підприємстві проектується 6 силових трансформаторів потужністю 630 кВА (сумарна встановлена потужність 3780 кВА), вони мають достатній резерв пропускної здатності. Проте, з метою розвантаження мереж нижчої напруги, приймаємо до встановлення на стороні 0,4 кВ автоматичні

						Арк.

конденсаторні установки (АКУ) сумарною потужністю $Q_{кН} = 900$ квар (розподілені між трьома основними ТП).

Таблиця 4.1. Розподіл компенсувальних установок на стороні 0,4 кВ

Найменування підстанції	К-сть ТР	Р _р , кВт	Q _р , квар	Потужність АКУ (Q _{кН}), квар	Кз після комп.	Sp після комп., кВА
ТП №1 (Цех синтезу АФІ та ін.)	2	606,8	493	300	0,51	636,5
ТП №2 (Цех нейтралізації)	2	591	488,9	300	0,49	620
ТП №3 (АПК, Склад, ін.)	2	650	470	300	0,53	671,7
Всього по підприємству	6			900		

Залишкова реактивна потужність, яка підлягає компенсації на високовольтній стороні (10 кВ), становить:

$$Q_{кВ} = Q_{кΣ} - Q_{кН} = 1336,1 - 900 = 436,1 \text{ кВар}$$

З огляду на двосекційну структуру шин 10 кВ Головної знижувальної підстанції та вимоги щодо надійності електропостачання, замість однієї загальної установки приймаємо до встановлення дві комплектні конденсаторні установки (ККУ) потужністю по 225 квар кожна (наприклад, типу УКРМ-10,5-225). Кожна установка підключається до своєї секції шин 10 кВ, що забезпечує:

- рівномірний розподіл компенсувальної потужності між секціями;
- можливість гнучкого регулювання режиму при зміні конфігурації мережі;
- підвищення надійності (при відключенні однієї секції частина компенсації залишається в роботі).

Сумарна потужність високовольтної компенсації складе

$$Q_{кВ} = 225 \cdot 2 = 450 \text{ кВар}$$

Техніко-економічне порівняння варіантів компенсації

Питомі втрати активної потужності в конденсаторах становлять: на стороні 0,4 кВ — 0,0045 кВт/квар; на стороні 10 кВ — 0,003 кВт/квар.

Втрати в конденсаторних установках:

						Арк.

$$\Delta P_{\kappa H} = 0,0045 \cdot 900 = 4,05 \text{ кВт}; \Delta P_{\kappa B} = 0,003 \cdot 450 = 1,35 \text{ кВт}$$

Додаткові втрати в силових трансформаторах від протікання некомпенсованої частини реактивної потужності $Q_{TP} = 1450 - 900 = 550$ квар:

$$\Delta P_{TP} = \frac{Q_{TP}^2 \cdot \Delta P_K}{n \cdot S_{НОМ}^2} = \frac{550^2 \cdot 7,6}{6 \cdot 630^2} \approx 0,96 \text{ кВт}$$

Розрахункові зведені витрати за обраним варіантом (при тарифі $C_0 = 6,80$ грн/кВт·год та $\tau = 5576$ год):

$$З_1 = E_n (K_{\kappa H} + K_{\kappa B}) + (\Delta P_{\kappa H} + \Delta P_{\kappa B} + \Delta P_{TP}) \cdot C_0 \cdot \tau$$

$$З_1 = 0,15 \cdot (1350 + 540) + (4,05 + 1,35 + 0,96) \cdot \frac{6,80 \cdot 5576}{1000} = 283,5 + 241,2 = 524,7 \text{ тис. грн.}$$

Для обґрунтування цього рішення, результати порівняння з іншими можливими варіантами.

Таблиця 4.2. Аналіз зведених витрат на систему компенсації

Показник	Варіант 1 (Комбінований)	Варіант 2 (Усе на 0,4 кВ)	Варіант 3 (Переважно 10 кВ)
Потужність АКУ в мережі 0,4 кВ, квар	900	1350	450
Потужність КБ в мережі 10 кВ, квар	450	0	900
Дозволене споживання від мережі, квар	286	286	286
Сумарно в балансі, квар	1636	1636	1636
Капітальні витрати (К), тис. грн	1890	2025	1755
Вартість втрат енергії, тис. грн	241,2	231,3	299,9
Зведені витрати (З), тис. грн	524,7	535	563,1

Як свідчать дані таблиці 4.2, мінімальне значення зведених витрат (524,7 тис. грн) досягається саме при застосуванні вар. № 1 — комбінованої компенсації (900 квар на стороні 0,4 кВ та 450 квар на стороні 10 кВ). Цей варіант забезпечує оптимальний баланс між вартістю обладнання та економією на втратах електроенергії в трансформаторах, тому він приймається до подальшого проектування (табл. 4.2).

						Арк.

Таблиця 6.3. Уточнений баланс потужностей заводу після компенсації реактивної складової

№	Назва групи споживачів	Кількість ЕС	Р одного			Р сума рна	m	К _и	cosφ	tgφ	Середнє		п _{еф}	К _м	Розрахункове навантаження		
			min	...	max						Р _{см} , кВт	Q _{см} , квар			Р _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
ТП №1 (2,0х630,0)																	
1	Цех водопідготовки та очищення																
	Силове навантаження	28	0,5	-	30	223	28	0,55	0,77	0,83	122,6	101,7	15	1,25	153,3	101,7	184,0
	Освітлювальне навантаження										10,5	18,2			9,4	16,3	18,8
	Всього по відділу										133,1	119,9			162,7	118,0	201,0
2	Цех твердих лікарських форм																
	Силове навантаження	35	0,5	-	33	198	35	0,6	0,74	0,9	118,6	106,1	12	1,3	154,1	106,1	187,1
	Освітлювальне навантаження										28,8	13,9			27,6	13,4	30,7
	Всього по корпусу										147,4	120,0			181,8	119,5	217,5
3	Холодильно-компресорна станція																
	Силове навантаження	20	1	-	16	77,8	20	0,55	0,74	0,9	42,8	38,4	10	1,35	57,8	38,4	69,3
	Освітлювальне навантаження										3,8	1,9			3,9	1,9	4,4
	Всього по котельні										46,6	40,2			61,7	40,3	73,6
4	Цех стерильних лікарських засобів																
	Силове навантаження	30	0,4	-	24	83,1	30	0,45	0,77	0,83	37,4	31,2	7	1,55	58,0	31,2	65,8
	Освітлювальне навантаження										17,6	8,5			20,1	9,7	22,3
	Всього по цеху										55,0	39,7			78,0	40,9	88,1
5	Насосна станція та венткамера																
	Силове навантаження	40	1,1	-	14	271	40	0,8	0,8	0,74	216,7	161,0	39	1,05	227,5	161,0	278,7
	Освітлювальне навантаження										8,6	15,0			7,7	13,4	15,5
	Всього по цеху										225,3	175,9			235,2	174,4	292,8

Зм

Арк

№ док-м

Підпис

Дата

Арк.

Продовження таблиці 6.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Всього силова по ТП 1		153	0,4	...	33	853	83	0,63	0,78	0,81	538,0	438,3	52	1,00	538,0	438,3	694,0
Всього освітлювальна по ТП 1											69,4	57,5			68,8	54,7	87,9
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 1											607,4	495,8			606,8	493,0	781,8
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ																-300	
Навантаження з КП 0,4 кВ															606,8	193,0	636,7
Втрати в тр-рах ТП 1(2,0х630,0)															6,5	42,9	43,4
Всього на шинах 10 кВ по ТП 1															615,4	613,3	-64,1
ТП №2 (2х630)																	
1	Цех синтезу активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ)																
	Силове навантаження	33	0,5	-	71	639	33	0,65	0,88	0,54	415,0	224,9	18	1,17	485,6	224,9	535,1
	Освітлювальне навантаження										29,7	14,4			28,5	13,8	31,7
	Всього по цеху										444,7	239,2			514,1	238,7	566,8
2	Блок ремонтних служб																
	Силове навантаження	25	0,4	-	25	75,3	25	0,35	0,72	0,96	26,4	25,4	6	1,65	43,5	25,4	50,3
	Освітлювальне										18,4	31,9			19,6	33,9	39,2
	Всього по блоку										44,8	57,3			63,0	59,3	86,6
3	Освітлення території фармацевтичного заводу																
	Всього по території										29,0	50,2			19,5	28,1	34,2
Всього силова по ТП 10		58	0,4	...	71	714	178	0,7	0,8	0,67	518,5	346,7	20	1,00	518,5	346,7	623,7
Всього освітлювальна по ТП 3											77,1	96,5			67,6	75,8	101,6
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 3											595,6	443,2			586,1	422,6	722,5
КП 0,4 кВ																-300	
Навантаження з КП 0,4 кВ															586,1	586,1	122,6
															6,1	40,8	41,3

Продовження таблиці 6.3.

[illegible]

Зм	
Арк	
№ док-т	
Підпис	
Дата	
Арк.	

Продовження таблиці 6.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Навантаження з КП 0,4 кВ														686,8	247,6	730,1
Втрати в тр. ТП 3 (2,0х630,0)														48,5	49,1	54,1
Всього на шинах 10 кВ по ТП 3														694,5	3,9	694,5
Всього на стороні 0,4 кВ														1879,6	1463,3	2382,1
Загальні втрати в тр-рах ТП 1-3														20,3	132,2	133,8
Всього на стороні 10 кВ														1899,9	1595,5	2481,0
Всього по заводу														1899,9	1595,5	2481,0
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ															-900,0	
Компенсуючі пристрої 10 кВ															-450,0	
Всього по підприємству з КП														1899,9	245,5	1915,7

tgφ1 = 0,15

5. ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ

5.1. Вибір кількості та потужності трансформаторів

Для забезпечення надійного живлення споживачів II та I категорій, якими є технологічні лінії фармацевтичного виробництва, на всіх підстанціях проектується встановлення двох силових трансформаторів.

Розрахунок мінімальної номінальної потужності трансформаторів для Головної знижувальної підстанції (ГЗП) базується на сумарному максимальному навантаженні заводу S_{max} . Враховуємо коефіцієнт нерівномірності графіка навантажень $K_H = 0,9$ та допустиме аварійне перевантаження трансформаторів $K_{AB} = 1,4$:

$$S_{T(ГЗП)} = \frac{S_{max} \cdot K_H}{K_{AB} \cdot (n-1)} = \frac{1915,7 \cdot 0,9}{1,4 \cdot (2-1)} \approx 1231,5 \text{ кВА}.$$

До встановлення на ГЗП приймаємо два трансформатори типу ТМН-1600/35/10. Перевіряємо фактичний коефіцієнт завантаження цих трансформаторів у нормальному експлуатаційному режимі:

$$K_{з(ГЗП)} = \frac{S_{max}}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{1915,7}{2 \cdot 1600} \approx 0,6.$$

Отримане значення лежить в оптимальному діапазоні (0,6–0,7), що свідчить про економічно доцільний вибір.

Аналогічна методика застосовується для вибору трансформаторів цехових ТП. Розрахунковим параметром є повна потужність відповідної групи споживачів після впровадження засобів компенсації реактивної потужності на стороні 0,4 кВ.

Для прикладу, наведемо розрахунок для трансформаторної підстанції ТП №1. Мінімально допустима потужність трансформатора визначається з умови забезпечення живлення в післяаварійному режимі (при відключенні одного з агрегатів):

						Арк.

$$S_{T(III)} \geq \frac{S_{p1}}{K_{AB} \cdot (n-1)} = \frac{636,7}{1,41} \approx 454,8 \text{ кВА.}$$

Зі стандартної шкали номінальних потужностей обираємо трансформатори потужністю 630 кВА. Коефіцієнт завантаження в нормальному режимі становитиме:

$$K_{3(III)} = \frac{S_{p1}}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{636,7}{2 \cdot 630} \approx 0,51.$$

Розрахунки для інших цехових підстанцій виконані за ідентичним алгоритмом. У в таблиці 5.1 представлено зведені результати вибору обладнання.

Таблиця 5.1. Оптимізація вибору трансформаторного обладнання

№ ТП	Кількість (n)	Розрахункове навантаження Sp, кВА	Обраний тип трансформатора	Коефіцієнт завантаження Kз	Потужність в аварійному режимі (1,4·Sном), кВА
ТП №1	2	636,7	ТМГ-630/10	0,51	882
ТП №2	2	598,8	ТМГ-630/10	0,48	882
ТП №3	2	730,1	ТМГ-630/10	0,58	882
ГЗП	2	1915,7	ТМН-1600/35	0,6	2240

5.2. Компоновка та місце розташування трансформаторних підстанцій

З метою максимального наближення джерел живлення до центру електричних навантажень та економії корисної площі підприємства, як цехові підстанції приймаються комплектні трансформаторні підстанції (КТП) внутрішнього або прибудованого типу з напругою 10/0,4 кВ. Вони

						Арк.

комплектуються енергоефективними герметичними трансформаторами (типу ТМГ), що не потребують обслуговування, та сучасними комірками з вакуумними вимикачами.

Розподіл цехів за підстанціями та їх територіальне розташування оптимізовано відповідно до генерального плану заводу та вимог пожежної безпеки. У табл. 5.2 наведено дані щодо компоновки цехових підстанцій.

Таблиця 5.2. Просторове розміщення та конструктивне виконання цехових підстанцій

№ ТП	К-сть ТР (n)	Потужність Sp, кВА	Обрана пот. трансформатора 10/0,4	Кз	Локація (основні споживачі)	Конструктивне виконання КТП
ТП №1	2	636,7	630	0,51	Блок насосних станцій, цех стерильних лікарських засобів, холодильно-компресорна	Вбудована / Прибудована
ТП №2	2	598,8	630	0,48	Цех синтезу АФІ, блок ремонтних служб	Вбудована
ТП №3	2	730,1	630	0,58	Адміністративно-побутовий корпус, цех фасування, лабораторія, склад	Вбудована

						Арк.

6.1. Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ)

КЛ-10 ААШВ (3X50)
L=12 км

КЛ-10 ПТ-1

КЛ-10 ПТ-2

КЛ-10 ПТ-3

The diagram shows a central vertical blue line representing a busbar. To the left of the busbar, there is a horizontal line with a series inductor labeled X_{K1} and a series resistor labeled R_{K1} . To the right of the busbar, there are four horizontal lines, each representing a feeder. Each feeder consists of a series inductor and a series resistor. The feeders are labeled as follows:

- Feeder 1: Inductor X_{K1-1} , Resistor R_{K1-1} , connected to busbar $K1$ (indicated by a lightning bolt symbol).
- Feeder 2: Inductor X_{K1-3} , Resistor R_{K1-3} , connected to busbar $K3$ (indicated by a lightning bolt symbol).
- Feeder 3: Inductor X_{K1-4} , Resistor R_{K1-4} , connected to busbar $K4$ (indicated by a lightning bolt symbol).
- Feeder 4: Inductor X_{K1-2} , Resistor R_{K1-2} , connected to busbar $K2$ (indicated by a lightning bolt symbol).

Рисунок 6.2. Еквівалентна схема заміщення мережі з параметрами елементів

Перед виконанням розрахунків аварійних режимів необхідно визначити параметри ліній живлення. Розглянемо методику на прикладі кабельної лінії (КЛ), що живить цехову підстанцію ТП №1 ($S_p = 636,7$ кВА). Струм у нормальному режимі при роботі обох трансформаторів визначається як:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{636,7}{2 \cdot 1,732 \cdot 10,5} = 17,50 \text{ A}$$

Струм у післяаварійному режимі (при відключенні однієї з паралельних ліній):

$$I_{p.AB} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 17,50 = 35,00 \text{ A}$$

Економічно доцільний переріз кабелю (при нормованій густині струму $j_{EK} = 1,4$ А/мм²):

$$F_{EK} = \frac{I_p}{j_{EK}} = \frac{17,50}{1,4} = 12,5 \text{ мм}^2$$

Враховуючи, що мінімальний стандартизований переріз для мереж 10 кВ становить 25 мм², до прокладання приймаємо кабельну лінію марки ААШВ-10 (3х25). Її тривало допустимий струм навантаження становить $I_{доп} = 90$ А, що із запасом перекидає розрахункові струми як у нормальному ($17,50 \text{ A} < 90 \text{ A}$), так і в аварійному режимах ($35,00 \text{ A} < 90 \text{ A}$).

Таблиця 6.1. Результати попереднього вибору розподільних кабельних ліній 10 кВ

№ лінії	Sp, кВА	n	Ip, А	Ip.ав, А	Fек, мм ²	Обрана марка КЛ
КЛ до ТП-1	636,7	2	17,5	35	12,5	ААШВ-10 (3х25)
КЛ до ТП-2	598,8	2	16,46	32,92	11,75	ААШВ-10 (3х25)
КЛ до ТП-3	730,1	2	20,07	40,14	14,33	ААШВ-10 (3х25)

6.2. Моделювання струмів короткого замикання (КЗ)

Обчислення параметрів аварійних режимів здійснюється в системі відносних одиниць. Базові умови приймаємо наступними: базова потужність $S_{\delta} = 100 \text{ МВА}$, середня напруга ступеня $U_{\delta} = 10,5 \text{ кВ}$. Базовий струм для ступеня 10 кВ становить:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{100}{1,732 \cdot 10,5} = 5,50 \text{ кА}$$

Опір енергосистеми (на шинах ГЗП) у відносних одиницях:

$$X_c = \frac{S_{\delta}}{S_{K3}} = \frac{100}{200} = 0,50 \text{ в.о.}$$

Для об'єктивного відтворення топології мережі враховано різну віддаленість цехових підстанцій від ГЗП. Довжини трас: до ТП-1 — $l_1 = 0,85 \text{ км}$; до ТП-2 — $l_2 = 1,1 \text{ км}$; до ТП-3 — $l_3 = 1,4 \text{ км}$.

Розрахуємо параметри КЗ у точці К1 (на шинах 10 кВ цехової ТП-1). Для кабелю ААШв-10 (3х25) питомі опори становлять: $r_0 = 1,24 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,099 \text{ Ом/км}$. При довжині лінії $l_1 = 0,85 \text{ км}$, її опори у відносних одиницях:

$$X_{K/Л1} = x_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0,099 \cdot 0,85 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,076 \text{ в.о.}$$

$$R_{K/Л1} = r_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 1,24 \cdot 0,85 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,956 \text{ в.о.}$$

Еквівалентний опір кола до точки К1:

$$X_{\Sigma 1} = X_c + X_{K/Л1} = 0,50 + 0,076 = 0,576 \text{ в.о.,}$$

$$Z_{\Sigma 1} = \sqrt{X_{\Sigma 1}^2 + R_{K/Л1}^2} = \sqrt{0,576^2 + 0,956^2} = 1,116 \text{ в.о.}$$

Початкове значення надперехідного струму трифазного КЗ у точці К1:

$$I_{K1''} = \frac{I_{\delta}}{Z_{\Sigma 1}} = \frac{5,50}{1,116} = 4,93 \text{ кА}$$

Час затухання аперіодичної складової струму КЗ:

$$T_a = \frac{X_{\Sigma 1}}{\omega R_{K/Л1}} = \frac{0,576}{314 \cdot 0,956} = 0,00192 \text{ с}$$

						Арк.

Ударний коефіцієнт $K_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a} = 1,005$. Відповідно, ударний струм:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{K1''} \cdot K_{уд} = 1,414 \cdot 4,931,005 = 7,01 \text{ кА}$$

Таблиця 6.2. Фізичні та відносні параметри кабельних ліній живлення

№ лінії	l, км	r0, Ом/км	x0, Ом/км	Rкл, Ом	Xкл, Ом	RΣ, в.о.	XΣ, в.о.
КЛ до ТП-1	0,85	1,24	0,099	1,054	0,084	0,956	0,576
КЛ до ТП-2	1,1	1,24	0,099	1,364	0,109	1,237	0,599
КЛ до ТП-3	1,4	1,24	0,099	1,736	0,139	1,575	0,626

Таблиця 6.3. Зведені результати розрахунку струмів короткого замикання

Точка КЗ	XΣ, в.о.	RΣ, в.о.	ZΣ, в.о.	Ta, с	Kуд	I'', кА	iуд, кА
K1 (шини ТП-1)	0,576	0,956	1,116	0,00192	1,005	4,93	7,01
K2 (шини ТП-2)	0,599	1,237	1,374	0,00154	1,002	4	5,66
K3 (шини ТП-3)	0,626	1,575	1,695	0,00127	1	3,24	4,58

Перевірка обраного кабелю на термічну стійкість. Визначаємо тепловий імпульс струму КЗ для найважчих умов (точка К1) при часі відключення релейного захисту $t_{БДК} = 0,2$:

$$B_k = (I_{K1''})^2 \cdot (t_{БДК} + T_a) = 4,93^2 \cdot (0,2 + 0,00192) = 4,91 \text{ кА}^2 \text{с}$$

Мінімально допустимий переріз кабелю за умовою термічної стійкості (де термічний коефіцієнт для кабелів з алюмінієвими жилами $C = 94$):

$$F_{TEP} = \frac{\sqrt{B_k \cdot 10^6}}{C} = \frac{\sqrt{4,91 \cdot 10^6}}{94} = 23,57 \text{ мм}^2$$

Оскільки розрахунковий переріз $23,57 \text{ мм}^2$ є меншим за фактичний стандартизований переріз 25 мм^2 , обраний кабель ААШв-10 (3х25) повністю задовольняє умови термічної стійкості до струмів короткого замикання. Для більш віддалених ТП-2 та ТП-3 струми КЗ ще менші, тому кабель проходить перевірку з іще більшим запасом.

						Арк.

Таблиця 6.4. Остаточний перелік та перевірка струмопровідних ліній

№ КЛ	Sp, кВА	Ip, А	Ip.ав, А	Fек, мм ²	Марка КЛ	Перевірка на термічну стійкість
КЛ 1, 2 (ТП-1)	636,7	17,5	35	12,5	ААШВ-10 (3х25)	Задовольняє (23,57<25)
КЛ 3, 4 (ТП-2)	598,8	16,46	32,92	11,75	ААШВ-10 (3х25)	Задовольняє
КЛ 5, 6 (ТП-3)	730,1	20,07	40,14	14,33	ААШВ-10 (3х25)	Задовольняє

6.3. Вибір електрообладнання

Процедура підбору комутаційних апаратів для головної знижувальної підстанції (ГЗП) та розподільного пункту базується на параметрах робочих, післяаварійних та форсованих режимів, а також на розрахованих раніше струмах короткого замикання. Для сучасних проектів електропостачання пріоритетним є використання вакуумних вимикачів, які характеризуються високою надійністю, відсутністю потреби в заміні дугогасного середовища та екологічністю.

Розглянемо вибір вимикача на стороні вищої напруги (35 кВ). Максимальний струм форсованого режиму (з урахуванням допустимого аварійного перевантаження трансформатора ТМН-1600 на 40%) становить:

$$I_{\text{роб.форс}(35)} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{1,4 \cdot 1600}{1,732 \cdot 35} = 36,9 \text{ А}$$

Для встановлення на ввіді 35 кВ приймаємо вакуумний вимикач зовнішньої установки (наприклад, ВР35НСМ-35/1000). Результати перевірки наведені у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5. Перевірка параметрів ввідного вимикача 35 кВ

Умова перевірки	Розрахункові та каталожні значення	Висновок
За робочою напругою: $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	35,0 кВ ≤ 35,0 кВ	Задовольняє
За струмом навантаження: $I_{\text{роб.форс}} \leq I_{\text{ном}}$	36,9 А ≤ 1000,0 А	Задовольняє
На струм відключення: $I_{\text{КЗ}''} \leq I_{\text{відк.ном}}$	1,65 кА ≤ 20,0 кА	Задовольняє
На електродинамічну стійкість: $i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	4,21 кА ≤ 51,0 кА	Задовольняє
На термічну стійкість: $B_K \leq I_{\text{терм}}^2 \cdot t_{\text{терм}}$	1,50 кА ² с ≤ 1200,0 кА ² с	Задовольняє

						Арк.

Далі виконаємо вибір комутаційних апаратів для сторони 10 кВ (вводи від трансформаторів, секційний вимикач та відхідні лінії до цехових ТП). Максимальний струм вводу 10 кВ (від трансформатора 1600 кВА при перевантаженні 1,4):

$$I_{\text{роб.форс(10)}} = \frac{1,41600}{1,732 \cdot 10,5} = 123,2 \text{ A}$$

Максимальний післяаварійний струм найзавантаженішої відхідної лінії (до ТП-3), розрахований у п. 6.1, становить $I_{p.av} = 40,14 \text{ A}$. Струм короткого замикання на шинах 10 кВ становить $I''_{K3} = 4,93 \text{ кА}$, ударний струм $i_{y\partial} = 7,01 \text{ кА}$, тепловий імпульс $B_K = 4,91 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

Для уніфікації обладнання ГЗП, на вводи та секційний зв'язок 10 кВ приймаємо вакуумні вимикачі типу ВВ/TEL-10-20/1000, а для ліній, що живлять цехові підстанції — ВВ/TEL-10-20/630.

Таблиця 6.6. Перевірка ввідного та секційного вимикачів 10 кВ
(BB/TEL-10-20/1000)

Умови вибору	Результат перевірки
$U_{уст} \leq U_{ном}$	10,5 кВ ≤ 12,0 кВ
$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	123,2 А ≤ 1000,0 А
$I_{КЗ''} \leq I_{відк.ном}$	4,93 кА ≤ 20,0 кА
$i_{y0} \leq i_{дин}$ (амплітудне)	7,01 кА ≤ 51,0 кА
$B_K \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$ (де t=3 с)	4,91 кА ² с ≤ 1200,0 кА ² с

Таблиця 6.7. Перевірка вимикачів відхідних ліній 10 кВ (ВВ/TEL-10-20/630)

Умови вибору	Результат перевірки
$U_{уст} \leq U_{ном}$	10,5 кВ ≤ 12,0 кВ
$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	40,14 А ≤ 630,0 А
$I_{КЗ} \leq I_{відк.ном}$	4,93 кА ≤ 20,0 кА
$i_{уд} \leq i_{дин}$	7,01 кА ≤ 51,0 кА
$B_K \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	4,91 кА ² с ≤ 1200,0 кА ² с

Як свідчать розрахунки, обрані вакуумні вимикачі проходять перевірку за всіма параметрами із значним запасом, що гарантує надійність системи.

Вибір роз'єднувачів, ізоляторів та обмежувачів перенапруг

На стороні 35 кВ (у відкритому розподільному пристрої) необхідно встановити роз'єднувачі для створення видимого розриву кола при ремонтних роботах. Обираємо роз'єднувач горизонтально-поворотного типу РДЗ-35/1000 УХЛ1.

Таблиця 6.8. Перевірка роз'єднувача 35 кВ (РДЗ-35/1000)

Умови вибору	Результат перевірки
$U_{уст} \leq U_{ном}$	35,0 кВ ≤ 35,0 кВ
$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	36,9 А ≤ 1000,0 А
На електродинамічну стійкість: $i_{yd} \leq i_{дин}$	4,21 кА ≤ 50,0 кА
На термічну стійкість: $B_K \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	1,50 кА ² с ≤ 1200,0 кА ² с

Для захисту ізоляції електрообладнання від атмосферних та комутаційних перенапруг на ГЗП застосовуються нелінійні обмежувачі перенапруг: ОПН-35 УХЛ1 (на стороні 35 кВ) та ОПН-10 УХЛ2 (у комірках 10 кВ). На відміну від застарілих вентильних розрядників (типу РВМ, які наведені у застарілих довідниках), ОПН не мають іскрових проміжків, що значно підвищує їх надійність та термін служби.

Для кріплення жорсткої шиновки у розподільних пристроях приймаємо опорні полімерні ізолятори (наприклад, типу ИОСК-10-500). Розрахункове зусилля (F_p), що діє на ізолятор при трифазному короткому замиканні ($i_{yd} = 7,01 \text{ кА}$), становить близько 19,5 Н, що значно менше допустимого навантаження для даного типу ізоляторів (5000 Н). Отже, механічна міцність шинної конструкції забезпечена.

Вибір трансформаторів власних потреб (ТВП)

Для забезпечення живлення систем охолодження силових трансформаторів, обігріву комірок розподільних пристроїв, оперативного струму та освітлення підстанції передбачається встановлення двох трансформаторів власних потреб. Загальне розрахункове навантаження цих систем становить орієнтовно $P = 18,5 \text{ кВт}$, $Q = 5,6 \text{ квар}$.

Таблиця 6.9. Зведена відомість електроприймачів власних потреб підстанції

Найменування елемента системи власних потреб	К-сть апаратів (n), шт.	Одинична активна потужність (P1), кВт	Коефіцієнт потужності (cosφ)	Коефіцієнт реактивної потужності (tgφ)	Сумарна активна потужність (PΣ), кВт	Сумарна реактивна потужність (QΣ), квар
Блок вентиляторів обдуву головних трансформаторів	2	4,5	0,85	0,62	9	5,6
Шафи обігріву приводів високовольтних вимикачів	2	1	1	0	2	0
Елементи антиконденсатного підігріву комірок КРП-10	10	0,4	1	0	4	0
Мережа освітлення та опалення загальнопідстанційного пункту (ЗПУ)	1	1,5	1	0	1,5	0
Контур зовнішнього периметрального освітлення підстанції	1	2	1	0	2	0
Загальне розрахункове споживання					18,5	5,6

Повна потужність власних потреб підстанції:

$$S_{ВП} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{18,5^2 + 5,6^2} = 19,3 \text{ кВА}.$$

З урахуванням коефіцієнта попиту $K_{П} = 0,8$, розрахункова потужність складе $S_{р} = 19,3 \cdot 0,8 = 15,46 \text{ кВА}$. З метою оптимізації капітальних витрат та зниження втрат холостого ходу, для встановлення приймаємо два трансформатори типу ТМ-16/10 (з номінальною потужністю 16 кВА).

						Арк.

Перевіримо працездатність обраного обладнання. Фактичний коефіцієнт завантаження ТВП у нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{S_p}{nS_{НОМ}} = \frac{15,46}{2 \cdot 16} = 0,48.$$

В аварійному режимі (при відключенні одного з трансформаторів) усе навантаження переводиться на справний апарат. Його коефіцієнт завантаження становитиме:

$$K_{AB} = \frac{S_p}{1 \cdot S_{НОМ}} = \frac{15,46}{16} = 0,97.$$

Оскільки $K_{AB} \leq 1,0$, обраний трансформатор здатен забезпечити надійне живлення всіх систем власних потреб підстанції в післяаварійному режимі навіть без використання допустимого перевантаження.

Вибір та перевірка вимірювальних трансформаторів струму (ТС)

Вимірювальні трансформатори струму забезпечують передачу інформаційних сигналів до приладів обліку електроенергії, систем релейного захисту та автоматики. Для забезпечення високої надійності та точності вимірювань у проекті передбачено використання опорних трансформаторів струму з литою ізоляцією. Для введів 10 кВ від силових трансформаторів (де максимальний робочий струм складає $I_{роб.форс} = 123,2 \text{ А}$ прийнято трансформатори струму типу ТПЛ-10-200/5. Для відхідних ліній до цехових підстанцій (максимальний струм лінії до ТП-3 — 40,14 А) обрано трансформатори ТПЛ-10-100/5.

Таблиця 6.10. Перевірка параметрів трансформаторів струму 10 кВ

Критерій перевірки	Умова вибору	Значення для вводу (ТПЛ-10-200/5)	Значення для ліній (ТПЛ-10-100/5)
Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$	10,5 ≤ 12,0 кВ	10,5 ≤ 12,0 кВ
Первинний струм	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	123,2 ≤ 200,0 А	40,14 ≤ 100,0 А
Динамічна стійкість	$i_{уд} \leq i_{дин}$	7,01 ≤ 50,0 кА	7,01 ≤ 30,0 кА
Термічна стійкість	$B_K \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм}$	4,91 ≤ 432,0 кА ² с	4,91 ≤ 200,0 кА ² с

Для виконання вимог щодо комерційного обліку (клас точності 0,5S) необхідно забезпечити відповідний опір вторинного кола. Розрахуємо навантаження на трансформатор струму.

Таблиця 6.11. Вторинне навантаження трансформатора струму (фаза А)

Підключений вимірювальний пристрій	Потужність (S), ВА
Багатофункціональний електронний лічильник	3,5
Цифровий щитовий амперметр	0,5
Сумарне навантаження приладів (S_{Σ})	4

Опір приладів струмового кола:

$$Z_{\text{прил}} = \frac{S_{\Sigma}}{I_2^2} = \frac{4,00}{5^2} = 0,16 \text{ Ом}$$

Допустимий опір з'єднувального кабелю (опір контактів $R_{\text{конт}} = 0,1 \text{ Ом}$):

$$R_{\text{каб}} \leq Z_{2\text{ном}} - Z_{\text{прил}} - R_{\text{конт}} = 0,4 - 0,16 - 0,1 = 0,14 \text{ Ом}$$

Обираємо контрольний кабель з алюмінієвими жилами АКВВГ перерізом 4,0 мм² (для забезпечення необхідної механічної міцності та запасу по опору). Довжину траси в межах комірки приймаємо $l = 15 \text{ м}$.

$$R_{\text{каб.форс}} = \frac{\rho \cdot l}{F} = \frac{0,028 \cdot 15}{4,0} = 0,105 \text{ Ом}$$

Умова $0,105 \text{ Ом} \leq 0,14 \text{ Ом}$ виконується. Клас точності ТС забезпечено.

Вибір трансформаторів напруги (ТН)

На секціях шин 10 кВ встановлюємо трансформатори напруги НАМІ-10-95 УХЛ2 (номінальна потужність у класі 0,5 становить 200 ВА).

Таблиця 6.12. Розрахунок вторинного навантаження ТН

Тип підключеного обладнання	Потужність (S), ВА	Кількість	Сумарно (S_{Σ}), ВА
Щитові вольтметри	1,5	3	4,5
Ваттметри та варметри	2	2	4
Кола напруги лічильників енергії	2,5	10	25
Пристрої мікропроцесорного захисту	6	1	6
Загальне навантаження на ТН			39,5

						Арк.

Перевірка трансформатора напруги на відповідність класу точності:

$$S_{\Sigma} \leq S_{ном} \Rightarrow 39,5 \text{ ВА} \leq 200 \text{ ВА}$$

Апарат повністю задовольняє вимоги і буде працювати в класі точності 0,5.

						Арк.

7. ЗАХОДИ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ФАРМАЦЕВТИЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА

7.1. Обґрунтування вимог до надійності СЕП в умовах фармацевтичного виробництва

Стабільність електричного живлення є фундаментальною вимогою при проектуванні систем електропостачання (СЕП) сучасних об'єктів фармацевтичної галузі. Відповідно до міжнародних стандартів (EU GMP Annex 1: Manufacture of Sterile Medicinal Products) та вимог FDA, непередбачувана перерва у подачі енергії на таких підприємствах класифікується як критичний інцидент. Якість електричної енергії та безперервність її постачання безпосередньо впливають на безпечність, стерильність та фармакологічні властивості лікарських засобів.

Високий рівень надійності для проектного фармацевтичного заводу зумовлений наступними технологічними факторами:

1. Підтримання мікроклімату «чистих приміщень»: цехи виробництва стерильних ін'єкційних препаратів потребують безперервної роботи систем HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Зупинка цих систем навіть на декілька хвилин призводить до порушення каскаду перепадів тиску між приміщеннями різних класів чистоти, що спричиняє контамінацію (забруднення) повітряного середовища мікроорганізмами та механічними частинками.

2. Забезпечення «холодового ланцюга»: активні фармацевтичні інгредієнти (АФІ), сироватки та готові вакцини вимагають суворого дотримання температурного режиму. Відсутність живлення компресорів холодильних камер спричиняє незворотне псування дороговартісної сировини.

3. Безперервність хімічного синтезу: реактори синтезу, ферментери та системи підготовки води для ін'єкцій (WFI) вимагають постійного

						Арк.

підігріву/охолодження та перемішування. Раптова зупинка циркуляційних насосів може призвести до неконтрольованих екзотермічних реакцій або кристалізації продукту в трубопроводах.

4. Збереження даних АСУ ТП: відповідно до вимог комп'ютеризованих систем (CFR 21 Part 11), усі параметри виробництва (температура, тиск, вологість) повинні безперервно фіксуватися на серверах. Втрата живлення контролерів призводить до втрати електронних записів серії, через що партія ліків не може бути сертифікована і підлягає утилізації.

Для досягнення необхідного рівня надійності у даному проєкті розроблено трирівневу систему резервування:

1. Апаратне резервування (система мікропроцесорного АВР на вводах).
2. Автономне машинне резервування (дизельна електростанція).
3. Безперервне акумуляторне резервування (джерела безперебійного живлення з подвійним перетворенням).

7.2. Проєктування мікропроцесорної системи автоматичного вводу резерву (АВР) напругою 0,4 кВ

Для мінімізації часу перерви в живленні при аваріях на лінійних фідерах 10 кВ або силових трансформаторах, на головних розподільних щитах (ГРЩ) 0,4 кВ передбачено впровадження систем АВР. На відміну від застарілих рішень на базі електромеханічних реле напруги серії РН-53, які мають велику похибку та низьку швидкодію, у проєкті застосовано сучасні цифрові логічні контролери керування резервом (типу Lovato серії ATL).

Функціональна схема та алгоритми мікропроцесорного АВР базуються на наступних механізмах:

- Вимірювання True RMS: контролер здійснює безперервний моніторинг не лише амплітуди, але й середньоквадратичного значення напруги, а також відстежує порядок чергування фаз і коефіцієнт несиметрії на обох вводах.
- Програмована матриця затримок: для забезпечення селективності дії та відлаштування від короткочасних «просадок» напруги (під час пуску

						Арк.

потужних двигунів або коротких замикань за трансформатором), пусковий орган АВР має налаштовувати витримку часу $T_{\text{спр}} = 0,5 \dots 1,5$ с.

- Апаратно-програмні блокування: алгоритм строго забороняє вмикання секційного вимикача, якщо причиною зникнення напруги стало коротке замикання безпосередньо на збірних шинах. Додатково застосовано механічне взаємне блокування моторних приводів вимикачів, що на 100% виключає ризик зустрічного вмикання двох несинхронізованих джерел.

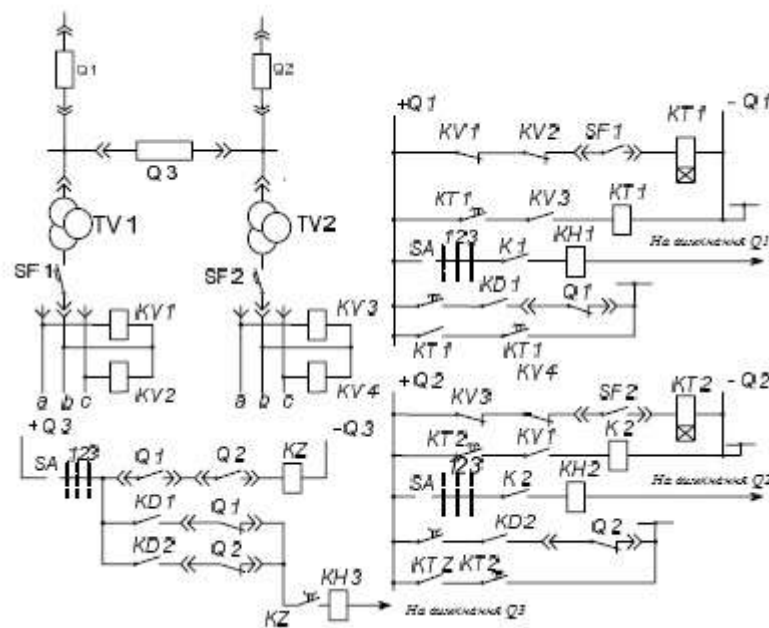


Рисунок 7.1. Алгоритмічна схема комутації ланцюгів керування АВР для двотрансформаторної підстанції

7.3. Розрахунок параметрів та вибір автономної дизельної електростанції (ДЕС)

Мікропроцесорний АВР вирішує проблему локальних аварій, проте не захищає від системних блекаутів зовнішньої енергосистеми. Для гарантованого електропостачання споживачів особливої групи, які не допускають тривалих перерв, проектом передбачено встановлення стаціонарної ДЕС.

Визначимо розрахункове навантаження технологічного обладнання, що підлягає резервуванню машинним генератором (таблиця 7.1).

Таблиця 7.1. Зведена відомість розрахункових навантажень споживачів особливої групи

№ з/п	Найменування приймачів електроенергії	Рном, кВт	К-сть (п)	Встановлена потужність, кВт	Кп	cosφ	tgφ	Рр, кВт	Qр, квар
1	Вентиляційні агрегати чистих приміщень	15	2	30	0,9	0,85	0,62	27	16,74
2	Насоси контурів охолодження реакторів	7,5	4	30	0,8	0,82	0,7	24	16,8
3	Компресори складських холодильних камер	11	2	22	0,8	0,8	0,75	17,6	13,2
4	Щити живлення АСУ ТП та серверні шафи	6	1	6	1	0,95	0,33	6	1,98
5	Аварійне освітлення та пожежна автоматика	5,5	1	5,5	1	1	0	5,5	0
	Всього в аварійному режимі (ДЕС):			93,5				80,1	48,72

Повна розрахункова потужність критичного навантаження:

$$S_{ДЕС} = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{80,10^2 + 48,72^2} = 93,75 \text{ кВА}$$

При виборі генераторної установки необхідно враховувати здатність турбованого дизельного двигуна приймати різке (східчасте) навантаження («Load Step Capability»), особливо враховуючи наявність асинхронних двигунів компресорів. Мінімальний запас потужності приймається на рівні 15%:

$$S_{ГЕН} \geq 93,75 \cdot 1,15 = 107,8 \text{ кВА}$$

До встановлення приймається дизельна електростанція Cummins C150D5 у всепогодному шумозахисному кожусі. Кожух забезпечує рівень шуму не більше 65 дБ(А) на відстані 7 метрів, що відповідає санітарним нормам для підприємств фармацевтичного профілю.

						Арк.

Таблиця 7.2. Технічні характеристики та перевірка електростанції Cummins C150D5

Параметр перевірки	Вимоги проекрованої СЕП	Дані агрегату Cummins	Висновок
Номінальна напруга, кВ	0,4	0,4	Відповідає
Повна потужність, кВА	$\geq 107,80$	136,00 (Prime)	Відповідає
Активна потужність, кВт	$\geq 80,10$	109,00 (Prime)	Відповідає
Коефіцієнт завантаження (K_3)	$K_3 \leq 0,80$	0,69	Оптимально

7.4. Впровадження систем безперебійного живлення для надкритичних споживачів

Головним недоліком будь-якої машинної електростанції є час виходу на робочий режим. Алгоритм системи автоматичного запуску генератора вимагає від 10 до 15 секунд на подачу палива, розкручування стартера та стабілізацію частоти струму.

Для надкритичних споживачів — серверів баз даних (п.4 з Табл. 7.1) та мережі пожежної автоматики з евакуаційним освітленням (п.5) — провал напруги на 15 секунд означає повне перезавантаження контролерів, зупинку мережевих комутаторів та втрату керованості підприємством.

Щоб запобігти цьому, у проєкті передбачено використання трифазного промислового джерела безперебійного живлення (ДБЖ) топології онлайн з подвійним перетворенням. Дана топологія забезпечує нульовий час (0 мс) переходу на роботу від акумуляторних батарей (АКБ) і формує ідеальну синусоїду на виході незалежно від якості вхідної мережі.

Розрахуємо потужність ДБЖ. Сумарне навантаження надкритичної групи становить:

- Сервери та АСУ ТП: $P_1 = 6,0 \text{ кВт}$, $Q_1 = 1,98 \text{ кВар}$.
- Пожежна автоматика та освітлення: $P_2 = 5,5 \text{ кВт}$, $Q_2 = 0,0 \text{ кВар}$.

Загальне активне та реактивне навантаження на ДБЖ:

						Арк.

$$P_{\text{ДБЖ}} = P_1 + P_2 = 6,0 + 5,5 = 11,5 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{ДБЖ}} = Q_1 + Q_2 = 1,98 + 0,0 = 1,98 \text{ кВар}$$

Повна потужність ДБЖ:

$$S_{\text{ДБЖ}} = \sqrt{11,5^2 + 1,98^2} = 11,66 \text{ кВА}$$

Враховуючи вимоги до масштабування ІТ-інфраструктури підприємства у майбутньому, обираємо ДБЖ із запасом потужності не менше 30%.
Необхідна потужність: $S \geq 11,66 \cdot 1,3 = 15,15 \text{ кВА}$

Приймаємо до встановлення промислове ДБЖ типу APC (Schneider Electric) серії Galaxy VS потужністю 20 кВА.

Час автономної роботи ДБЖ розраховується таким чином, щоб гарантовано перекрити час запуску ДЕС (15 секунд), а у випадку відмови запуску генератора — дати оперативному персоналу час (10-15 хвилин) на коректне збереження електронних протоколів та безаварійну програмну зупинку серверів.

Таблиця 7.3. Параметри джерела безперебійного живлення (ДБЖ)

Характеристика	Значення для APC Galaxy VS 20 kVA
Топологія роботи	Online (подвійне перетворення), час перемикання 0 мс
Номінальна повна	20 кВА (Коефіцієнт потужності PF=1,0)
Фактичне завантаження апарата	11,5 кВт/20,0 кВт·100%=57,5%
Внутрішні АКБ	VRLA (Свинцево-кислотні, що не обслуговуються)
Час автономної роботи при навантаженні 11,5 кВт	18 хвилин (повністю покриває час запуску ДЕС)

Конструктивне виконання обраного ДБЖ проілюстровано на рисунку 7.2.

						Арк.



Рисунок 7.2. Візуальне представлення обраної моделі ДБЖ

7.5. Загальний алгоритм взаємодії систем резервування при аварії

Базова конфігурація силових та контрольних кіл, що забезпечує автоматичне перемикання на автономне живлення, представлена на рисунку 7.3.

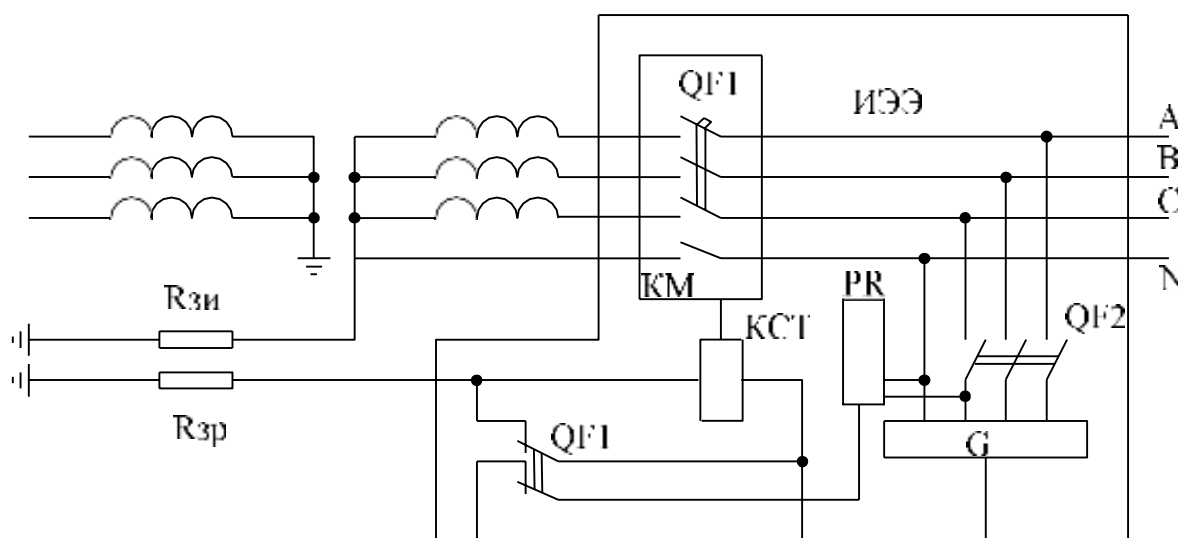


Рисунок 7.3. Принципова електрична схема комутації резервної електростанції

У нормальному режимі експлуатації (за наявності стабільної напруги від зовнішньої енергосистеми) комутаційний апарат QF2 з боку генератора перебуває у відключеному (розімкненому) стані. Водночас автоматичний вимикач робочого вводу QF1 та відповідний силовий контактор KM

замкнені. Через цей контур дизельна електростанція отримує живлення власних потреб (ВП), необхідне для підтримання в готовності систем пожежної безпеки, підзаряду батарей та підігріву. У такому стані блок-контакти мережевого вимикача QF1 розімкнуті, а пускове реле КСТ підключене між контуром робочого заземлення (Rзр) та металевим корпусом установки. У випадку аварійного знеструмлення основної мережі або виникнення короткого замикання, реле КСТ втрачає живлення та спрацьовує, формуючи керівний сигнал на негайний автоматичний запуск дизельного двигуна резервного джерела.

Логіка управління всім комплексом безпеки виглядає наступним чином:

1. *t = 0 секунд:* Зникнення напруги в міській мережі 10 кВ. Системи освітлення та АСУ ТП миттєво ($t = 0$ мс) переходять на живлення від АКБ ДБЖ. Виробничі дані зберігаються, зв'язок не втрачається.

2. *t = 2 секунди:* Контролер АВР фіксує аварію і дає команду на відключення ввідного вимикача від міста. Паралельно надсилається сухий контакт на запуск дизель-генератора Cummins.

3. *t = 15 секунд:* Генератор виходить на номінальні оберти 1500 об/хв. Напруга та частота стабілізуються (400 В, 50 Гц).

4. *t = 17 секунд:* Щит перемикання генератора вмикає свій контактор. Відновлюється живлення систем вентиляції чистих приміщень та холодильників. Паралельно ДБЖ фіксує появу напруги від генератора, припиняє розряджати свої АКБ і починає їх заряджати для підготовки до наступних аварій.

5. *Відновлення мережі:* Після повернення напруги від енергосистеми, система автоматично перемикає підприємство на основний ввід, а ДЕС переходить у режим холостого ходу для охолодження турбіни (3 хвилини), після чого зупиняється.

Реалізація такої багаторівневої концепції резервування відповідає найвищому рівню надійності "Tier III / IV" і є еталонним рішенням для сучасного фармацевтичного об'єкта.

						Арк.

7.6. Проектування системи штучного освітлення приміщення дизельної електростанції

Розрахунок освітлення технічного приміщення, в якому розташовується резервне джерело живлення, виконується із використанням методу питомої потужності. Для розміщення дизель-генератора передбачено окреме приміщення з наступними габаритами:

- довжина $L = 7,5 \text{ м}$;
- ширина $W = 3,5 \text{ м}$;
- висота $H = 4,5 \text{ м}$.

Площа приміщення становить $S = 26,25 \text{ м}^2$.

Відповідно до актуальних норм ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», нормативне значення освітленості для електрощитових та генераторних приміщень становить $E_H = 150 \text{ лк}$. З огляду на специфіку фармацевтичного виробництва та заборону використання ртутних ламп, до встановлення приймаємо сучасні пило-вологозахищені світлодіодні світильники типу ДПП 1200 мм (LED 36 Вт, 3200 лм, IP65).

Значення розрахункової питомої потужності для LED-світильників при нормі 150 лк становить $p = 4,5 \text{ Вт/м}^2$

Загальна необхідна потужність освітлювальної установки:

$$P_{\Sigma} = p \cdot S = 4,5 \cdot 26,25 = 118,1 \text{ Вт}$$

Визначаємо необхідну кількість світильників:

$$n = \frac{P_{\Sigma}}{P_{CB}} = \frac{118,1}{36,0} = 3,28 \text{ шт.}$$

Для забезпечення рівномірного освітлення приймаємо до встановлення 4 світильники ($n = 4$), які розміщуються симетрично у два ряди.

Споживаний струм освітлювальної мережі:

$$I_p = \frac{n \cdot P_{CB}}{U_{\phi} \cdot \cos \varphi} = \frac{4 \cdot 36,0}{220 \cdot 0,95} = 0,69 \text{ А}$$

Для підключення мережі освітлення обираємо вогнестійкий кабель з мідними жилами, що не поширює горіння і має низьке димовиділення —

						Арк.

ВВГнг-LS 3х1,5 мм². Переріз 1,5 мм² є мінімально допустимим для стаціонарної електропроводки за умовами механічної міцності (згідно з ПУЕ), а його тривало допустимий струм (19 А) створює багаторазовий запас надійності.

7.7. Розрахунок промислової вентиляції генераторного приміщення

Специфіка експлуатації потужних дизельних генераторів (таких як обраний Cummins C150D5) вимагає інтенсивного повітрообміну. Під час роботи двигун випромінює в навколишнє середовище до 15% теплової енергії від своєї номінальної потужності. Без ефективної системи вентиляції температура в приміщенні швидко перевищить критичні +40°C, що призведе до аварійної зупинки агрегату.

Розрахуємо необхідний об'єм припливно-витяжної вентиляції для асиміляції (видалення) надлишкових тепловиділень від двигуна та альтернатора генератора.

Тепловиділення в приміщення орієнтовно становить: $Q_{НАДЛ} = 15,0 \text{ кВт}$.

Необхідний годинний повітрообмін визначається за формулою теплового балансу:

$$L_{ПОВ} = \frac{3600 \cdot Q_{НАДЛ}}{c \cdot \rho \cdot (t_{ВНХ} - t_{ВХ})} = \frac{3600 \cdot 15,0}{1,005 \cdot 1,2 \cdot (35 - 20)} = 2985 \text{ м}^3 / \text{год}$$

де $c = 1,005 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ — теплоємність повітря; $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ — густина повітря; $\Delta t = 15 \text{ °C}$ — допустимий перепад температур.

Визначаємо аеродинамічний опір вентиляційної мережі:

Динамічна складова тиску (при швидкості повітря в коробі $v = 10 \text{ м/с}$):

$$P_{ДИН} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \frac{1,2 \cdot 10^2}{2} = 60,0 \text{ Па}$$

Статична складова тиску (опір жалюзійних решіток, повітроводів та шумоглушників) орієнтовно приймається на рівні $P_{СТ} = 385,0 \text{ Па}$.

						Арк.

Повний необхідний тиск вентилятора:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{дин}} + P_{\text{ст}} = 60,0 + 385,0 = 445,0 \text{ Па}$$

Для забезпечення заданих параметрів (продуктивність не менше 3000 м³/год, тиск 445 Па), замість застарілих моделей обираємо сучасний радіальний вентилятор ВР 80-75 №4 з трифазним асинхронним електродвигуном потужністю $N = 1,5$ кВт (частота обертання $n = 1500$ об/хв). Цей вентилятор гарантовано забезпечить охолодження електростанції навіть за умов літньої спеки.

7.8. Нормативні вимоги до оперативного персоналу з обслуговування автономних джерел

Надійність роботи резервних джерел живлення на фармацевтичному підприємстві залежить не лише від якості обладнання, але й від кваліфікації технічного персоналу. Відповідно до вимог стандарту GMP та Правил технічної експлуатації електроустановок (ПТЕЕС), до обслуговування ДЕС та систем АВР висуваються наступні суворі вимоги:

1. Кваліфікація з електробезпеки: Персонал, що здійснює оперативні перемикання або технічне обслуговування щитів управління генератором, зобов'язаний мати групу з електробезпеки не нижче IV для установок до 1000 В.

2. Дотримання процедур СОП (SOP): Усі дії з тестування генератора (щомісячні пробні запуски) повинні фіксуватися в журналах експлуатації згідно зі стандартними операційними процедурами підприємства.

3. Експлуатація дизельних установок: Працівники повинні досконало розуміти принципи роботи систем автоматики двигуна, знати порядок перевірки рівня технічних рідин (мастило, антифриз, паливо) та алгоритми дій у разі відмови системи АВР.

						Арк.

4. Процедури LOTO (Lockout/Tagout): Під час проведення регламентних або ремонтних робіт, персонал зобов'язаний використовувати систему блокування небезпечної енергії (LOTO), щоб унеможливити випадковий автоматичний запуск двигуна та подачу напруги на ремонтну ділянку.

Комплексний підхід до проєктування надійних систем електропостачання та висока кваліфікація персоналу дозволяють звести ризики аварійної зупинки фармацевтичного заводу до абсолютного мінімуму.

						Арк.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено комплексну систему електропостачання (СЕП) сучасного підприємства фармацевтичної промисловості та впроваджено спеціальні інженерні заходи для підвищення надійності живлення елементів його критичної інфраструктури.

Проектування СЕП виконано з урахуванням міжнародних стандартів Належної виробничої практики (GMP), вимог енергоефективності, безпечної експлуатації та можливостей майбутнього масштабування технологічних ліній. На початковому етапі було детально визначено електричні навантаження цехів та розроблено систему компенсації реактивної потужності, що дозволило оптимізувати пропускну здатність мереж і знизити втрати електроенергії.

На основі техніко-економічного порівняння варіантів зовнішнього електропостачання (напругами 10 кВ та 35 кВ), економічно доцільнішим визнано застосування глибокого вводу напруги 35 кВ. Для головної знижувальної підстанції підприємства обрано два силові трансформатори типу ТМН-1600/35/10 з пристроями РПН.

Внутрішньозаводська розподільна мережа 10 кВ спроектована за радіальною топологією. Для живлення технологічних цехів прийнято три двотрансформаторні підстанції, живлення яких здійснюється кабельними лініями марки ААШв-10 (3х25). На основі розрахунків струмів короткого замикання в системі відносних одиниць здійснено перевірку та вибір сучасного високовольтного обладнання, зокрема вакуумних вимикачів, мікропроцесорних захистів, обмежувачів перенапруг та вимірювальних трансформаторів.

Спеціальним питанням кваліфікаційної роботи стало розроблення концепції гарантованого та безперебійного електропостачання відповідальних споживачів фармацевтичного виробництва («чисті приміщення», реактори синтезу, холодильні камери тощо). Для цього реалізовано трирівневу систему резервування:

						Арк.
Зм.	Арк.					

- застосовано мікропроцесорні пристрої автоматичного включення резерву (АВР) на стороні 0,4 кВ;
- обґрунтовано встановлення дизельної електростанції Cummins C150D5 (136 кВА) у всепогодному шумозахисному кожусі;
- для надкритичних споживачів (сервери АСУ ТП) інтегровано промислове джерело безперебійного живлення (ДБЖ) топології Online Double Conversion з нульовим часом перемикання.

Додатково в роботі розроблено систему пило-вологозахищеного LED-освітлення та промислової припливно-витяжної вентиляції для приміщення резервного джерела живлення, що гарантує його безаварійну роботу в умовах максимальних тепловиділень.

Усі прийняті технічні рішення відповідають чинним нормативним документам (ПУЕ, ДБН, ПТЕЕС), є технічно обґрунтованими, сучасними та економічно доцільними для впровадження.

						Арк.
Зм.	Арк.					

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекоменд. 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.
2. Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств: ДСТУ-Н Б В.2.5-80-2015. – [Чинний від 2015–10–28]. – К.: Мінрегіон, 2016. – 83 с. – (Національний стандарт України).
3. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2021. – 208 с.
4. Правила улаштування електроустановок. Чинне видання, перероблене і доповнене. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 760 с.
5. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 13.02.2012 № 91 (зі змінами). Київ, 2012. 386 с.
6. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 128 с.
7. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіон України, 2013. 141 с.
8. Настанова СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2020. Лікарські засоби. Належна виробнича практика (GMP). Київ : МОЗ України, 2020. 320 с.
9. Системи електропостачання : підручник / за ред. Г. Г. Півняка. Дніпро : Національний гірничий університет, 2015. 416 с.

						Арк.
Зм.	Арк.					

10. Проектування систем електропостачання промислових підприємств : навч. посіб. / В. М. Козирський, В. В. Каплун та ін. Київ : Аграр Медіа Груп, 2014. 320 с.

11. Неклепаєв Б. М., Крючков І. П. Електрична частина електростанцій і підстанцій: Довідкові матеріали для курсового і дипломного проектування. Київ : Техніка, 2008. 404 с. (або інше доступне видання).

12. Дизельні генераторні установки серії C150D5. Технічна специфікація та керівництво з експлуатації / Cummins Power Generation. URL: <https://www.cummins.com/generators/> (дата звернення: 14.05.2026).

13. Трифазні джерела безперебійного живлення Galaxy VS. Інженерний посібник / Schneider Electric. URL: <https://www.se.com/ua/> (дата звернення: 12.05.2026).

14. Мікропроцесорні пристрої автоматичного вводу резерву (ABP) серії ATL. Каталог рішень / Lovato Electric. URL: <https://www.lovatoelectric.com/> (дата звернення: 15.05.2026).

						Арк.
Зм.	Арк.					