

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ

“ ” 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва підйомно- транспортної техніки»

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–22,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

Олександр МИХАЙЛЮК

« » 2026 р.

Керівник роботи

професор, доктор техн. наук

Сергій ОСАДЧИЙ

« » 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 ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

_____ Михайлюка Олександра Віталійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва підйомно-транспортної техніки
Design of a power supply system for an enterprise for the production of lifting and transport equipment

2. Керівник роботи Осадчий Сергій Іванович, доктор техн. наук, професор
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 03.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є проектування системи електропостачання підприємства з виробництва підйомно-транспортної техніки. Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання: 1. Провести розрахунок електричних навантажень. 2. Провести розрахунок картограми електричних навантажень. 3. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання. 4. Провести розрахунок режимів реактивної потужності системи електропостачання. 5. Здійснити вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства. 6. Провести розрахунок струмів коротких замкнень та здійснити вибір високовольтного обладнання. 7. Провести розрахунок спеціального розділу роботи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>13.04-20.04</i>	
<i>2</i>	<i>Картограма електричних навантажень</i>	<i>21.04-25.04</i>	
<i>3</i>	<i>Техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання</i>	<i>26.03-01.05</i>	
<i>4</i>	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>	<i>02.05-08.05</i>	
<i>5</i>	<i>Вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства</i>	<i>09.05-11.05</i>	
<i>6</i>	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i>	<i>12.05-18.05</i>	
<i>7</i>	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>19.05-25.05</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення презентаційної частини БКР</i>	<i>26.05-28.05</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки БКР</i>	<i>29.05-31.05</i>	

Дата видачі завдання
« ____ » _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Сергій ОСАДЧИЙ

Завдання прийнято до виконання
« ____ » _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Олександр МИХАЙЛЮК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 78 с.; 20 рис.; 20 табл.; 5 джерел

Михайлюк О. В. Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва підйомно-транспортної техніки. – Рукопис.

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

Дана кваліфікаційна робота присвячена інженерному розробленню та техніко-економічному обґрунтуванню сучасної системи електрозабезпечення промислового об'єкта – підприємства з виробництва підйомно-транспортної техніки. Головним вектором дослідження стало створення високонадійної енергетичної архітектури, що здатна гарантувати безперебійність технологічних циклів за умов змінного графіку навантажень.

У ході проектування було здійснено комплексний аудит очікуваного електроспоживання, який дозволив ідентифікувати профіль навантажень кожного виробничого вузла. На основі багатокритеріального аналізу зведених витрат обґрунтовано вибір радіальної топології мережі напругою 10 кВ та оптимізовано склад трансформаторного парку, що забезпечує раціональний баланс між капітальними інвестиціями та експлуатаційними втратами.

Розроблена гібридна схема компенсації реактивних складових потужності, що дозволяє суттєво розвантажити живлячі магістралі.

Впровадження запропонованих рішень сприяє кардинальному підвищенню енергетичної безпеки перекачувальної станції, зниженню терміну окупності обладнання та оптимізації загальних виробничих витрат підприємства.

Ключові слова: електричні навантаження, компенсація реактивної потужності, струми короткого замикання, енергоефективність.

ABSTRACT

Qualification work: 78 p.; 20 Fig.; 20 tables; 5 sources

Mykhailiuk O. Design of a power supply system for an enterprise for the production of lifting and transport equipment. – Manuscript.

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

This qualification work is devoted to the engineering development and feasibility study of a modern power supply system for an industrial facility - an enterprise for the production of lifting and transport equipment. The main vector of the research was the creation of a highly reliable energy architecture that is able to guarantee the continuity of technological cycles under conditions of a variable load schedule.

During the design, a comprehensive audit of the expected electricity consumption was carried out, which allowed identifying the load profile of each production unit. Based on a multi-criteria analysis of the aggregated costs, the choice of a radial topology of the 10 kV network was justified and the composition of the transformer park was optimized, which ensures a rational balance between capital investments and operational losses.

A hybrid scheme for compensation of reactive power components was developed, which allows for significant unloading of the supply lines.

The implementation of the proposed solutions contributes to a radical increase in the energy security of the pumping station, a reduction in the payback period of the equipment and optimization of the overall production costs of the enterprise.

Keywords: electrical loads, reactive power compensation, short-circuit currents, energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	9
1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ	9
1.2 Освітлювальні електричні навантаження.....	10
1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ	11
1.4 Графіки електричних навантажень заводу	15
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	20
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ	22
3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....	22
3.2 Схема внутрішнього електропостачання	25
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	29
4.1 Баланс реактивної потужності.....	29
4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв	30
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	33
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	34
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	34
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ.....	41
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....	43
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	44
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	45
7.1 Аналіз та вибір оптимальної методики розрахунку параметрів штучного освітлення об'єкта.....	45
7.2 Обчислення необхідної кількості світильників для системи загального освітлення	49
7.3 Розроблення цифрової моделі та обчислення параметрів освітлення машинного залу станції перекачування.....	59
7.4 Обчислення параметрів електричної мережі освітлення машинного залу перекачувальної станції.....	68
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Михайлюк О.В.			Проектування системи електропостачання підприємства з виробництва підйомно-транспортної техніки Design of a power supply system for an enterprise for the production of lifting and transport equipment	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		Осадчий С.І.					6	78
						ЦНТУ зр. ЕЕ-22		
Н. контр.		Осадчий С.І.						
Затвер.		Плешков П.Г.						

ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудівного сектору, зокрема галузі виробництва підйомно-транспортної техніки, вимагає впровадження інноваційних підходів до проектування енергетичної інфраструктури. Підприємства такого профілю характеризуються складними технологічними циклами – від енергомістких процесів зварювання масивних металоконструкцій до прецизійної механічної обробки та фінального тестування вантажопідйомних механізмів. Специфіка цих процесів формує особливий режим електроспоживання, що відрізняється значною нерівномірністю навантажень, високою часткою реактивної складової та суворими вимогами до надійності живлення автоматизованих ліній.

Проектування системи електропостачання для заводу підйомно-транспортного обладнання є багатофакторною інженерною задачею. На перший план виходить необхідність балансування між капітальними вкладеннями в обладнання та мінімізацією технологічних втрат під час експлуатації. Враховуючи наявність потужних зварювальних агрегатів, кранового обладнання та верстатних комплексів, виникає потреба у створенні гнучкої мережі, здатної нівелювати пікові навантаження та підтримувати стабільні показники якості напруги. Саме тому обґрунтування вибору живлячої напруги 10 кВ та раціональна конфігурація трансформаторних підстанцій стають фундаментом економічної стійкості всього виробничого комплексу.

Енергоефективність підприємства безпосередньо залежить від системного підходу до управління енергоресурсами. У роботі приділено значну увагу режимам реактивної потужності, оскільки індуктивний характер навантаження великої кількості електродвигунів створює додатковий баласт для мережі. Впровадження сучасних засобів компенсації дозволяє не лише розвантажити силові трансформатори, а й покращити умови роботи для чутливої мікропроцесорної техніки керування та систем числового програмного управління. Це, у поєднанні з ретельним розрахунком струмів короткого

						7

замикання, забезпечує високий рівень живучості системи в аварійних режимах та гарантує селективність спрацювання захисних апаратів.

Сучасний цех з виробництва підйомної техніки вимагає також особливого підходу до створення світлового середовища. Велика висота прольотів, наявність мостових кранів та складний рельєф металевих конструкцій, що виготовляються, створюють специфічні умови для поширення світлових потоків. Наукова частина даного проекту фокусується на цифровізації процесу проектування освітлювальних мереж. Використання методів комп'ютерного моделювання дозволяє врахувати складну геометрію цехів та оптимізувати розташування світлодіодних джерел випромінювання. Це не лише знижує витрати на освітлення, але й створює безпечні та ергономічні умови праці, що є критичним при виконанні складних складальних операцій.

Таким чином, запропонований проект є цілісним інженерним рішенням, яке інтегрує класичні канони проектування електричних мереж із передовими методами цифрової оптимізації. Кожен етап розрахунків – від визначення розрахункових навантажень до перевірки обладнання на термічну стійкість – спрямований на створення надійної, енергоефективної та безпечної системи електропостачання, яка відповідає світовим стандартам машинобудівного виробництва. Розроблені заходи забезпечують технологічну незалежність об'єкта та створюють умови для його подальшого масштабування та модернізації в умовах динамічного промислового ринку.

						8

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ

Нижче наведено зразок знаходження параметрів енергоспоживання для адміністративної будівлі в мережах до 1000 В.

$$m = \frac{P_{н.мах}}{P_{н.мін}} = \frac{30}{2} = 15$$

$$P_{зм} = P_{\Sigma} \cdot K_{в} = 303 \cdot 0,7 = 212,1 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 212,1 \cdot 0,62 = 131,5 \text{ квар}$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot P_{н\Sigma}}{P_{н.мах}} = \frac{2 \cdot 303}{30} = 20,2 \approx 20$$

Відповідно до довідкових матеріалів [1] приймаємо коефіцієнт $K_p = 1,13$.

Фінальні розрахункові показники для даного підрозділу становлять:

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 212,1 \cdot 1,13 = 239,67 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 131,5 \text{ квар}$$

Підсумкові значення всіх виконаних обчислень зведено до таблиці 1.1.

						9

Таблиця 1.1. Споживання електроенергії обладнанням до 1000 В

№	Назва підрозділу	Nсп, шт	Pmin, кВт	Pmax, кВт	Pсум, кВт	m	Kв	cosφ	tgφ	Pзм, кВт	Qзм, квар	пef	Kр	Pрозр, кВт	Qрозр, квар	Sрозр, кВА
1	Адміністративний корпус	20	2	30	303	15	0,7	0,85	0,62	212,1	131,5	20	1,13	239,67	131,5	273,37
2	Цех механічної обробки	150	1,5	250	6868	167	0,3	0,75	0,88	2060,4	1813,15	54	1,23	2534,3	1813,2	3116,1
3	Складально-механічне від.	250	0,5	150	5656	300	0,3	0,7	1,02	1696,8	1730,74	75	1,19	2019,2	1730,7	2659,44
4	Відділення лиття	100	2	20	2677	10	0,65	0,9	0,48	1740,05	835,22	100	1,07	1861,9	835,22	2040,61
5	Ділянка термічної обробки	120	5	350	7272	70	0,75	0,9	0,48	5454	2617,92	41	1,07	5835,8	2617,9	6396,08
6	Сховище металопрокату	20	1,5	20	81	13	0,3	0,7	1,02	24,3	24,79	8	1,71	41,55	27,27	49,7
7	База зберігання готових вир.	15	2,2	40	162	18	0,6	0,9	0,48	97,2	46,66	8	1,33	129,28	51,33	139,1
8	Станція перекачування	10	40	100	707	2,5	0,6	0,7	1,02	424,2	432,68	10	1,29	547,22	475,95	725,25
9	Компресорний блок	10	2	15	86	7,5	0,65	0,8	0,75	55,9	41,93	10	1,25	69,88	46,12	83,73
10	Автомобільний парк	6	2	11	26,3	5,5	0,45	0,75	0,88	11,84	10,42	5	1,67	19,77	11,46	22,85
	Всього	701	0,5	350	23838	700	0,49	0,84	0,65	11776,8	7685	135	1,09	12837	7685	14961,4

1.2 Освітлювальні електричні навантаження

Нижче продемонстровано алгоритм знаходження відповідних величин для мереж освітлення на прикладі адміністративної будівлі:

$$P_{\text{BCT}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 1022 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 16,35 \text{ кВТ}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot K_1 \cdot P_{\text{БСТ}} = 0,95 \cdot 1,0 \cdot 16,35 = 15,53 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 15,53 \cdot 0,203 = 3,15 \text{ кВар}$$

Отримані підсумкові дані щодо всіх інших об'єктів підприємства систематизовано у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Розрахункові дані систем штучного освітлення

№	Назва цеху	$F, \text{м}^2$	$P_0, \text{Вт/м}^2$	$P_{\text{вст}}, \text{кВт}$	$K_{\text{п}}$	K_1	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{р}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{р}}, \text{квар}$	$S_{\text{р}}, \text{кВА}$
1	Адміністративний корпус	1022	16	16,35	0,95	1	0,98	0,2	15,53	3,15	15,85
2	Цех механічної обробки	1620	16	25,92	0,95	1	0,98	0,2	24,62	5	25,12
3	Складально-механічне від.	2424	17	41,21	0,95	1	0,98	0,2	39,15	7,95	39,95
4	Відділення лиття	3006	16	48,1	0,95	1	0,98	0,2	45,69	9,28	46,62
5	Ділянка термічної обробки	1349	15	20,24	0,95	1	0,98	0,2	19,22	3,9	19,61
6	Сховище металопрокату	1002	15	15,03	0,95	1	0,98	0,2	14,28	2,9	14,57
7	База зберігання готових виробів	1091	15	16,37	0,95	1	0,98	0,2	15,55	3,16	15,87
8	Станція перекачування	654	14	9,16	0,6	1	0,98	0,2	5,49	1,11	5,6
9	Компресорний блок	452	12	5,42	0,6	1	0,98	0,2	3,25	0,66	3,32
10	Автомобільний парк	1681	16	26,9	0,95	1	0,98	0,2	25,55	5,19	26,07
11	Заводська площадка	83143	0,1	8,31	1	1	0,98	0,2	8,31	1,69	8,48
	Всього			233					216,6	44	221,1

1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ

Результати розрахунків навантажень вище 1000 В показані в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	$N_{\text{спож}}$ шт	$P_{\text{одн.сп.}}$		$P_{\text{сум,}}$ кВт	m	$K_{\text{в}}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	Сер. зм. нав.		$n_{\text{еф}}$	$K_{\text{р}}$	Розрах. навантаж.		
		мін, кВт	мак, кВт						$P_{\text{зм,}}$ кВт	$Q_{\text{зм,}}$ квар			$P_{\text{розр,}}$ кВт	$Q_{\text{розр,}}$ квар	$S_{\text{розр,}}$ кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ТП1,2															
Цех механічної обробки															
силове:	150	1,5	250	6868	167	0,3	0,75	0,88	2060,4	1813,15	54	1,23	2534,29	1813,15	3116,1
освітлювальне:									25,92				24,62	5	
Всього:									2086,32	1817,1			2567,66	1822,1	3148,48
Відділення лиття															
силове:	100	2	20	2677	10	0,65	0,9	0,48	1740,05	835,22	100	1,07	1861,85	835,22	2040,61
освітлювальне:									48,1				45,69	9,28	
Всього:									1787,82	842,58			1899,48	851,85	2081,74
Сховище металопрокату															
силове:	20	1,5	20	81	13	0,3	0,7	1,02	24,3	24,79	8	1,71	41,55	27,27	49,7
освітлювальне:									15,03				14,28	2,9	
Всього:									39,27	24,72			55,81	30,1	63,41
Всього по ТП1,2:															
силове:	270	1,5	250	9625,3	166,7	0,4	0,82	0,7	3824,37	2684,41	76	1,15	4403,4	2684,41	5157,13
освітлювальне:									89,04				84,6	17,17	
БК 0,4 кВ										-2973,44				-2973,44	
Всього 0.4 кВ ТП1, 2:									3913,41	-289,03			4488	-271,86	4496,23
Втрати в ТП:													45,58	256,05	
Нтр: 4															
Стр, кВА: 1600															
$K_{\text{з}} = 0,71$															
Всього 10 кВ ТП1,2:													4533,58	-15,82	4533,61
ТП3															
Адміністративний корпус															
силове:	20	2	30	303	15	0,7	0,85	0,62	212,1	131,5	20	1,13	239,67	131,5	273,37
освітлювальне:									16,35				15,53	3,15	
Всього:									228,45	131,45			255,94	134,6	289,18
Складально-механічне від.															

Продовження табл. 1.3

силове:	250	0,5	150	5656	300	0,3	0,7	1,02	1696,8	1730,74	75	1,19	2019,19	1730,74	2659,44
освітлювальне:									41,21				39,15	7,95	
Всього:									1738,01	1731,08			2066,75	1739,03	2701,05
Всього по ТПЗ:															
силове:	270	0,5	150	5959	300	0,32	0,72	0,98	1908,9	1862,53	79	1,18	2251,65	1862,53	2922,15
освітлювальне:									57,56				54,68	11,1	
БК 0,4 кВ										-1995,76				-1995,76	
Всього 0,4 кВ ТПЗ:									1966,46	-133,23			2306,34	-122,13	2309,57
Втрати в ТП:													23,68	132,78	
Нтр: 2															
Стр, кВА: 1600															
Кз = 0,72															
Всього 10 кВ ТПЗ:													2330,02	10,66	2330,05
ТП4,5,6															
Ділянка термічної обробки															
силове:	120	5	350	7272	70	0,75	0,9	0,48	5454	2617,92	41	1,07	5835,78	2617,92	6396,08
освітлювальне:									20,24				19,22	3,9	
Всього:									5474,24	2641,49			5842,28	2645,4	6413,3
База зберігання готових вир.															
силове:	15	2,2	40	162	18	0,6	0,9	0,48	97,2	46,66	8	1,33	129,28	51,33	139,1
освітлювальне:									16,37				15,55	3,16	
Всього:									113,32	46,95			144,57	54,8	154,61
Станція перекачування															
силове:	10	40	100	707	2,5	0,6	0,7	1,02	424,2	432,68	10	1,29	547,22	475,95	725,25
освітлювальне:									9,16				5,49	1,11	
Всього:									433,36	432,77			551,88	477,16	729,56
Компресорний блок															
силове:	10	2	15	86	7,5	0,65	0,8	0,75	55,9	41,93	10	1,25	69,88	46,12	83,73
освітлювальне:									5,42				3,25	0,66	
Всього:									61,24	41,85			72,74	46,7	86,45
Автомобільний парк															
силове:	6	2	11	26,3	5,5	0,45	0,75	0,88	11,84	10,42	5	1,67	19,77	11,46	22,85
освітлювальне:									26,9				25,55	5,19	

Продовження табл. 1.3

Всього:									38,7	10,42			45,25	16,64	48,22
Заводська площадка															
освітлювальне:									8,31				8,31	1,69	
Всього:									8,31	0			8,31	1,69	8,48
Всього по ТП4,5,6:															
силове:	161	2	350	8252,7	175	0,73	0,89	0,53	6042,78	3173,5	47	1,07	6464,98	3173,5	7201,88
освітлювальне:									86,4				77,39	15,71	
БК 0,4 кВ										-2030,1				-2030,1	
Всього 0,4 кВ ТП4,5,6:									6129,17	1143,4			6542,37	1159,11	6644,25
Втрати в ТП:													66,95	376,47	
Нтр: 6															
Стр, кВА: 1600															
Кз = 0,70															
Всього 10 кВ ТП4,5,6:													6609,32	1535,57	6785,35
Всього по об'єкту															
силове:	701	0,5	350	23837	700	0,49	1	0,06	11776,04	721,14	135	1,09	12798,57	721,14	12818,87
освітлювальне:									233				216,67	43,98	
Всього:									12009,04	721,14			13015,23	765,12	13037,71
Потужність КП 0,4 кВ:										-6999,3				-6999,3	
Втрати в трансформаторах:													136,22	765,3	
Всього по об'єкту:													13151,45	1530,41	13240,2
Високовольтне навантаження															
АД1,2	2	750	750	1515	0,75	0,85	0,62	1136	704,18			1136	704,18	1336,77	
Всього високовольтного навантаження:									1136,25	704,18			1136,25	704,18	1336,77
Всього по об'єкту 10 кВ:									14287,7	2234,59			14287,7	2234,59	14461,39
КП 10 кВ:										-202				-202	
Всього 10 кВ з КП:									14287,7	2032,59			14287,7	2032,59	14431,56
tgf = 0,143															

1.4 Графіки електричних навантажень заводу

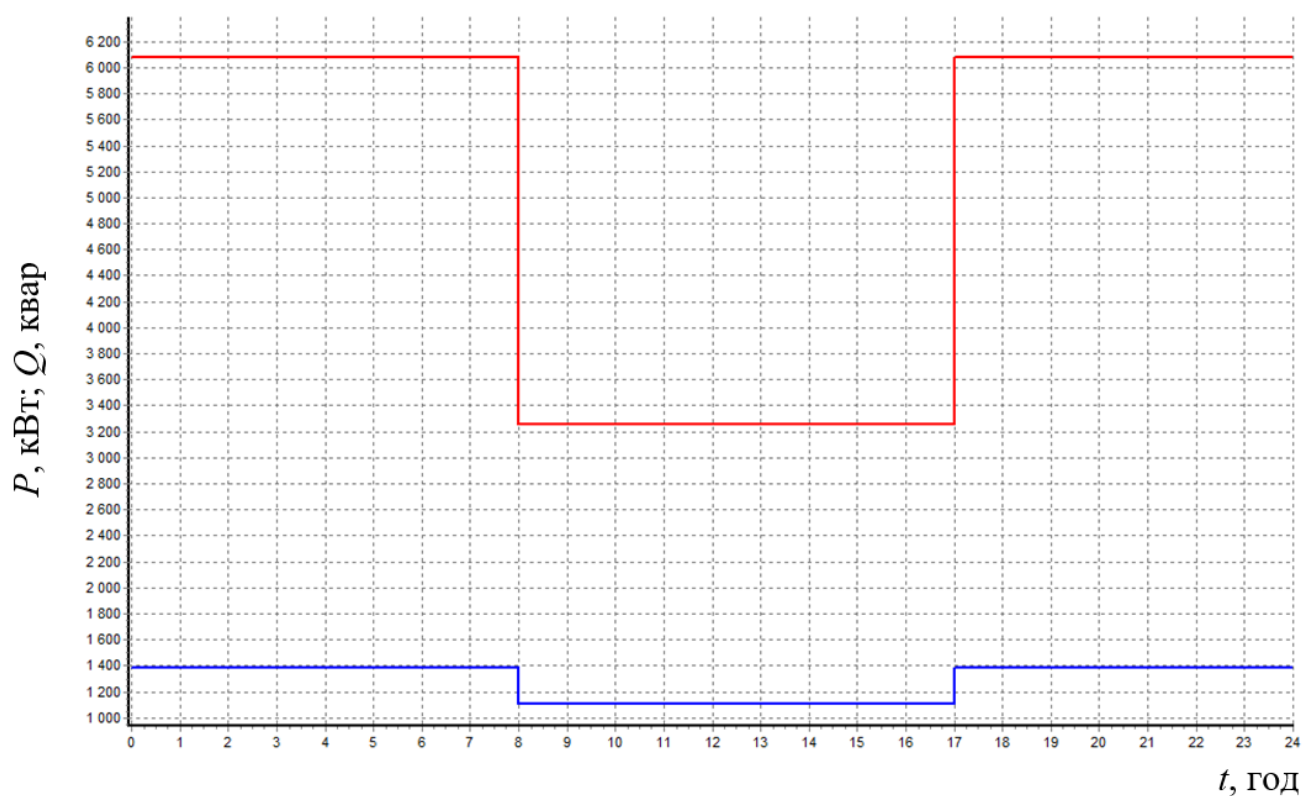
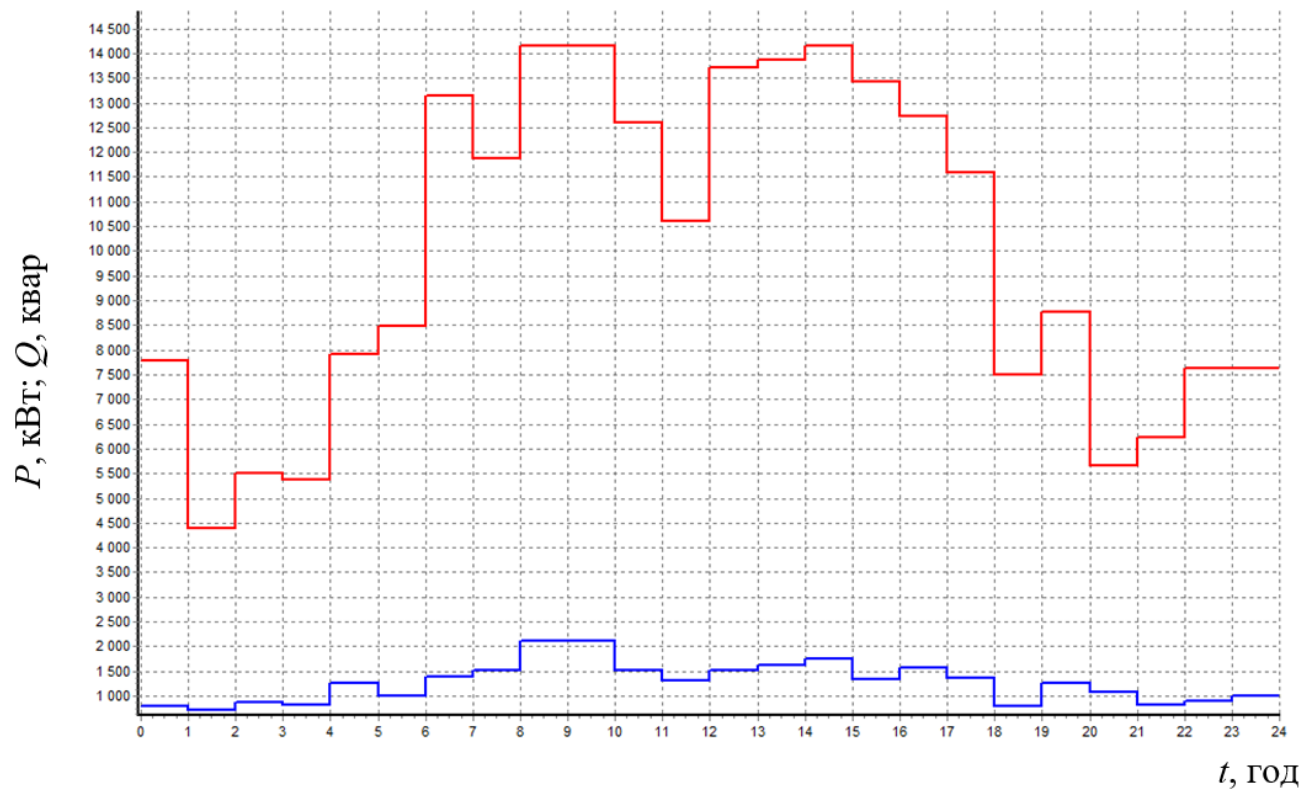
Результати розрахунку графіків навантажень приведено нижче.

Таблиця 1.4. Дані у % для розрахунку графіків

№	Pp , %	Qp , %	Pg , %	Qg , %
1	55,6	37,4	43,5	65,7
2	31,3	34,4	43,5	65,7
3	39,4	41,5	43,5	65,7
4	38,4	39,4	43,5	65,7
5	56,6	60,7	43,5	65,7
6	60,7	47,5	43,5	65,7
7	94	65,7	43,5	65,7
8	84,9	72,8	43,5	65,7
9	100	100	23,3	52,6
10	100	100	23,3	52,6
11	90	72,8	23,3	52,6
12	75,8	62,7	23,3	52,6
13	98,1	72,8	23,3	52,6
14	99,1	76,8	23,3	52,6
15	100	83,9	23,3	52,6
16	96	63,7	23,3	52,6
17	91	74,8	23,3	52,6
18	82,9	64,7	43,5	65,7
19	53,6	37,4	43,5	65,7
20	62,7	59,6	43,5	65,7
21	40,4	51,6	43,5	65,7
22	44,5	39,4	43,5	65,7
23	54,6	42,5	43,5	65,7
24	54,6	47,5	43,5	65,7

Таблиця 1.5. Результати розрахунків доб. графіків

№	зима (робочі) Р, кВт	зима (робочі) Q, квар	зима (робочі) S, кВА	зима (вихідні) Р, кВт	зима (вихідні) Q, квар	зима (вихідні) S, кВА	літо (робочі) Р, кВт	літо (робочі) Q, квар	літо (робочі) S, кВА	літо (вихідні) Р, кВт	літо (вихідні) Q, квар	літо (вихідні) S, кВА
1	7858	793	7898	6143	1393	6298	6679	674	6713	5222	1184	5354
2	4429	728	4488	6143	1393	6298	3764	619	3815	5222	1184	5354
3	5572	879	5641	6143	1393	6298	4736	747	4794	5222	1184	5354
4	5429	836	5492	6143	1393	6298	4615	710	4669	5222	1184	5354
5	8000	1286	8103	6143	1393	6298	6800	1093	6887	5222	1184	5354
6	8572	1007	8630	6143	1393	6298	7286	856	7337	5222	1184	5354
7	13287	1393	13359	6143	1393	6298	11294	1184	11355	5222	1184	5354
8	12001	1543	12100	6143	1393	6298	10201	1312	10285	5222	1184	5354
9	14286	2143	14446	3286	1114	3469	12143	1822	12280	2793	947	2949
10	14286	2143	14446	3286	1114	3469	12143	1822	12280	2793	947	2949
11	12715	1543	12808	3286	1114	3469	10808	1312	10888	2793	947	2949
12	10715	1329	10797	3286	1114	3469	9107	1129	9177	2793	947	2949
13	13858	1543	13944	3286	1114	3469	11780	1312	11852	2793	947	2949
14	14001	1629	14096	3286	1114	3469	11901	1385	11981	2793	947	2949
15	14286	1779	14397	3286	1114	3469	12143	1512	12237	2793	947	2949
16	13572	1350	13639	3286	1114	3469	11536	1147	11593	2793	947	2949
17	12857	1586	12954	3286	1114	3469	10929	1348	11012	2793	947	2949
18	11715	1372	11795	6143	1393	6298	9958	1166	10025	5222	1184	5354
19	7572	793	7613	6143	1393	6298	6436	674	6471	5222	1184	5354
20	8858	1265	8948	6143	1393	6298	7529	1075	7605	5222	1184	5354
21	5715	1093	5819	6143	1393	6298	4857	929	4945	5222	1184	5354
22	6286	836	6342	6143	1393	6298	5343	710	5390	5222	1184	5354
23	7714	900	7767	6143	1393	6298	6558	766	6602	5222	1184	5354
24	7714	1007	7780	6143	1393	6298	6558	856	6613	5222	1184	5354



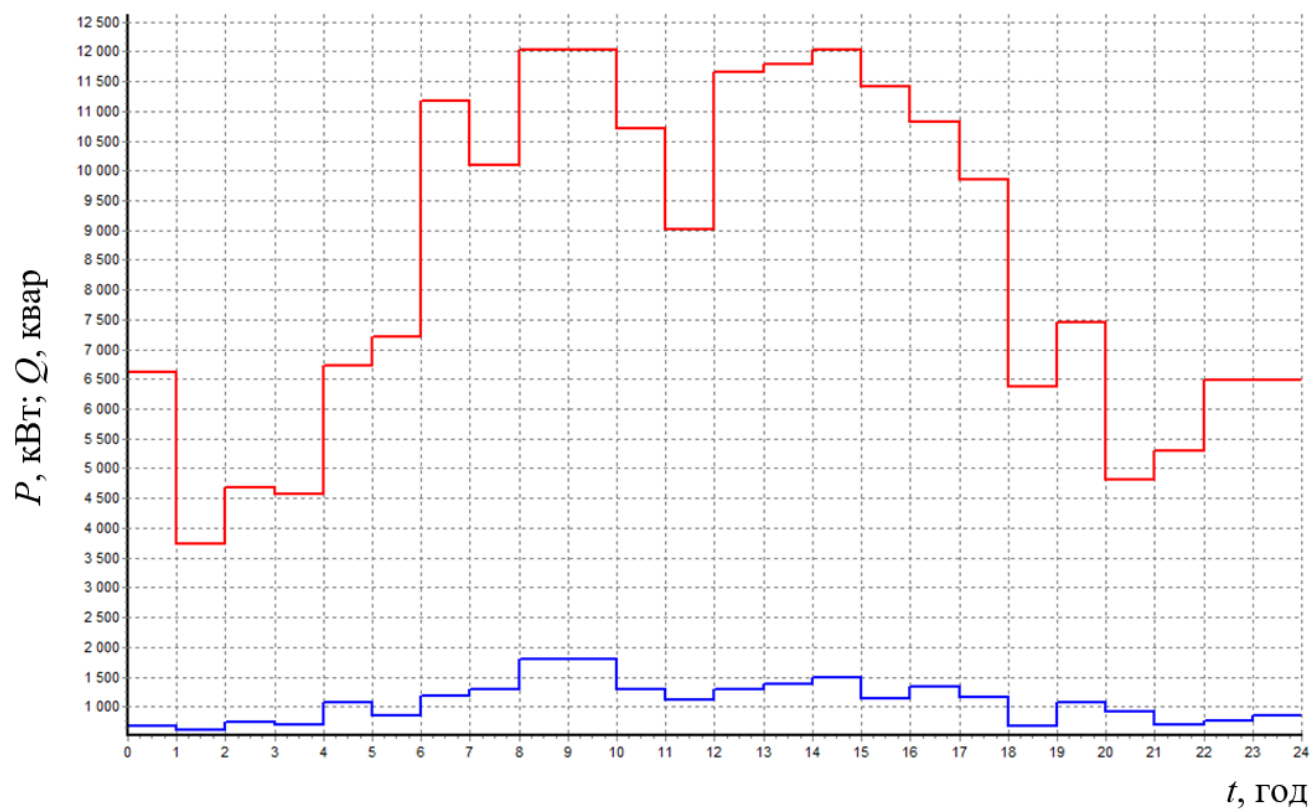


Рис. 1.3. Дієві графіки (робочі, літо)

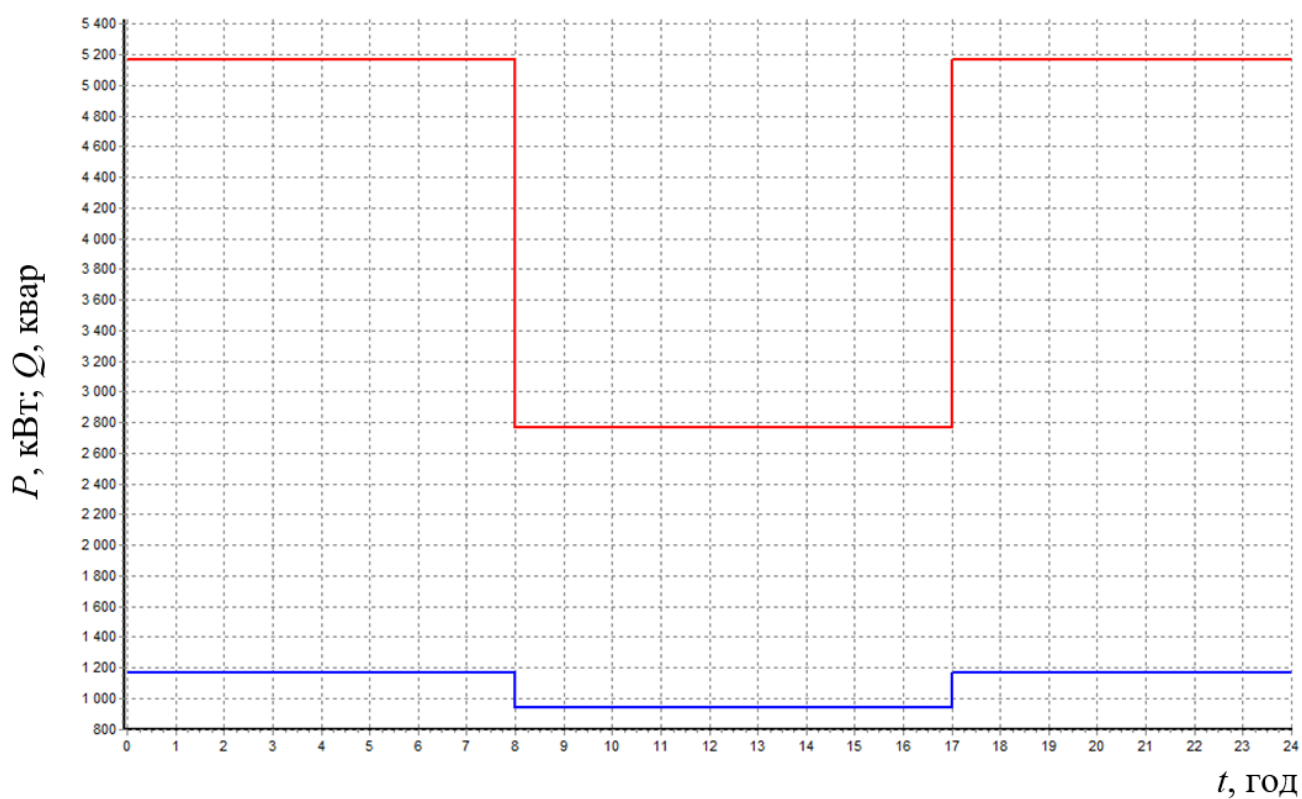
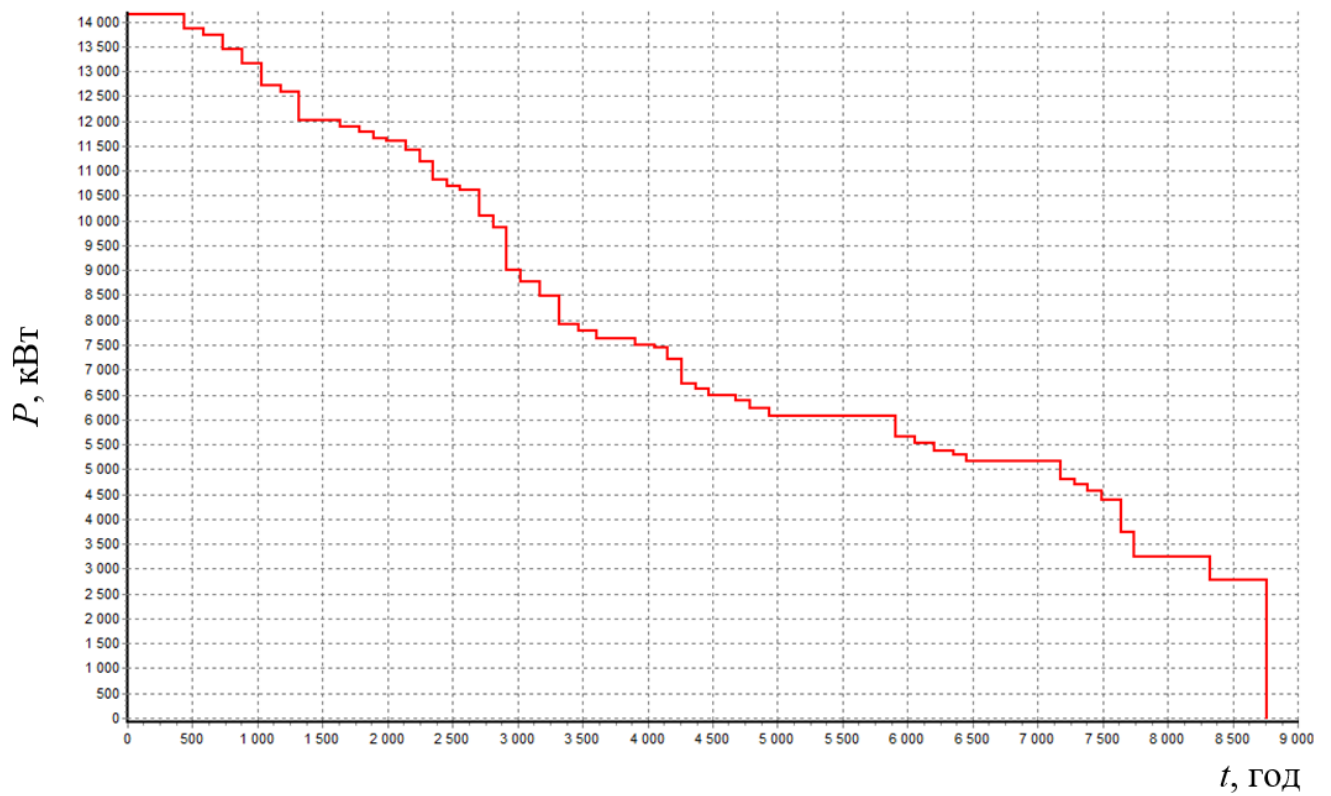


Рис. 1.4 Дієві графіки (вихідні, літо)

Рис. 1.5. Річний графік за тривалістю



Таблиця 1.6. Результати розрахунку добових та річних графіків навантажень

№	Назва параметру	Знач.	Од. вим.
1	$S_{\text{розр}}$	14460,62	МВА
2	$W_{\text{з.р.}}$	35506088	кВт·год
3	$V_{\text{з.р.}}$	4528509	квар·год
4	$W_{\text{з.в.}}$	7919118	кВт·год
5	$V_{\text{з.в.}}$	2011668	квар·год
6	$W_{\text{л.р.}}$	21557214	кВт·год
7	$V_{\text{л.р.}}$	2749521	квар·год
8	$W_{\text{л.в.}}$	4961066	кВт·год
9	$V_{\text{л.в.}}$	1262796	квар·год
10	$W_{\text{річн.}}$	69943486	кВт·год
11	$V_{\text{річн.}}$	10552494	квар·год
12	$T_{\text{м}}$	4946	год
13	$\tau_{\text{м}}$	3330	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Зразок обчислення параметрів для елементів картограми на прикладі адміністративного корпусу:

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{239,67 + 15,53}{3,14 \cdot 0,3}} = 16,46 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}} \cdot 360^\circ}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{15,53 \cdot 360^\circ}{239,67 + 15,53} = 21,9^\circ$$

Аналогічні обчислення параметрів для всіх інших підрозділів підприємства зведено до таблиці 2.1.

Координати умовного центру електричних навантажень (ЦЕН):

$$X_0 = \frac{\sum_{j=1}^m X_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{2936737,74}{14647,64} = 200,49 \text{ м}$$

$$Y_0 = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{1744784,95}{14647,64} = 119,11 \text{ м}$$

						20

Таблиця 2.1. Розрахункові параметри для побудови картограми навантажень

№	Назва підрозділу	Р _{сил} , кВт	Р _{осв} , кВт	Р ₁ , кВт	m	R, мм	α, град	x, м	y, м	Р ₁ ·x, кВт·м	Р ₁ ·y, кВт·м
1	Адміністративний корпус	239,67	15,53	255,2	0,3	16,46	21,91	18,2	123,2	4644,64	31440,64
2	Цех механічної обробки	2534,29	24,62	2558,91	0,3	52,12	3,46	31,3	194,9	80093,88	498731,56
3	Складально-механічне від.	2019,19	39,15	2058,34	0,3	46,75	6,85	48,5	44,4	99829,49	91390,3
4	Відділення лиття	1861,85	45,69	1907,54	0,3	45	8,62	188,9	208,1	360334,31	396959,07
5	Ділянка термічної обробки	5835,78	19,22	5855	0,3	78,84	1,18	289,9	80,8	1697364,5	473084
6	Сховище металопрокату	41,55	14,28	55,83	0,3	7,7	92,08	309,1	190,9	17257,05	10657,94
7	База зберігання готових вир.	129,28	15,55	144,83	0,3	12,4	38,65	136,4	40,4	19754,81	5851,13
8	Станція перекачування	547,22	5,49	552,71	0,3	24,22	3,58	370,7	201	204889,6	111094,71
9	Компресорний блок:										
	0,4 кВ	69,88	3,25	73,13	0,3	8,81	16	374,7	109,1	27401,81	7978,48
	АД 10,5 кВ	1136,25	0	1136,25	0,3	34,73	0	374,7	109,1	425752,88	123964,88
10	Автомобільний парк	19,77	25,55	45,32	0,3	6,94	202,96	370,7	52,5	16800,12	2379,3
11	Заводська площадка	0	8,31	8,31	0,3	2,97	360	289,9	80,8	2409,07	671,45
	Всього по об'єкту	14434,7	216,64	14651,37						2956532,2	1754203,5

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ

3.1 Схема зовнішнього електропостачання

Промисловий об'єкт має можливість отримувати напругу від районної ПС 35/10 кВ, яка розташована на віддаленні семи кілометрів. З огляду на це, раціонально проаналізувати два можливих рішення:

1. Прокладання підземних кабельних магістралей (КЛ) 10 кВ.
2. Спорудження повітряної лінії (ПЛ) класу 35 кВ.

Розгляд першого варіанта (кабельні лінії 10 кВ).

Визначення максимального струмового навантаження для лінії:

$$I_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{розр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{14460,62}{\sqrt{3} \cdot 10} = 834,88 \text{ A}$$

Приймаємо до встановлення 4 паралельні кабелі марки АСБ-10(3х240).

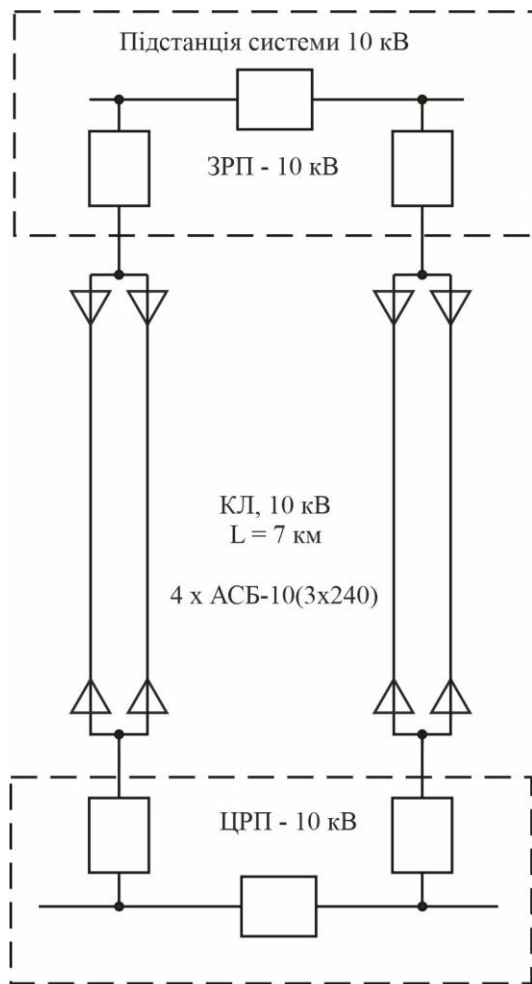
Перевірка параметрів вибраних провідників:

$$I_{\text{н.р.}} = \frac{I_{\text{розр}}}{4} = \frac{834,88}{4} = 208,72 \text{ A}$$

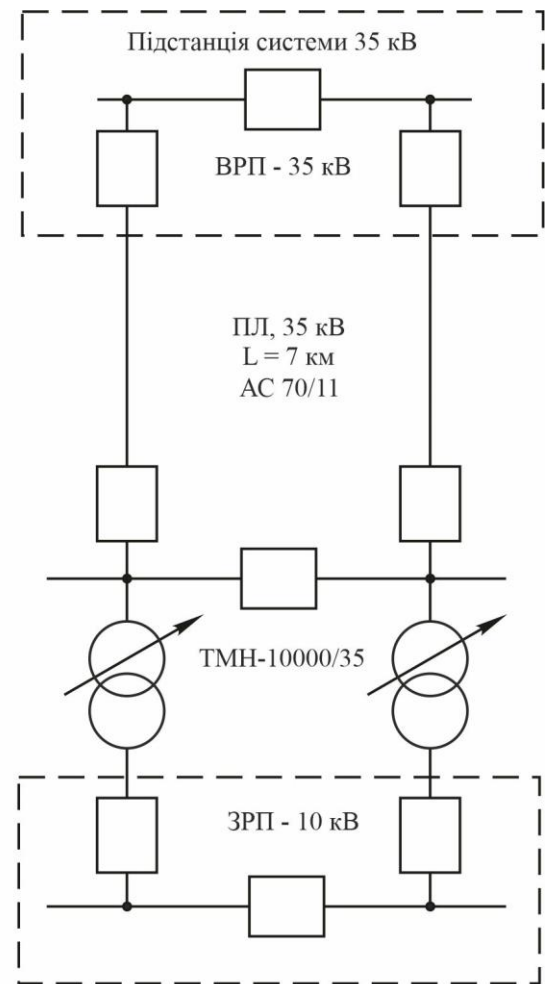
$$I_{\text{н.р.}} \leq K_{\text{п}} \cdot I_{\text{д}} = 0,84 \cdot 355 = 298,2 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав.р.}} = 2 \cdot I_{\text{н.р.}} = 2 \cdot 208,72 = 417,44 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав.р.}} \leq K_{\text{а.п.}} \cdot K_{\text{п}} \cdot I_{\text{д}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 355 = 443,75 \text{ A}$$



а)



б)

Рис. 3.1. Конфігурації мереж зовнішнього енергозабезпечення

Отже, обрані кабелі повністю відповідають усім експлуатаційним умовам.

Розрахунок техніко-економічних показників:

$$K_{\text{зав}} = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{208,72}{355} = 0,588 \approx 0,59$$

$$\Delta P_{\text{л}} = 24 \cdot 28 \cdot 0,3457 = 232,31 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{втр.кл}} = \Delta P_{\text{кл}} \cdot \tau_{\text{м}} = 116,16 \cdot 3330 = 386812,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$C_{\text{втр}} = \Delta W_{\text{втр.кл}} \cdot 8,87 \cdot 0,001 = 386812,8 \cdot 8,87 \cdot 0,001 = 3431,03 \text{ тис. грн.}$$

Таблица 3.1. Розрахунок капвкладень в мережу

Найменування складової мережі	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за од., тис. грн	Загальна сума, тис. грн
Кабельна лінія 10 кВ	км	28	58,70	1643,6
Земляна траншея	км	7	14,50	101,5
Комірки КРП типу КУ-10	шт.	2	10,85	21,7
Всього				1766,8

Таблиця 3.2. Поточні витрати мережі

Найменування складової мережі	Кј, тис. грн.	Рај, %	Сај, тис. грн.	Реј, %	Сеј, тис. грн.	Сј, тис. грн.
Кабельна лінія 10 кВ	1643,6	5	82,18	5	82,18	164,36
Земляна траншея	101,5	5	5,08	5	5,08	10,15
Комірки КРП типу КУ-10	21,7	15	3,26	5	1,09	4,35
						178,86

Обчислення інтегрального показника витрат:

$$3 = E_{\text{н}} \cdot K + C + C_{\text{втр}} + 36 = 0,12 \cdot 1766,8 + 178,86 + 3431,03 + 19,07 = 3840,98 \text{ тис. грн.}$$

Результати обчислень для альтернативного (другого) проектного рішення систематизовано та наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Співставлення техніко-економічних характеристик варіантів зовнішнього електрозабезпечення

Назва показника	Варіант 1	Варіант 2
Капітальні інвестиції, тис. грн	1766,8	2599,3
Річні поточні витрати, тис. грн	178,86	471,73
Грошовий еквівалент енергетичних втрат, тис. грн	3431,03	11537,52
Очікуваний збиток, тис. грн	19,07	11,71
Сумарні зведені витрати, тис. грн	3840,98	12332,88

Проведений порівняльний аналіз демонструє, що перша схема електропостачання характеризується суттєво меншими зведеними витратами. З

огляду на економічну доцільність, для подальшої реалізації обираємо саме перший варіант.

3.2 Схема внутрішнього електропостачання

Система внутрішньозаводського електропостачання є ключовою артерією будь-якого промислового об'єкта, від якої безпосередньо залежить безперебійність технологічних процесів, безпека персоналу та загальна економічна ефективність виробництва. При проектуванні даної системи необхідно враховувати низку критичних факторів: категорію надійності електроприймачів, територіальне розміщення цехів, характер навколишнього середовища у виробничих приміщеннях (наявність пилу, вологи, агресивних хімічних речовин), а також перспективи подальшого розширення чи модернізації підприємства.

На основі аналізу генплану заводу, специфіки технологічного обладнання (наявність потужних споживачів у термічному та ливарному цехах, розгалуженої мережі верстатів у механічному цеху) для побудови системи внутрішнього електропостачання приймається рішення про застосування радіальної схеми.

Радіальна схема характеризується тим, що передача електричної енергії від джерела живлення (головної знижувальної підстанції або цехових трансформаторних підстанцій) до розподільних пунктів (РП), силових шаф (ШР) або безпосередньо до потужних електроприймачів здійснюється відокремленими лініями. На відміну від магістральних схем, де на одну лінію "нанизується" група споживачів, радіальна конфігурація забезпечує індивідуальне або групове живлення з єдиного центру.

Вибір на користь радіальної топології мережі продиктований наступним комплексом вагомих техніко-експлуатаційних переваг:

- максимальна селективність і надійність захисту: це одна з найголовніших переваг. При виникненні короткого замикання, перевантаження або пробою ізоляції на певній ділянці мережі, спрацьовує комутаційний апарат (автоматичний вимикач або запобіжник), який захищає виключно цю

конкретну відхідну лінію. Всі інші споживачі, підключені до інших радіальних ліній від того ж джерела, продовжують працювати у штатному режимі, навіть не відчуючи перепадів напруги. У магістральних схемах аварія часто призводить до знеструмлення всього ланцюга споживачів.

- висока оперативність локалізації та усунення пошкоджень: оскільки кожна лінія має чітко визначену трасу та живить конкретний вузол, черговому електротехнічному персоналу значно легше ідентифікувати місце аварії. Немає необхідності проводити складні послідовні перевірки всієї магістралі. Це критично важливо для мінімізації часу простою технологічного обладнання.
- стабільність і простота налаштування релейного захисту та автоматики (РЗА): у радіальних мережах напрямок потоку потужності завжди односпрямований – від джерела до споживача. Це виключає виникнення складних перетоків потужності та значно спрощує розрахунок струмів короткого замикання. Відповідно, вибір уставок спрацьовування захисних апаратів стає простішим, а їхня робота – більш надійною та передбачуваною.
- простота конструктивного виконання та зручність експлуатації: радіальна топологія є інтуїтивно зрозумілою. Вона дозволяє зручно організувати диспетчерське управління, оскільки всі комутаційні апарати зосереджені в одному місці (на щиті низької напруги ТП або головному розподільному щиті). Це спрощує проведення планово-попереджувальних ремонтів, зняття показників лічильників та оперативні перемикання.
- гнучкість у просторовому плануванні та адаптивність до агресивних середовищ: радіальна схема ідеально підходить для цехів із важкими умовами середовища (наприклад, ливарний або термічний цехи). Вона дозволяє винести чутливі розподільні пристрої та комутаційну апаратуру в окремі чисті, сухі та вентильовані електрощитові приміщення, а безпосередньо до робочих місць підвести лише радіальні кабелі.

- ізоляція споживачів зі специфічними характеристиками: радіальна схема дозволяє легко розділити живлення приймачів, що створюють перешкоди в мережі (наприклад, зварювальні трансформатори, потужні двигуни з важким пуском), від споживачів, чутливих до якості електроенергії (системи ЧПУ, освітлювальні мережі, обчислювальна техніка заводууправління).

Незважаючи на значні переваги, радіальна схема не позбавлена певних недоліків, які були враховані та мінімізовані на етапі проектування:

1. Підвищені капітальні витрати на матеріали: реалізація радіальної схеми вимагає значно більшої кількості кабельно-провідникової продукції порівняно з магістральною. До кожного РП необхідно тягнути окремий кабель від підстанції.

2. Збільшення кількості комутаційної апаратури: на розподільному щиті джерела живлення потрібно встановлювати окремий автоматичний вимикач або роз'єднувач для кожної відхідної лінії, що збільшує габарити щитів і їхню вартість.

3. Вразливість одиночних ліній: при використанні однопроменевої (нерезервованої) радіальної схеми, пошкодження кабелю призводить до повного відключення підключеного до нього РП на час ремонту.

Для нейтралізації вразливості одиночних ліній та забезпечення необхідної категорії надійності для критично важливих споживачів (наприклад, насосної станції, компресорної, систем вентиляції термічного цеху), застосовано двопроменеву (резервовану) радіальну схему. У цьому випадку розподільний пункт живиться двома паралельними взаєморезервними кабельними лініями, підключеними до різних секцій шин трансформаторної підстанції. На вводах таких РП передбачено пристрої автоматичного вмикання резерву (АВР).

Щодо економічних витрат, то підвищені початкові капіталовкладення на кабелі та апаратуру повністю окупаються в процесі експлуатації за рахунок зниження збитків від недовипуску продукції, оскільки аварійні простой локалізуються і усуваються набагато швидше, ніж у розгалужених магістральних мережах.

Враховуючи вимоги до надійності живлення промислових механізмів, необхідність чіткої локалізації пошкоджень у розгалуженій структурі підприємства та забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу, застосування радіальної топології внутрішньозаводського електропостачання є найбільш технічно та економічно обґрунтованим рішенням для даного проекту. Цей компроміс між початковими витратами та високою експлуатаційною стійкістю гарантує стабільну роботу всього виробничого комплексу.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Баланс реактивної потужності

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B = 7665,57 + 741,81 + 690,24 = 9097,62 \text{ кВАп}$$

$$Q_{\text{кп}} = Q_p - Q_e = 9097,62 - 2173,34 = 6924,28 \text{ кВ}\cdot\text{А}\cdot\text{р}$$

Варіант 1. Приймаємо кількість $N=12$ шт.:

$$Q_{KH} = Q_H - Q_1 = 7665,57 - 2291,39 = 5374,18 \text{ кВ}\cdot\text{А}\cdot\text{ч}$$

						29

Результати аналогічних перерахунків для інших конфігурацій зведено до таблиці нижче.

Таблиця 4.1. Варіанти балансування реактивної потужності

№ вар.	N _T , шт.	Q1, квар	QKH, квар	QKB, квар
1	12	2291,39	5374,18	1550,10
2	13	6050,66	1614,91	5309,37
3	14	8395,19	0	6924,28

4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв

Обчислення щодо підбору компенсуючих пристроїв (КП) для різних варіантів конфігурації представлено нижче.

Таблиця 4.2. Параметри компенсації при встановленні 12 трансформаторів

№ ТП	К-ть ТР, шт	Ррозр, кВт	Qрозр, квар	Qпроп, квар	Qкомп, квар	Параметри та кількість КУ, шт · кВАр	QБКсум , квар	ΔQ, квар	Kзав	Spрозр, кВА
ТП1,2	4	4533,46	2956,99	0	2956,99	4 · 200; 4 · 540	2960	-3,01	0,71	4533,46
ТП3	2	2330,02	2006,16	0	2006,16	2 · 50; 2 · 406; 2 · 540	1992	14,16	0,73	2330,06
ТП4,5, 6	6	6607,88	3558,04	1549,82	2008,22	6 · 338	2028	-19,78	0,71	6784,94

Таблиця 4.3. Параметри компенсації при встановленні 13 трансформаторів

№ ТП	К-ть ТР, шт	Ррозр, кВт	Qрозр, квар	Qпроп, квар	Qкомп, квар	Параметри та кількість КУ, шт · кВАр	QБКсум , квар	ΔQ, квар	Kзав	Spрозр, кВА
ТП1,2	5	4533,46	2956,99	3382,01	0		0	0	0,68	5413,44
ТП3	2	2330,02	2006,16	0	2006,16	2 · 50; 2 · 406; 2 · 540	1992	14,16	0,73	2330,06
ТП4,5, 6	7	6607,88	3558,04	4363,12	0		0	0	0,67	7505,19

Зведені витрати:

$$\begin{aligned} 3 &= E_{\text{H}} \cdot (K_{\text{БКН}} + K_{\text{БКВ}} + K_{\text{ТП}}) + C_0 \cdot T_m \cdot (\Delta P_{\text{БКН}} + \Delta P_{\text{БКВ}} + \Delta P_{\text{T}}) \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,12 \cdot (1081,14 + 234,56 + 38701,08) + 8,87 \cdot 4946 \cdot (31,53 + 0,61 + 73,04) \cdot 10^{-3} = \\ &= 9416,36 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

Таблиця 4.5. Обчислення зведених витрат на систему компенсації

№	N _т , шт.	Q _{БКн} , кВт	ΔP _{БКн} , кВт	Q _{БКв} , квар	ΔP _{БКв} , кВт	R _с , Ом	ΔP _т , кВт	K _{БКн} , тис. грн.	K _{БКв} , тис. грн.	K _{ТП} , тис. грн.	З, тис. грн.
1	12	6999	31,53	202	0,61	0,04	73,04	1081,14	234,56	38701,08	9416,36
2	13	1998	8,99	5459	16,38	0,03	74,57	315,6	628,38	42113,2	9943,18
3	14	0	0	9167	27,5	0,03	64,3	0	884,22	45525,83	10105,4

Приймаємо до реалізації перший варіант.

РОЗДІЛ 5

ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ

ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Обчислення необхідних характеристик силового обладнання на прикладі першої трансформаторної підстанції (ТП-1) наведено нижче:

$$K_{\text{зав}} = \frac{S_{\text{позр}}}{n_{\text{тр}} \cdot S_{\text{ном.тр}}} = \frac{2266,73}{2 \cdot 1600} = 0,71$$

$$n_{\text{тр}} \cdot S_{\text{ном.тр}} = 2 \cdot 1600 = 3200 \text{ кВА} \geq \frac{S_{\text{позп}}}{K_1} = \frac{2266,73}{1,08} = 2098,82 \text{ кВА}$$

$$S_{\text{ном.тр}} = 1600 \text{ кВА} \geq \frac{S_{\text{позп}}}{K_{\gamma}} = \frac{2266,73}{1,4} = 1619,09 \approx 1600 \text{ кВА}$$

Аналогічні перевірочні розрахунки нормальних та аварійних режимів роботи для всіх інших вузлів живлення підприємства систематизовано у таблиці.

Таблиця 5.1. Підсумкові показники підбору трансформаторного обладнання цехів

№	К-сть тр.	$S_{\text{розр, кВА}}$	$K_{\text{зав}}$	$\frac{S_{\text{ном}}}{S_{\text{розр}}/K_1} >$	$S_{\text{ном}} > S_{\text{розр}}/K_2$
ТП-1	2	2266,73	0,71	2098,82	1619,09
ТП-2	2	2266,73	0,71	2098,82	1619,09
ТП-3	2	2330,06	0,73	2157,46	1664,33
ТП-4	2	2261,65	0,71	2094,12	1615,46
ТП-5	2	2261,65	0,71	2094,12	1615,46
ТП-6	2	2261,65	0,71	2094,12	1615,46

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Розрахунок еквівалентних опорів ділянок мережі до точки К1:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{\text{к.з.}}} = \frac{10,5^2}{100} = 1,1 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{1,103}{25} = 0,04 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{кл}} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{\text{кл}}} = \frac{0,131 \cdot 7}{2} = 0,458 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{\text{кл}}} = \frac{0,076 \cdot 7}{2} = 0,266 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{К1}} = X_c + X_{\text{кл}} = 1,103 + 0,266 = 1,369 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{К1}} = R_c + R_{\text{кл}} = 0,044 + 0,458 = 0,502 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{К1}} = \sqrt{R_{\text{К1}}^2 + X_{\text{К1}}^2} = \sqrt{0,502^2 + 1,369^2} = 1,458 \text{ Ом}$$

Значення струмів КЗ у розрахунковій точці К1 (на шинах 10 кВ РП):

$$I_{\text{К1(c)}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{К1}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,458} = 4,16 \text{ кА}$$

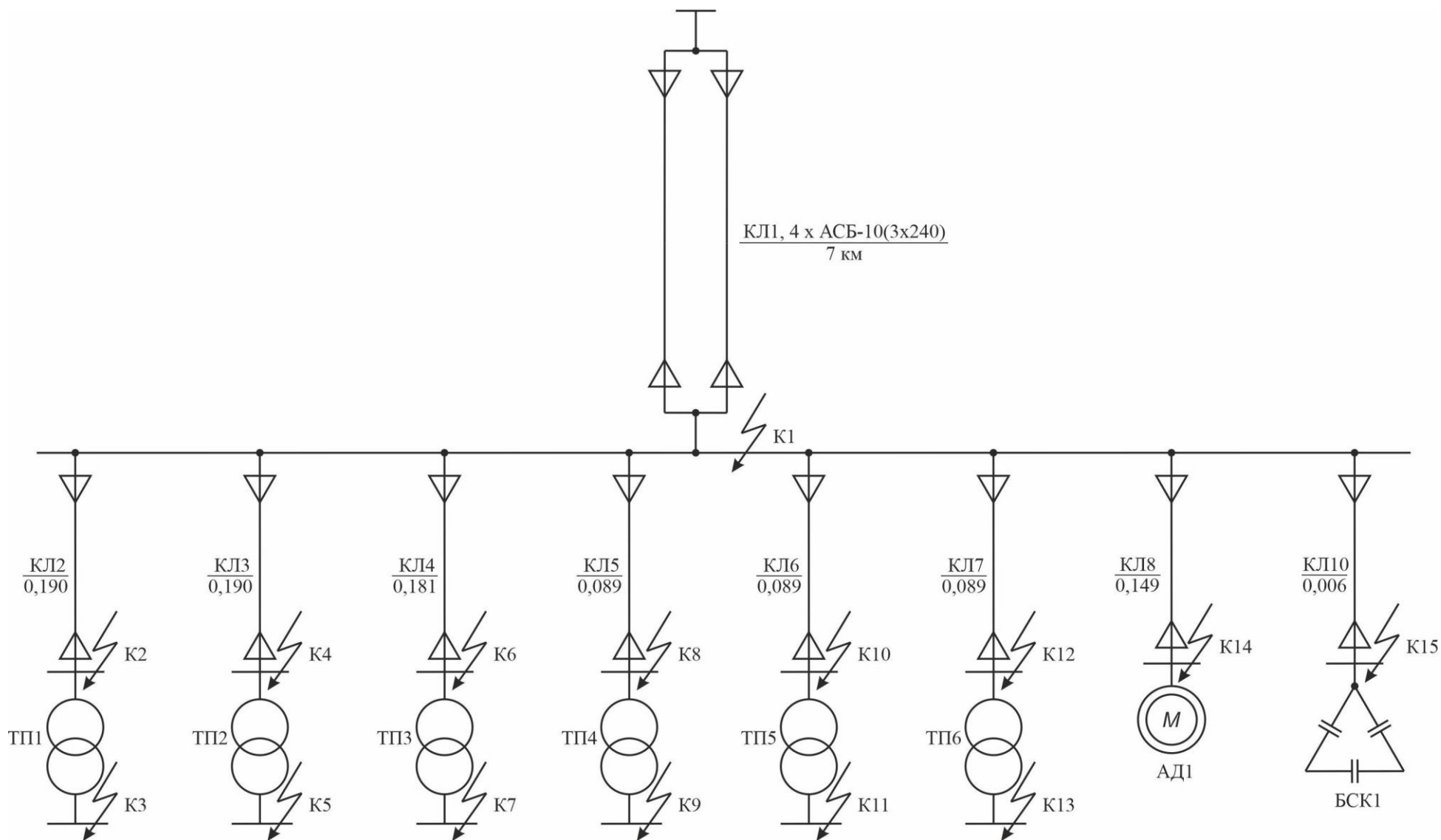


Рис. 6.1. Розрахункова схема

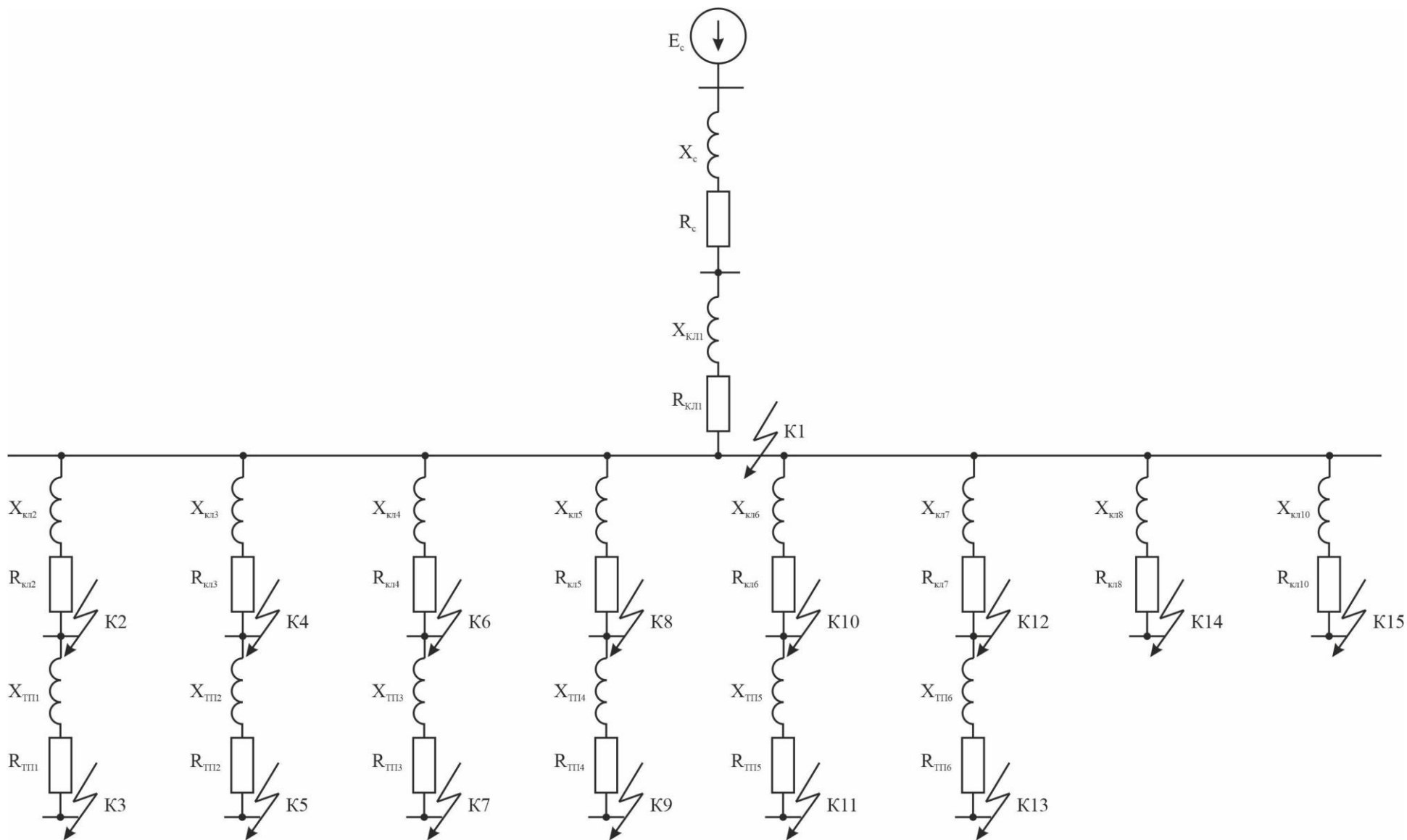


Рис. 6.2. Схема заміщення

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,369}{314 \cdot 0,502} = 0,0087 \text{ с}$$

$$k_{уд1} = 1 + e^{\frac{0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,0087}} = 1,317$$

$$i_{уд1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{уд1} \cdot I_{K1(c)}'' = \sqrt{2} \cdot 1,317 \cdot 4,16 = 7,75 \text{ кА}$$

Врахування струмів підживлення від ВИСОКОВОЛЬТНИХ синхронних/асинхронних двигунів 10 кВ (АД):

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{0,75}{0,85 \cdot 0,92} = 0,959 \text{ МВА}$$

$$X_{АД} = \frac{U_{ср.ном}^2}{I_{пуск} \cdot S_{ном}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 0,959} = 22,11 \text{ Ом}$$

$$I_{K1(АД)}'' = n \cdot \frac{E_{АД} \cdot U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \cdot X_{АД}} = 2 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 22,11} = 0,49 \text{ кА}$$

$$i_{уд1(АД)} = \sqrt{2} \cdot k_{уд(АД)} \cdot I_{K1(АД)}'' = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,49 = 1,18 \text{ кА}$$

Сумарні параметри КЗ у точці К1:

$$I_{\Sigma K1}'' = I_{K1(c)}'' + I_{K1(АД)}'' = 4,16 + 0,49 = 4,65 \text{ кА}$$

$$i_{\Sigma уд1} = i_{уд1(c)} + i_{уд1(АД)} = 7,75 + 1,18 = 8,93 \text{ кА}$$

Розрахунок для вибору відхідної кабельної лінії 10 кВ (КЛ1):

$$I_p = \frac{S_{\text{розр}}}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{2266,73}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 10,5} = 62,3 \text{ А}$$

$$B_k = (I_{\Sigma \text{ КЛ}''})^2 \cdot (t_{\text{п.з.}} + T_{\text{ал}}) = 4,65^2 \cdot (1,365 + 0,0087) = 29,71 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{B_k \cdot 10^6}}{C} = \frac{\sqrt{29,71 \cdot 10^6}}{94} = 57,98 \text{ мм}^2$$

До встановлення приймається кабель марки ААШВ-10(3 х 70).

Визначення опору обраної кабельної лінії (КЛ1):

$$R_{\text{КЛ1}} = r_0 \cdot l = 0,443 \cdot 0,19 = 0,084 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{КЛ1}} = x_0 \cdot l = 0,086 \cdot 0,19 = 0,016 \text{ Ом}$$

Розрахунок еквівалентних опорів до точки К2 (на стороні 10 кВ цехової підстанції):

$$X_{\text{К2}} = X_{\text{К1}} + X_{\text{КЛ1}} = 1,369 + 0,016 = 1,385 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{К2}} = R_{\text{К1}} + R_{\text{КЛ1}} = 0,502 + 0,084 = 0,586 \text{ Ом}$$

$$Z_{\text{К2}} = \sqrt{R_{\text{К2}}^2 + X_{\text{К2}}^2} = \sqrt{0,586^2 + 1,385^2} = 1,504 \text{ Ом}$$

Таблиця 6.1. Розрахунок опорів КЛ

№	l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	R , Ом	X , Ом
1	7	0,131	0,076	0,458	0,266
2	0,192	0,443	0,086	0,085	0,017
3	0,192	0,443	0,086	0,085	0,017
4	0,183	0,443	0,086	0,081	0,016
5	0,09	0,443	0,086	0,04	0,008
6	0,09	0,443	0,086	0,04	0,008
7	0,09	0,443	0,086	0,04	0,008
8, 9	0,151	0,443	0,086	0,067	0,013
10, 11	0,007	0,443	0,086	0,003	0,001

$$I_{K2''} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,504} = 4,03 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega \cdot R_{K2}} = \frac{1,385}{314 \cdot 0,586} = 0,0075 \text{ с}$$

$$k_{yд2} = 1 + e^{\frac{0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,0075}} = 1,264$$

$$i_{yд2} = \sqrt{2} \cdot k_{yд2} \cdot I_{K2''} = \sqrt{2} \cdot 1,264 \cdot 4,03 = 7,20 \text{ кА}$$

Параметри струму КЗ у точці КЗ (приведені до напруги 0,4 кВ):

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_T) \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = (1,385 + 3,83) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,00757 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_T) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (0,586 + 0,506) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,00158 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,00158^2 + 0,00757^2} = 0,00773 \text{ Ом}$$

$$I_{K3''} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,00773} = 29,87 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,00757}{314 \cdot 0,00158} = 0,0152 \text{ с}$$

$$k_{уд3} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0152}} = 1,518$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot k_{уд3} \cdot I_{K3''} = \sqrt{2} \cdot 1,518 \cdot 29,87 = 64,12 \text{ кА}$$

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

№	R, Ом	X, Ом	I _к , кА	T _а , с	k _{уд}	i _{уд} , кА
1	0,502	1,369	4,65	0,0087	1,317	8,93
2	0,586	1,385	4,03	0,0075	1,264	7,2
3	0,0016	0,0076	29,87	0,0152	1,518	64,12
4	0,586	1,385	4,03	0,0075	1,264	7,2
5	0,0016	0,0076	29,87	0,0152	1,518	64,12
6	0,582	1,385	4,04	0,0075	1,264	7,22
7	0,0016	0,0076	29,87	0,0152	1,518	64,12
8	0,541	1,377	4,09	0,0081	1,291	7,46
9	0,0015	0,0076	30,05	0,0158	1,531	65,06
10	0,541	1,377	4,09	0,0081	1,291	7,46
11	0,0015	0,0076	30,05	0,0158	1,531	65,06
12	0,541	1,377	4,09	0,0081	1,291	7,46
13	0,0015	0,0076	30,05	0,0158	1,531	65,06
14	0,569	1,382	4,06	0,0077	1,273	7,31
15	0,505	1,37	4,14	0,0086	1,312	7,68

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Розрахункові умови для перевірки та підбору живлячої кабельної магістралі до ТП-1:

$$I_p = \frac{S_{\text{розр}}}{n \cdot U_{\text{ср.ном}} \cdot \sqrt{3}} = \frac{2266,73}{2 \cdot 10,51,73} = 62,31 \text{ A}$$

До прокладання приймаємо дві паралельні кабельні лінії марки ААШВ-10(3х70). Перевірка обраного перерізу на нагрів у нормальному та післяаварійному режимах, а також на термічну стійкість до струмів КЗ:

$$I_p = 62,31 \text{ A} \leq K_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}} = 0,9 \cdot 165 = 148,5 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав}} = 2 \cdot I_p = 124,62 \text{ A} \leq K_{\text{ап}} \cdot K_{\text{п}}' \cdot I_{\text{доп}} = 1,35 \cdot 165 = 222,75 \text{ A}$$

$$B_k = (I_{\Sigma \text{ КЗ}})^2 \cdot (t_{\text{п.з.}} + T_{\text{ал}}) = 4,65^2 \cdot (1,365 + 0,0087) = 29,71 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_k \cdot 10^6}}{C} = \frac{\sqrt{29,71 \cdot 10^6}}{94} = 57,98 \text{ мм}^2$$

Оскільки фактичний переріз обраного кабелю (70 мм^2) більший за мінімально допустимий ($57,98 \text{ мм}^2$), лінія повністю задовольняє умови термічної стійкості.

Таблиця .6.3. Вибір КЛ

№	$n_{\text{КЛ, шт}}$	$S_{\text{розр, МВА}}$	$I_{\text{р, А}}$	$I_{\text{р.ав., А}}$	$B_{\text{к, кА}^2\text{с}}$	$F_{\text{min, мм}^2}$	Марка КЛ	$I_{\text{доп, А}}$	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$	$K_{\text{ап}}$	$K'_{\text{п}}$	$K_{\text{ап}} K'_{\text{п}} I_{\text{доп, А}}$
1	4	14460,62	198,78	397,56	29,71	57,98	4 х АСБ-10(3 х 240)	355	0,80	284	1,4	0,9	431,3
2	2	2266,73	62,31	124,62	29,71	57,98	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,90	148,5	1,4	1	222,8
3	2	2266,73	62,31	124,62	29,71	57,98	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,90	148,5	1,4	1	222,8
4	2	2330,06	64,05	128,1	29,71	57,98	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,90	148,5	1,4	1	222,8
5	2	2261,65	62,17	124,34	29,71	57,98	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,90	148,5	1,4	1	222,8
6	2	2261,65	62,17	124,34	29,71	57,98	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,90	148,5	1,4	1	222,8
7	2	2261,65	62,17	124,34	29,71	57,98	2 х ААШВ-10(3х70)	165	0,90	148,5	1,4	1	222,8
8, 9	1	757,5	41,65	—	29,71	57,98	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1,00	165	-	-	-
10, 11	1	101	5,55	—	29,71	57,98	1 х ААШВ-10(3х70)	165	1,00	165	-	-	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Обчислення аперіодичної складової та теплового імпульсу для перевірки високовольтного апарата:

$$i_{ат} = \sqrt{2} \cdot I_{\Sigma KI''} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_{a1}}} = 1,41 \cdot 4,65 \cdot e^{-\frac{0,542}{0,0087}} \approx 0 \text{ кА}$$

$$B_k = (I_{\Sigma KI''})^2 \cdot (t_{c.max} + t_b + t_{pz} + T_{a1}) = 4,65^2 \cdot (0,042 + 1,2 + 0,0087) = 27,04 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Для встановлення приймається вакуумний вимикач типу ВР2-10-20/1000. Результати його перевірки наведені у таблиці нижче.

Таблиця 6.4. Умови вибору та перевірка високовольтного вимикача

Умова перевірки	Розрахункові значення
$U_{вст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 11$
$I_{р.ф.} \leq I_{ном}$	$834,88 \leq 1000$
$I_m \leq I_{в.н.}$	$4,65 \leq 20$
$i_{ат} \leq 2\beta_{ном} I_{в.н.}$	$0 \leq 11,31$
$2I_m + i_{ат} \leq 2I_{в.н.}(1 + \beta_{ном})$	$1,41 \cdot 4,65 + 0 < 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4)$ $6,56 \leq 39,6$
$I' \leq I_{дст}$	$4,65 \leq 52$
$i_{уд} \leq 1,82 I_{дст}$	$8,93 \leq 132,37$
$B_k \leq I_{т.ном}^2 \cdot t_{т.ном}$	$27,04 \leq 1200$

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема приєднання ТВП наведена на рис. 6.3.

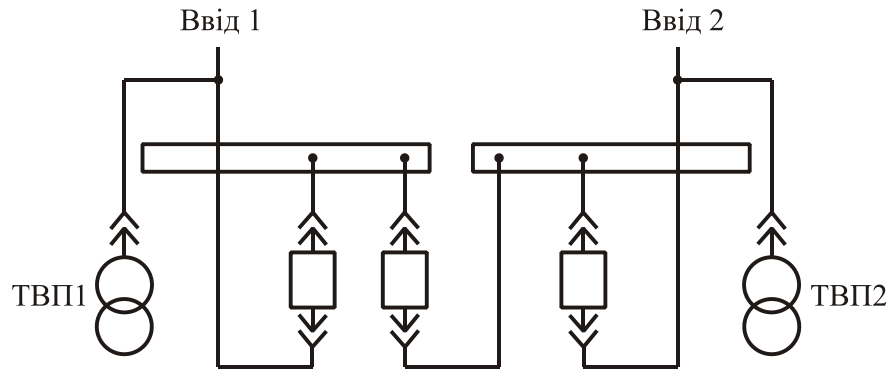


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП

$$S_{\text{вст}} = \sqrt{P_{\text{вст}}^2 + Q_{\text{вст}}^2} = \sqrt{69,22^2 + 19,23^2} = 71,84 \text{ кВА}$$

$$S_{\text{розр}} = K_{\text{п}} \cdot S_{\text{вст}} = 0,8 \cdot 71,84 = 57,47 \text{ кВА}$$

Приймаємо до встановлення два трансформатори марки ТМ-40/10.

$$K_{\text{зав}} = \frac{S_{\text{розр}}}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{57,47}{2 \cdot 40} = 0,72$$

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

7.1. Аналіз та вибір оптимальної методики розрахунку параметрів штучного освітлення об'єкта

Під час створення проектної документації для інженерних комунікацій підприємства, спеціалісти стикаються з проблемою правильного визначення кількості та просторового розміщення світильників. Фундаментальна прикладна світлотехніка пропонує два базових алгоритми для вирішення цієї задачі: використання інтегрального показника корисної дії випромінювання (метод КВ) та деталізований точковий алгоритм обчислень. Впровадження інноваційних світлодіодних (LED) технологій вимагає максимально точного математичного апарату, адже будь-яка похибка призводить або до фінансових втрат через надмірне споживання енергії, або до погіршення умов праці оперативного персоналу.

Алгоритм, побудований на показнику корисної дії, ідеально підходить для оцінки фонового світлового середовища просторих цехів із симетричним розташуванням випромінювачів на стелі. Зазначена математична модель обов'язково враховує оптичні властивості будівельних матеріалів (здатність перекриттів, стінових панелей та підлогового покриття відбивати фотони), специфічний просторовий індекс приміщення, а також експлуатаційний коефіцієнт запасу. Останній є вкрай важливим параметром, який покликаний нівелювати наслідки неминучої фізичної деградації напівпровідникових кристалів та поступового забруднення захисних розсіювачів у промислових умовах.

Проте, цей інструментарій має одну суттєву ваду: він обчислює лише середнє арифметичне значення освітленості горизонтальної площини, не даючи змоги локалізувати темні чи занадто яскраві зони. Через це стає неможливим

						45

перевірити ключовий санітарний критерій – нормативну рівномірність розподілу світла. У машинному залі агрегатів перекачування води така стратегія виправдовує себе виключно для формування базового заливаючого світла, яке забезпечує безпечну навігацію працівників між рухомими механізмами.

Натомість, точковий математичний алгоритм застосовується для прецизійної перевірки рівня яскравості на конкретних критичних ділянках технологічного процесу (наприклад, шкали манометрів, механічні засувки, пульти диспетчерського управління). Цей підхід оперує фотометричними тілами (кривими сили світла) конкретної моделі світильника. Завдяки детальному аналізу векторів випромінювання, інженер може гарантувати відсутність небезпечних глибоких тіней у зоні обслуговування роторних установок.

Основною технічною складністю даної методики є першочергове ігнорування багаторазово відбитих променів, які у кімнатах зі світлим пофарбуванням стін можуть генерувати від десятої частини до третини всього корисного світла. Крім того, лінійні промислові LED-модулі на малих дистанціях підвісу не підкоряються класичному закону зворотних квадратів відстані. Це змушує проєктантів вводити емпіричні поправкові коефіцієнти або дробити довге джерело на елементарні точкові відрізки (інтегрування за методом лінійних смуг випромінювання).

Як показує сучасна інженерна практика, для насосних комплексів саме комбінація двох згаданих підходів генерує найкращий техніко-економічний результат. Спочатку визначається загальна потреба в люменах для досягнення нормативного фону, а потім локально додаються прожектори спрямованої дії для підсвічування робочих зон.

Для остаточного подолання вищезазначених аналітичних обмежень та створення максимально ефективної енергозберігаючої системи, передове проєктування сьогодні повністю інтегроване в цифрові рейтрейсингові платформи. Такі спеціалізовані програмні середовища застосовують метод випромінюваності (radiosity), який ітеративно обчислює складне багаторазове відбиття кожного кванту світла від усіх тривимірних об'єктів у змодельованому

об'ємі. Це гарантує абсолютну достовірність обчислень та автоматично мінімізує сумарну споживану електричну потужність.

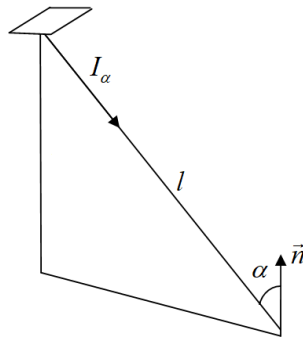


Рис. 7.1. Просторова та геометрична інтерпретація векторів точкового методу

Фундаментальний принцип функціонування математичних моделей глобального освітлення (Global Illumination) базується на топологічному поділі віртуального простору. Внутрішній об'єм виробничого приміщення та всі наявні в ньому технологічні об'єкти віртуально розмежовуються на безліч елементарних плоских полігонів (так званих патчів). Апарат обчислювальної геометрії припускає, що в межах одного такого мікросегмента яскравість (дифузна емісія) залишається абсолютно гомогенною.

Для кожної виділеної ділянки комп'ютер розв'язує складну систему лінійних алгебраїчних рівнянь енергетичного балансу. Сумарна світлова енергія полігона формується з власної емісії джерела (якщо полігон є частиною світильника) та фотонів, які відбилися від суміжних поверхонь з урахуванням їхніх кутових коефіцієнтів видимості (форм-факторів). Фізично цей процес описується наближенням до закону Ламберта для ідеально розсіюючих поверхонь.

Сильними сторонами застосування такого підходу під час проектування систем штучного зору є:

- Високопрецизійна симуляція вторинних перевідбиттів світлового потоку в замкнених просторах.
- Формування максимально реалістичних напівтіней з плавними градієнтами, що критично важливо для правильного фізіологічного сприйняття глибини простору працівниками.

- Абсолютна незалежність згенерованої карти розподілу яскравості від позиції спостерігача або напрямку погляду, що дає змогу одноразово прорахувати сцену та інспектувати її під будь-яким кутом.
- Здатність коректно обробляти просторові перешкоди будь-якої конфігурації, включаючи багаторівневі естакади та трубопроводи.

Спеціалізовані системи автоматизованого проектування (САПР), алгоритмічним ядром яких є радіозність, надають інженерам потужний інструментарій для раціонального просторового позиціонування джерел випромінювання. Гідротехнічні об'єкти відрізняються надзвичайно специфічним інтер'єром: тут завжди присутня величезна кількість циліндричних магістралей, масивних металевих станин, електродвигунів та запірної арматури. Ці індустріальні елементи володіють унікальними індексами рефлексії та створюють щільну мережу перешкод на шляху поширення променів. Лише метод випромінюваності здатний адекватно прорахувати відбиту компоненту від глянцевого емальованого кожуху помп та сірих бетонних стін машинного залу.

Провідні світові розробники інжинірингового софту пропонують низку перевірених рішень для подібних завдань, серед яких найпоширенішими є платформи Relux, Calculux та екосистема DIALux. Вони забезпечують побудову точних 3D-двійників промислових споруд. Зважаючи на жорсткі вимоги сучасної європейської нормативної бази (зокрема стандарту EN 12464-1), базовим інструментом для виконання фінальних розрахункових етапів нашого дослідження обрано новітнє середовище DIALux EVO.

Ця генерація програмного забезпечення вирізняється модифікованим математичним ядром та суттєво розширеним функціоналом. Платформа відкриває перед проектувальниками такі можливості:

- Імпорт комплексних BIM-моделей (Building Information Modeling) у форматі IFC, що дозволяє працювати з будівлею як з єдиним організмом.
- Завантаження фотометричних тіл (файлів форматів IES/LDT) безпосередньо з хмарних баз даних виробників LED-оптики.
- Врахування не лише базового світлового потоку, але й колірної температури

та індексу передачі кольору (CRI) напівпровідникових кристалів.

- Автоматизована генерація графічної та текстової документації, яка підтверджує дотримання гігієнічних норм.

Інтеграція програмного комплексу DIALux EVO у процес інженерного планування насосної станції гарантує безпрецедентну точність передбачення фактичних фотометричних характеристик ще на стадії розробки креслень. Такий науково обґрунтований алгоритм дій практично повністю нівелює ймовірність порушення нормативних вимог, створює максимально комфортні умови праці для машиністів насосних установок та дозволяє оптимізувати початкові інвестиції в енергоефективне електрообладнання.

7.2. Обчислення необхідної кількості світильників для системи загального освітлення

Фундаментальною метою світлотехнічного проектування, яке базується на застосуванні методу інтегрального коефіцієнта корисної дії, є точне математичне визначення сумарної електричної потужності та світлового потоку LED-модулів. Цей параметр безпосередньо корелює із запланованою номенклатурою точок випромінювання, регламентованими санітарними нормами рівнями освітленості робочих площин, експлуатаційним запасом на деградацію напівпровідників та показниками допустимої мінімальної яскравості. У контексті глобального енергозбереження важливо не просто підібрати достатню потужність, а віднайти ідеальний баланс, щоб уникнути як появи небезпечних затемнених зон, так і надмірної перевитрати кіловат-годин, що є ключовим показником енергоефективності сучасного водоканалу.

Загальний масив освітлювальних пристроїв, що підлягають стаціонарному монтажу у виробничому просторі, обчислюється, спираючись на специфічні інженерні номограми. Йдеться насамперед про визначення оптимального відносного кроку встановлення – параметра l (який є відношенням фізичної дистанції між сусідніми приладами до розрахункової висоти їхнього підвісу над

технологічним обладнанням). Даний критерій тісно пов'язаний із просторовою геометрією кривих розподілу сили світла (КРС) обраної оптики, що наочно продемонстровано на відповідних графіках (див. рис. 7.3). Відхилення від цих рекомендованих значень неминуче призведе до формування контрастних тіней або ж до нераціонального перекриття пучків світла.



Рис 7.3. Графічні номограми залежності відносного кроку l від типології фотометричного розподілу

Класичний алгоритм розрахункових операцій вимагає від спеціаліста суворого дотримання наступної послідовності дій:

- Здійснення ретельного архітектурного аналізу об'ємно-просторових характеристик насосного блоку (врахування довжини, ширини та загальної висоти ферм перекриття).
- Обчислення геометричного індексу простору, який є базовою константою, що пов'язує корисну квадратуру підлоги із загальною площею стінових огорожень відносно площини підвісу ліхтарів.
- Знаходження найбільш економічно доцільного та оптично коректного співвідношення дистанцій між сусідніми джерелами емісії (оптимізація критерію l).
- Фінальна математична калькуляція точної кількості світильників, необхідної

для утворення гомогенного світлового килима без пульсацій.

Розробляючи схеми живлення та розміщення оптики безпосередньо для гідротехнічних споруд, інженер зобов'язаний брати до уваги цілу низку специфічних виробничих факторів. До них належать: наявність масивних магістральних трубопроводів, великогабаритних засувок та вертикальних електродвигунів, які створюють масивні перешкоди для фотонів; жорсткі вимоги щодо усунення стробоскопічного ефекту поблизу відкритих роторних механізмів; функціонування мостових кранів чи талей, що обмежує мінімально допустиму висоту кріплення арматури; а також питання зручності подальшого сервісного обслуговування на великих висотах.

Вміле використання діаграм оптимізації параметра I дає можливість проектувальникам знайти "золоту середину" в топології розміщення освітлювальних точок. Це гарантує досягнення найвищого ступеня рівномірності яскравості при кардинальному зниженні сумарного споживання електроенергії. Адекватно спроектована матриця розміщення промислових світильників є запорукою того, що фактичні фотометричні вимірювання після запуску об'єкта будуть беззаперечно відповідати державним стандартам з охорони праці.

Базуючись на чинних вітчизняних та європейських будівельних нормативах, усі існуючі діаграми кутового випромінювання (фотометричні тіла) класифікуються за кількома базовими категоріями:

1. Категорія М (косинусний або дифузний розподіл) – характеризується тим, що найвища інтенсивність променистої енергії спрямована чітко донизу (у точку надиру), при цьому промені розходяться максимально плавно і симетрично утворюючи сферу.
2. Категорія Д (глибока конфігурація) – фокусує переважну частину світлового потоку у достатньо вузькому конусі, який обмежений просторовими кутами від 0 до 60 градусів відносно вертикальної осі.
3. Категорія Л (напівширокий формат) – є своєрідним технологічним компромісом, проміжною ланкою, що вдало поєднує оптичні характеристики глибоких та широких полікарбонатних лінз.

4. Категорія Г (широка дисперсія) – забезпечує рівноцінний розподіл яскравості у значному діапазоні кутів, що дозволяє "розтягувати" фотони по великій площі без створення сліпучого ефекту по центру.
5. Категорія К (сильно концентрована) – збирає майже сто відсотків світлової енергії у надзвичайно гострий центральний вектор, що є типовою рисою спеціалізованої прожекторної оптики.

Для точного аналітичного опису форми цих просторових фігур вводиться спеціалізований коефіцієнт форми КРС. Він математично виражається як частка від ділення інтенсивності випромінювання під похилим кутом 60 градусів на осьову інтенсивність (напрямок 0 градусів). Значення цього критерію дає інженерам точне розуміння того, наскільки "розплющеною" чи навпаки "витагнутою" є світлова пляма. До того ж, цей показник нерозривно корелює з явищем дискомфортного блиску (показник UGR), оскільки саме промені, що випромінюються під великими кутами, найчастіше потрапляють безпосередньо в очі персоналу.

Розглядаючи головний машинний зал водонапірної станції, який традиційно відрізняється значною дистанцією від нульової позначки підлоги до нижнього поясу ферм перекриття, світлодизайнери наполегливо рекомендують застосовувати моделі приладів виключно із вторинною оптикою типу Д або ж Л. Саме така сфокусована фотометрія гарантує, що промені не розсіюються марно по верхніх частинах стін, а ефективно "проб'ють" запилене повітря і досягнуть манометрів та панелей керування без суттєвих втрат. На противагу цьому, якщо аналізувати допоміжні приміщення зі значно нижчим рівнем стелі, там набагато доцільніше інстальовати панелі зі світлорозподілом класу Г, що дасть змогу залити світлом максимальну квадратуру при застосуванні мінімальної кількості пристроїв.

У фаховій світлотехнічній літературі акцентується увага на тому, що кожна конфігурація КРС ідентифікується не лише згаданим форм-фактором, але й межовими кутами розкриття ефективного потоку. Візуалізувати цю складну фізичну картину найкраще за допомогою спеціальних двовимірних перерізів у полярній системі координат. На рисунку 7.4 наведено класичні графіки, які відображають динаміку зміни вектора сили світла (у канделах) залежно від кута

емісії для всієї палітри стандартизованих кривих. Такі полярні діаграми сьогодні автоматично генеруються на основі результатів лабораторних вимірювань за допомогою високоточних гоніофотометрів.

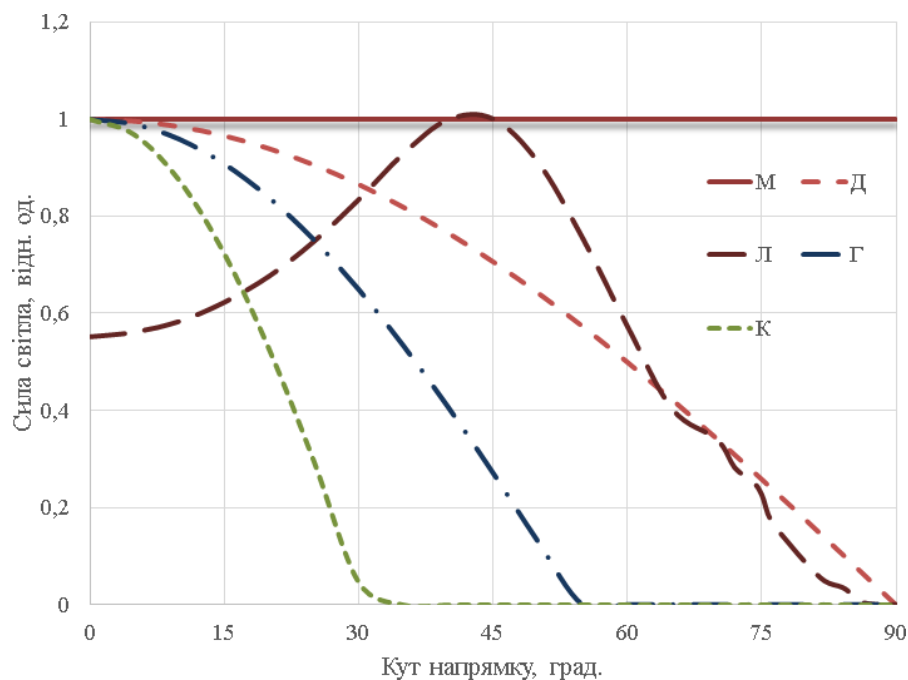


Рис 7.4. Просторові перерізи інтенсивності випромінювання залежно від вектора емісії

Детальний аналіз подібних графічних залежностей, що продемонстровані на рис. 7.4, надає сучасному проектувальнику ключовий інструмент для безпомилкового вибору базової моделі LED-арматури. Орієнтуючись на об'ємні параметри машинного залу та суворі технологічні вимоги до ліквідації тіньових зон біля насосів, фахівець може математично обґрунтовано підібрати ті лінзи, що ідеально збалансують загальне енергоспоживання об'єкта та створять комфортне ергономічне середовище для робітників.

Для ідентифікації конкретного типу світлорозподілу фахівцям необхідно обчислити специфічний фотометричний індикатор, який називається форм-фактором просторової кривої. Математично ця величина описується як пропорція між інтенсивністю випромінювання під похилим кутом (зазвичай шістдесят градусів) та вектором емісії, що направлений строго донизу (у точку надиру):

$$K_{\Phi} = \frac{I_{60^{\circ}}}{I_{0^{\circ}}}$$

Співставивши отримані числові значення цього фотометричного індикатора з відповідною типологією полікарбонатних лінз, а також врахувавши межові допустимі інтервали відносного кроку монтування (l), проектувальники будують спеціалізовані номограми. Ці графічні інструменти наочно демонструють функціональний взаємозв'язок між геометрією просторового розміщення LED-панелей (або їх суцільних транзитних магістралей) та ступенем концентрації променистої енергії. Завдяки таким кривим можна безпомилково визначити ту фізичну дистанцію між випромінювачами, за якої освітленість робочої площини залишатиметься стабільно рівномірною, виключаючи будь-які різкі перепади яскравості.

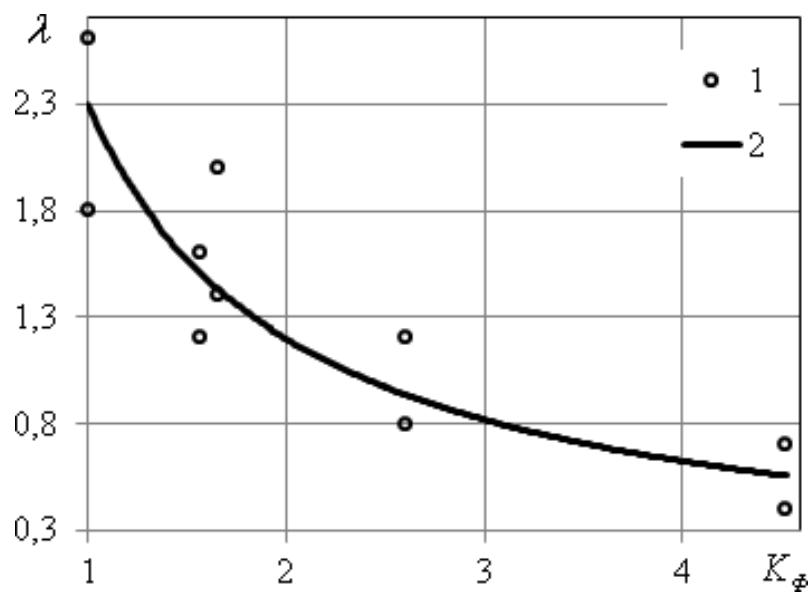


Рис. 7.5 Функціональні криві зміни відносного кроку від конфігурації світлорозподілу, $l = f(K_{\Phi})$

Продемонстровані візуальні діаграми є ключовим інструментом для світлодизайнера, адже вони дають змогу знайти ідеальний баланс у топології освітлювальної мережі. Відносний крок l , як відомо з фундаментальної світлотехніки, являє собою результат ділення метричного відрізка між оптичними центрами сусідніх приладів на корисну висоту їх розташування над площиною

виконання зорових завдань.

Фізичний зміст цієї закономірності є досить прозорим: чим гостріший і сфокусованіший промінь генерує оптика (мінімальні значення форм-фактора K_{Φ}), тим на більшій дистанції один від одного дозволяється монтувати пристрої без ризику провалів у освітленості. І навпаки, якщо застосовується матриця з широкою дисперсією фотонів, ряди світильників необхідно ущільнювати. Суворе дотримання цих рекомендацій є єдиним надійним способом забезпечити нормативний індикатор гомогенності світлового фону на рівні, що перевищує позначку 0,7 (відповідно до вимог європейських норм охорони праці).

Якщо розглядати машинний зал гідротехнічного об'єкта, де завжди змонтовано колосальні за своїми розмірами агрегати та мережі труб, вищезгадані графічні залежності набувають особливої інженерної цінності. Вони дають можливість вирішити одразу кілька стратегічних завдань:

- Максимально раціонально та безпечно інтегрувати підвісні лінії у тісний простір між електромоторами, мостовими кранами та запірною арматурою.
- Гарантувати бездоганну видимість на всіх евакуаційних маршрутах та в зонах проведення регламентних сервісних чи ремонтних робіт.
- Практично повністю нівелювати ризик появи контрастних глибоких тіней, які неминуче утворюються позаду масивних металевих циліндрів резервуарів при неправильному фокусуванні світла.

Відтак, спираючись на аналітичні криві з рисунка 7.5, фахівець здатний розробити проект, який буде ідеально збалансованим як з точки зору фізіології зору персоналу, так і в розрізі оптимізації капітальних інвестицій у матеріали.

Для того щоб інтегрувати знайдені емпіричні закономірності у сучасні системи комп'ютерного моделювання (САПР), графічні лінії необхідно було трансформувати у строгий алгебраїчний формат. Ця процедура була успішно реалізована за допомогою математичного апарату апроксимації експериментальних даних, зокрема із застосуванням класичного алгоритму найменших квадратів. Найкращу збіжність продемонструвала нелінійна степенева математична модель, рівняння якої має такий вигляд:

						55

$$l = A \cdot K_{\Phi}^B = 1,42 \cdot K_{\Phi}^{-0,51}$$

Для об'єктивної оцінки якості та достовірності підібраної математичної моделі обов'язково обчислюється статистичний критерій – коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{\sum_{i=1}^n (l_i - l_i)^2} = 0,964$$

Використання вищезазначеного статистичного інструментарію для обробки фотометричних масивів даних дає змогу вивести універсальну формулу, яка чітко диктує необхідну дистанцію між джерелами фотонів. Перехід від "ручних" графічних номограм до суворих алгебраїчних виразів відкриває низку стратегічних переваг для проектних інститутів:

- Кардинальне спрощення рутинних обчислювальних та перевірочних процедур під час конструювання складних освітлювальних комплексів;
- Формування міцного базису для повної автоматизації створення креслень шляхом написання власних програмних скриптів для архітектурного софту;
- Виключення людського фактора (похибки візуального зчитування значень з паперових графіків), що в рази підвищує точність позиціонування арматури;
- Суттєве скорочення загальних часових витрат інженера на підготовку та випуск фінальної проектно-кошторисної документації об'єкта.

Найбільш релевантним математичним інструментом для відображення складної криволінійної кореляції, що виникає між фотометричним форм-фактором та відносним кроком встановлення оптики, виявилася саме нелінійна степенева модель. Застосування цього конкретного класу алгебраїчних виразів гарантує дослідникам і проектувальникам цілу низку стратегічних переваг. По-перше, досягається максимальний рівень статистичної збіжності з реальними

результатами лабораторних замірів просторового розподілу сили світла. По-друге, математична крива зберігає сувору монотонність на всьому експлуатаційному проміжку значень, що унеможливлює появу парадоксальних оптичних ефектів, перепадів чи розривів під час проектування. По-третє, подібні формули надзвичайно легко та органічно інтегруються в базові інженерні калькулятори, макроси чи електронні таблиці, абсолютно не перевантажуючи обчислювальний процес складною тригонометрією.

Завдяки наявності такого чіткого та перевіреного алгебраїчного інструментарію, сучасні світлодизайнери отримують можливість миттєво і з найвищою прецизійністю генерувати просторові матриці монтування LED-панелей. Це фундаментально трансформує підхід до роботи: спеціаліст повністю звільняється від необхідності вручну інтерполювати значення з паперових графічних номограм, що дуже часто стає головним джерелом людських помилок у проектах. Тепер достатньо лише підставити базові паспортні параметри обраного світильника у стандартизоване рівняння, щоб миттєво отримати готовий та фізично обґрунтований метричний крок для монтажників.

У контексті розробки систем безперебійного електропостачання для водонапірних комплексів цей аспект набуває критичної ваги. Виробничі приміщення об'єктів водоканалу традиційно відрізняються складною архітектурою та наповнені густим переплетінням магістральних трубопроводів різного діаметра, масивною запірною арматурою та габаритними резервуарами. Усе це створює надзвичайно жорсткі просторові обмеження для безпечного монтажу підвісних ліній. Запропонований аналітичний підхід дозволяє гнучко перебирати вузькоспрямовані або ширококутні пристрої та в режимі реального часу перераховувати координати їх кріплення таким чином, щоб інтенсивні світлові пучки вільно оминали металеві перешкоди, виключаючи формування небезпечних глибоких тіней біля рухомих роторів.

Що стосується самої процедури апроксимації фотометричних баз даних, то класичний статистичний алгоритм найменших квадратів (МНК) бездоганно впорався із поставленим завданням. Фізичний зміст цього потужного методу

полягає у зведенні до абсолютного математичного мінімуму суми квадратів відхилень між емпіричними "точками" (даними з гоніофотометра) та згладженою теоретичною лінією функції. Як наслідок, інженер отримує обчислювальний інструмент найвищого рівня надійності, який можна без жодних вагань використовувати для підготовки офіційної проектно-кошторисної документації, що проходитиме сувору державну експертизу.

Як базове джерело штучного зорового середовища для головного машинного залу насосної станції пропонується використати промисловий світлодіодний модуль підвищеної надійності серії ДСП65В. Даний апарат відрізняється винятковим ступенем герметизації корпусу від пилу та струменів вологи (стандарт захисту IP65), а також має посилену стійкість до низькочастотних вібрацій, що є життєво необхідним параметром для багаторічної роботи у безпосередній близькості до потужних гідравлічних pomp. Виробник комплектує цю лінійку високоякісними змінними вторинними полікарбонатними лінзами, які здатні формувати світлорозподіл трьох ключових класів геометрії: напівширокий (тип Л), широкий дисперсійний (тип Г) та глибоко концентрований (тип К).

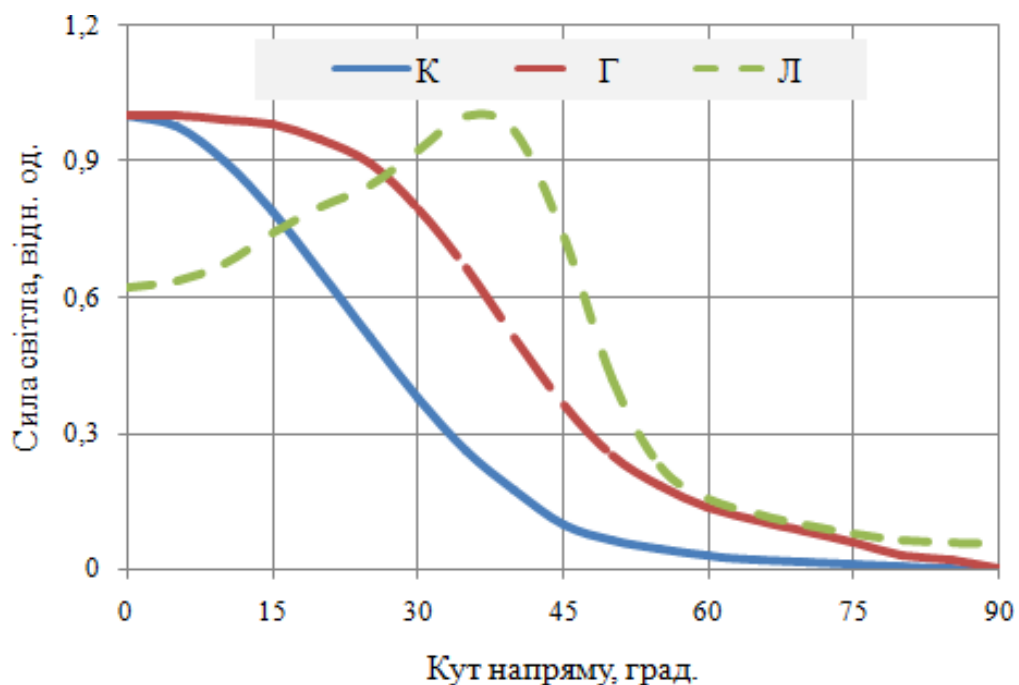


Рис. 7.6. Полярні криві сили світла промислового світильника серії ДСП65В

Нижче наведено суцільний блок розрахункових операцій для визначення оптимального відносного кроку (l), фізичної дистанції підвісу (L) та кінцевої кількості приладів (N) у двох приміщеннях з урахуванням різних типів оптики. Площі приміщень становлять 18,2 x 12,1 м та 18,2 x 6,1 м.

$$l_K = 2,32 \cdot 0,30^{-0,45} = 0,77$$

$$l_L = 2,32 \cdot 1,35^{-0,45} = 1,16$$

$$l_G = 2,32 \cdot 2,45^{-0,45} = 1,50 \quad h_p = 13,15 \text{ м}$$

$$L_K = l_K \cdot h_p = 0,77 \cdot 13,15 = 10,13 \text{ м}$$

$$L_L = l_L \cdot h_p = 1,16 \cdot 13,15 = 15,25 \text{ м}$$

$$L_G = l_G \cdot h_p = 1,50 \cdot 13,15 = 19,73 \text{ м}$$

$$N_{A2} = \frac{18,2}{15,25} = 1,19 \rightarrow 2 \text{ шт.}; \quad N_{B2} = \frac{6,1}{15,25} = 0,40 \rightarrow 1 \text{ шт.}; \quad \Sigma N_2 = 2 + 1 = 3 \text{ шт.}$$

7.3 Розроблення цифрової моделі та обчислення параметрів освітлення машинного залу станції перекачування

Щоб детально дослідити специфіку розподілу світлового потоку на рівні підлоги, ми здійснили ґрунтовні обчислення параметрів штучного освітлення. Для цього використовувалося відоме спеціалізоване програмне середовище під назвою DIALux. Даний потужний цифровий продукт дає можливість будувати високоточні 3D-моделі простору. Завдяки йому інженери здійснюють глибоке вивчення фотометричної картини всередині будь-яких промислових будівель, інтегруючи

						59

IES-файли конкретних ламп для максимальної достовірності результатів.

Базові дані для виконання комп'ютерного моделювання були такими:

- Показник обслуговування системи прийнято на рівні 0,59. Ця величина компенсує поступову деградацію світлодіодів, запилення оптичних елементів лінз, а також неминуче погіршення відбивної здатності стін з плином часу. Таке відносно низьке значення є типовим для складних індустріальних умов, де регулярна чистка обладнання ускладнена.
- Специфікація обладнання: загалом у цеху передбачено встановлення шести джерел світла. З них чотири прилади мають маркування ДСП65В-80-211, а ще два – ДСП65В-100-211.
- Топологія розміщення: устаткування монтується на значній висоті, яка дорівнює тринадцятьом метрам від нульової позначки підлоги.

Зазначений софт, створений німецькою фірмою DIAL GmbH, вважається загальновизнаним світовим стандартом у сфері інженерного світлодизайну. Застосунок дозволяє відтворити геометрію об'єкта в 3D, коректно розташувати ліхтарі з урахуванням специфіки їх підвісів. Крім того, алгоритм автоматично генерує звіти про ключові метрики: глобальну люмінесценцію, індекс дискомфорту (так звану засліплюючу дію UGR) та загальний баланс світлових плям.

Використані у проекті LED-прилади лінійки ДСП65В розроблені спеціально для виробничих потреб (аббревіатура "ДСП" означає "діодний світильник промисловий"). Вони відрізняються чудовою енергоефективністю та високим ступенем захисту корпусу (IP) від негативних факторів навколишнього середовища, таких як надмірна волога чи пил. Обрані моделі потужністю вісімдесят і сто ват генерують потужний сфокусований струмінь променів завдяки вторинній оптиці. Це критично важливо для габаритних споруд на зразок машинного залу насосних комплексів, де джерела випромінювання підвішуються дуже високо.

Згідно з підсумками роботи алгоритмів віртуального симулювання, запропонована конфігурація мережі цілком справляється зі своїм інженерним завданням. Як вже згадувалося вище, інсталяція складається з пари стоватних та

						60

чотирьох вісімдесятиватних агрегатів серії ДСП. Отримана картина розподілу фотонів у межах робочої площини характеризується наступними числовими показниками:

- Усереднений показник яскравості світла на горизонтальній площині підлоги фіксується на позначці 81 люкс. Згідно з чинними стандартами ДБН України, для зон періодичного огляду інженерних комунікацій цього об'єму цілком достатньо (норма зазвичай становить 50-75 лк).
- Найнижчий зафіксований рівень у найтемніших кутках зали становить 42 люкси.
- Найяскравіші точки безпосередньо під підвішеними радіаторами демонструють пікове значення у 111 люксів.
- Індекс рівномірності, який обчислюється шляхом ділення найменшого результату на середнє арифметичне число, зупинився на показнику 0,522. Подібна цифра свідчить про відсутність різких та небезпечних перепадів між світлими і темними зонами, що сприяє комфортній зоровій роботі чергового персоналу.

Здобуті підсумки віртуальних комп'ютерних обчислень підтверджують належний рівень сформованого світлового середовища всередині даного індустріального об'єкта. Розрахований індекс рівномірного розподілу світлового потоку (який визначається за формулою $U_0 = \frac{E_{min}}{E_{cp}}$) склав 0,522. Ця цифра з надійним запасом перекидає базовий норматив у 0,4, який жорстко регламентується державними стандартами щодо освітлення робочих зон виробничих площ. Такий підхід гарантує створення безпечних і ергономічних умов: він зводить до мінімуму зорову втому чергового персоналу під час візуального контролю за манометрами та запірною арматурою, а також суттєво знижує ризики травматизму при пересуванні територією перекачувальної станції.

Глобальний усереднений показник інтенсивності освітлення становить вісімдесят один люкс. Зазначена величина повністю задовольняє актуальні критерії Державних будівельних норм (зокрема нормативного документу ДБН В.2.5-

28:2018). Згідно з цим регламентом, для залів перекачувальних комплексів необхідно підтримувати фоновий рівень на позначці не нижче сімдесяти п'яти люксів. Зафіксований діапазон коливань яскравості від найнижчих сорока двох до пікових ста одинадцяти люксів свідчить про плавне заливання простору. Завдяки правильно підібраній оптиці світильників вдалося уникнути формування глибоких контрастних тіней поблизу габаритних агрегатів, а також попередити появу сліпучих відблисків від металевих поверхонь труб.

Наочна візуалізація розрахунків у вигляді ліній однакової освітленості (так званих ізолюкс), разом із деталізованою числовою матрицею розподілу світлового поля по нульовій позначці, продемонстровані на відповідних ілюстраціях нижче (рисунки 7.7 та 7.8).

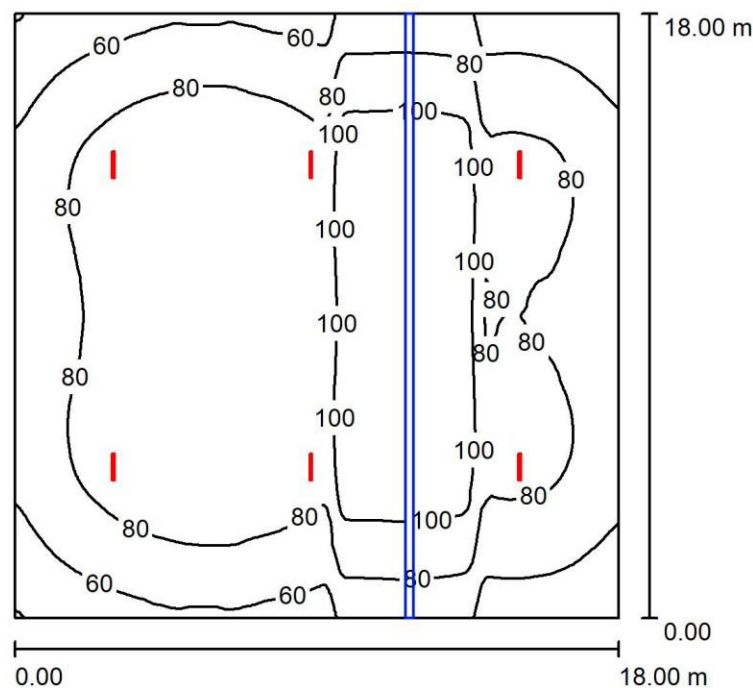


Рис. 7.7. Графік ізолюкс на рівні підлоги перекачувальної станції

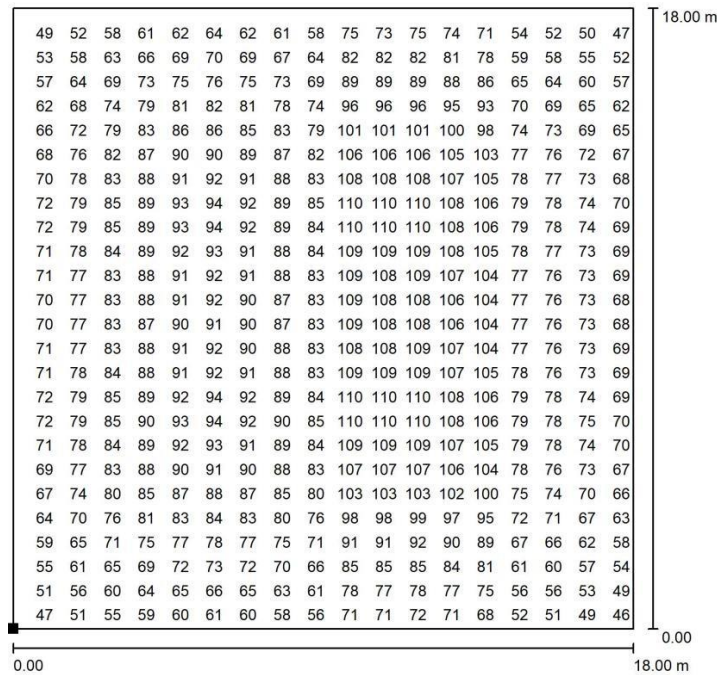


Рис. 7.8. Числова сітка розподілу рівнів освітленості в площині перекачувальної станції

Аналізуючи зібрані фотометричні показники та порівнюючи їх із чинними державними регламентами, маємо всі підстави стверджувати: спроектована мережа штучного світла абсолютно задовольняє актуальні критерії безпеки індустриальних об'єктів.

Проте робота перекачувальних комплексів має суттєву особливість – наявність масивних агрегатів та розгалуженої арматури. Подібні великогабаритні конструкції неминуче генерують щільні тіні в робочому просторі. З огляду на це, виникає критична потреба проінспектувати рівні яскравості не лише на нульовій позначці підлоги, але й уздовж сервісних естакад, перехідних містків та технологічних площадок, які змонтовані на різних висотних ярусах будівлі.

Щоб комплексно розв'язати цю інженерну проблему, ми звернулися до потужнішої версії софту – DIALux EVO. У цій екосистемі було побудовано високодеталізований 3D-макет машинного залу перекачувального вузла. Створена віртуальна копія скрупульозно дублює фактичну конфігурацію простору. Вона інтегрує точне розташування головних механізмів, мережу трубних комунікацій, а також абсолютну більшість сервісних галерей і трап-мостів.

Зазначений пакет програмного забезпечення є сучасною еволюцією класичного розрахункового інструментарію. Він відкриває безпрецедентні горизонти для об'ємного симулювання багаторусної індустріальної архітектури. Функціонал програми дозволяє напряду завантажувати тривимірні САД-креслення промислових установок (наприклад, у форматах .step або .obj). Це дає змогу вибудовувати складну геометрію приміщення та виконувати прецизійний розрахунок трасування променів, обчислюючи фактор екранування світла масивними металевими спорудами.

Побудова такого "цифрового двійника", який враховує реальні габарити наявного оснащення, є фундаментальним кроком сучасного світлодизайну. Завдяки цій процедурі інженери здатні локалізувати потенційно небезпечні темні ділянки ще на етапі паперового планування. Це дозволяє завчасно відкоригувати координати підвісу LED-модулів, тим самим уникаючи дорогих переробок вже під час фізичного монтажу на об'єкті.

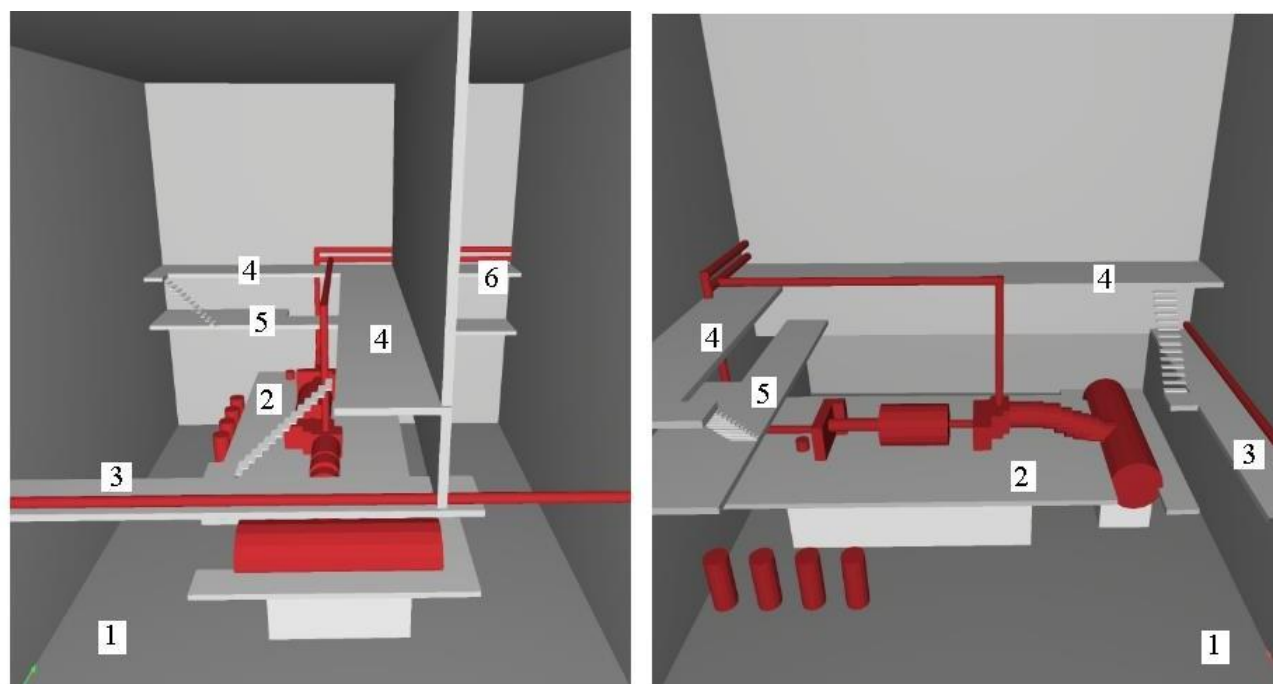


Рис. 7.9. Візуалізація машинного залу перекачувальної станції у тривимірному середовищі DIALux EVO

Як основу для формування мережі базового підсвічування перекачувального комплексу було обрано сучасні світлодіодні джерела лінійки ДСП65В (їхній дизайн

проілюстровано на рисунку 7.10). Дане обладнання сконструйоване цілеспрямовано для складних умов експлуатації: виробничих цехів, логістичних терміналів чи інших специфічних підприємств. Ключовою перевагою цих приладів є їхня офіційна сертифікація для інсталяції всередині просторів, яким присвоєно статус пожежонебезпечних зон класів П-I та П-II. Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), конструкція таких світильників гарантує відсутність іскріння та перегріву зовнішнього корпусу, що зводить до мінімуму будь-які ризики випадкового загоряння парів або пилу.



Рис. 7.10. Конструктивне виконання промислового LED-світильника серії ДСП65В

Використані LED-джерела моделі ДСП65В відрізняються надзвичайно високими показниками пиловологозахисту (зазвичай на рівні IP65). Це перетворює їх на оптимальне рішення під час облаштування важких промислових середовищ, якими є перекачувальні станції. Архітектура корпусу даного обладнання гарантує відмінну опірність агресивним факторам: надмірній концентрації водяної пари в повітрі, різким стрибкам температури, а також вібраціям, що виникають під час роботи потужних гідравлічних машин.

До ключових переваг обраної освітлювальної апаратури варто віднести значну економію електроенергії та величезний робочий ресурс (виробник декларує близько п'ятдесяти тисяч годин функціонування до суттєвої деградації світлодіодного кристала). Відповідно, експлуатаційні витрати на заміну перегорілих елементів зводяться практично до нуля, при цьому яскравість залишається стабільною роками. На відміну від застарілих газорозрядних аналогів (таких як ДРЛ чи ДНаТ), напівпровідникові матриці запускаються миттєво, обминаючи тривалий процес розпалювання. Ця характеристика відіграє критично важливу роль при інтеграції приладів у мережу аварійного підсвічування

перекачувальних вузлів у разі виникнення позаштатних ситуацій.

Наявність маркування зон П-I та П-II за рівнем пожежної безпеки вказує на імовірність скупчення там різноманітних горючих фракцій чи матеріалів. Подібне середовище диктує суворі норми щодо проектування будь-яких електротехнічних пристроїв. Обрана серія ДСП повністю задовольняє ці жорсткі стандарти, оскільки має ізольований пожежобезпечний корпус, котрий надійно герметизує внутрішні струмопровідні контакти та блоки живлення, запобігаючи іскрінню.

Щоб здійснити глибоку інженерну експертизу розподілу фотонів, ми застосували раніше збудований 3D-макет перекачувальної станції в екосистемі DIALux EVO. Впровадження такої симуляції дає можливість скрупульозно проаналізувати фізичні перешкоди на шляху променів: контури самої будівлі, габарити масивних агрегатів, прокладені магістралі труб та іншу допоміжну інфраструктуру. На противагу класичному ручному методу коефіцієнта використання (який оперує порожніми кімнатами спрощеної геометрії), алгоритми комп'ютерного трасування генерують набагато точнішу і наближену до реальності картину.

Багатовимірна симуляція дозволяє знімати метрики не лише з горизонтальної площини підлоги, але й фіксувати рівень вертикальної освітленості. Це надзвичайно важливо для коректного зняття показань із манометрів, датчиків чи пультів керування, а також для безпечного пересування сервісними естакадами. В умовах перекачувальної станції, де операторам доводиться інспектувати вентиля та засувки з різних ракурсів на різних висотах, такий об'ємний аналіз є просто незамінним.

Програмний комплекс вміє коректно інтерпретувати стандартизовані LDT або IES файли обраних джерел. Система точно зчитує індивідуальну криву сили світла (KCC), спектр випромінювання та просторову геометрію пучка. Окрім прямого засвічення, софт бере до уваги відбиту складову, спираючись на альбедо матеріалів – здатність стін, підлогового покриття та сталевих кожухів відбивати світло назад у робочий простір.

Завдяки попередньому віртуальному тестуванню інженери здатні знайти

						66

ідеальну локацію для кожної лампи ще під час розробки креслень. Це нівелює ризик появи небезпечних сліпих плям і гарантує м'яку, рівномірну заливку всієї території перекачувальної станції.

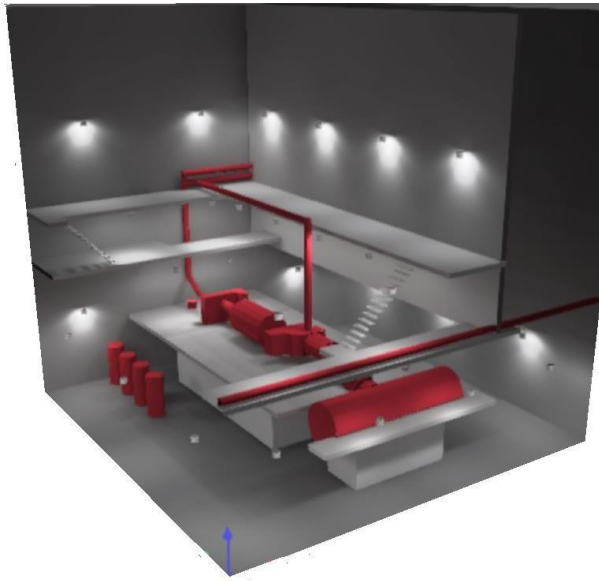


Рис. 7.11. Тривимірна візуалізація розташування джерел світла в машинному залі перекачувальної станції

Підсумки багатовимірного фотометричного симулювання спроектованої мережі, скомбінованої з джерел серії ДСП65В та спеціалізованих ДСП19УЕх, дозволили зафіксувати точні параметри яскравості вздовж усього вертикального профілю машинного залу перекачувальної станції.

Зафіксовані показники інтенсивності світла на різних висотних позначках розподілилися так:

- Базова площа підлоги (нульова відмітка) демонструє рівень 78,5 люкса;
- Сервісна галерея біля головних перекачувальних агрегатів (висота +3,0 м) освітлена на 75 люксів;
- Траса переміщення персоналу на рівні +6,0 метрів отримує 81 люкс;
- Перша сервісна естакада на дев'ятиметровій висоті має показник 87 люксів;
- Перехідний місток (ярус +6,6 м) яскраво залитий на 89 люксів;
- Альтернативна ділянка обслуговування на відмітці +9,0 м (у суміжному блоці залу) фіксує 73 люкси.

Експертний розбір зібраних цифрових даних підтверджує вкрай стабільну картину розподілу фотонів уздовж усіх експлуатаційних ярусів об'єкта.

Зафіксований коридор коливань (від 73 до 89 люксів) є чудовим індикатором грамотно підібраної конфігурації. Такий вузький діапазон доводить, що інженери успішно нівелювали фактори затінення, спричинені складною багаторівневою просторовою геометрією індустріальної споруди.

Інтеграція в загальну топологію специфічних модулів ДСП19УЕх (де маркування "Ех" вказує на Explosion-proof) гарантує безпрецедентний ступінь захисту на тих локаціях, де існує підвищений ризик концентрації летких горючих сумішей чи надмірної вогкості. Подібна апаратура виготовляється в жорсткому вибухобезпечному форматі: її товстостінна оболонка здатна витримати внутрішній тиск гіпотетичного мікровибуху і не пропустити полум'я назовні, повністю відповідаючи суворим міжнародним директивам (наприклад, АТЕХ).

Особливу увагу слід звернути на відповідність розрахункових цифр регламенту ДБН В.2.5-28. Абсолютна більшість ярусів впевнено перекидає або дорівнює базовому ліміту у 75 люксів, необхідному для приміщень перекачувальних станцій. Локальне просідання до 73 лк на одному з верхніх майданчиків лежить у межах нормативної десятивідсоткової інженерної похибки і не впливає на загальну картину. Це підтверджує факт створення абсолютно безпечного візуального середовища для комфортної щоденної діяльності операторів на будь-якій висоті.

7.4 Обчислення параметрів електричної мережі освітлення машинного залу перекачувальної станції

Живлення встановлених LED-модулів усередині індустріального простору перекачувальної станції організовано за допомогою ізольованих групових контурів. Вони підключатимуться до двох незалежних розподільних вузлів: щита штатного (робочого) світла та панелі аварійного живлення. Щоб мінімізувати небезпеку для технічного персоналу під час гіпотетичних форс-мажорів та забезпечити безперешкодний сервісний доступ, ці шафи керування винесено за периметр головного машинного залу.

Для створення надійної електромережі проектом передбачено прокладання силового проводу марки ВВГнг, оснащеного монолітними мідними струмопровідними жилами та оболонкою з полівінілхлоридного пластикату. Цей різновид кабельно-провідникової продукції відрізняється низкою вагомих експлуатаційних переваг:

- Мінімальний опір: високоякісний мідний сплав гарантує відмінну провідність, що суттєво знижує нагрівання магістралей під тривалим навантаженням;
- Хімічна стійкість: ПВХ-ізолятор демонструє чудову інертність до підвищеної вологості та агресивних домішок у повітрі;
- Пожежна безпека: маркування «нг» свідчить про те, що зовнішня оболонка не підтримує горіння при груповій прокладці траси (завдяки інтеграції спеціальних добавок-антипіренів);
- Електрична міцність: номінальна межа ізоляції розрахована на напругу до 1000 вольтів змінного струму;
- Термостабільність: матеріали зберігають свою гнучкість та діелектричні властивості у широкому кліматичному коридорі (від мінус 50 до плюс 50 градусів за Цельсієм);
- Механічна витривалість: провідник чудово протистоїть вібраційному фону від працюючих гідравлічних агрегатів.

Монтаж електротрас здійснюватиметься всередині оцинкованих металевих лотків або ж за допомогою захисної гофротруби. Такий підхід створює надійний бар'єр проти фізичних пошкоджень та значно полегшує процес модернізації у майбутньому. Комутація проводів відбуватиметься виключно всередині спеціалізованих розгалужувальних коробок зі стандартом герметичності IP65. Це абсолютно необхідна умова для довговічної роботи комунікацій у специфічному вологому мікрокліматі перекачувального комплексу.

Фізичне розмежування контурів штатного та евакуаційного освітлення є ключовою вимогою надійності. Завдяки такому дублюванню, навіть у разі повного знеструмлення базової лінії, критично важливі ділянки залишаться освітленими. Це

дозволить операторам продовжувати моніторинг ситуації та гарантує безперервність технологічного процесу.

Перевірка спроектованої конфігурації на предмет допустимої втрати напруги (яка в загальному вигляді обчислюється як

$$\Delta U = \frac{M}{C \cdot S},$$

де M – момент навантаження, C – коефіцієнт матеріалу, S – переріз провідника) буде продемонстрована на найскладнішій ділянці ланцюга. Для цього аналізу обрано першу магістраль від аварійного щитка (ЩОА), оскільки вона генерує максимальні показники струмового навантаження. Деталізована топологія цього сегмента відображена на графічному матеріалі нижче.

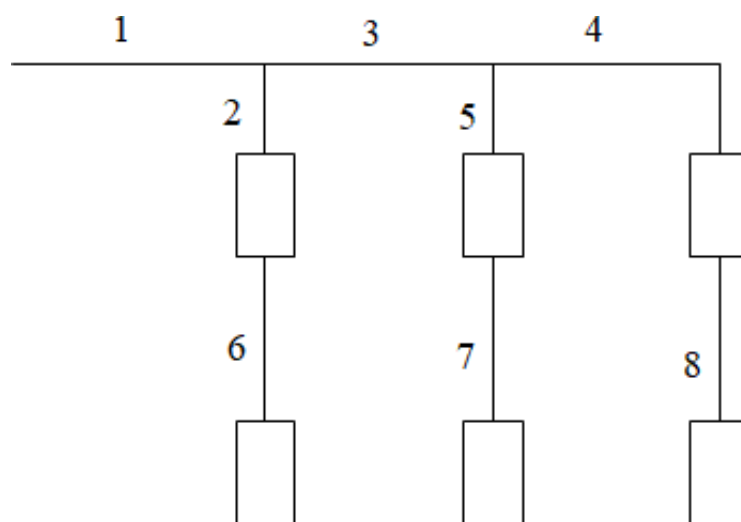


Рис. 7.12. Розрахункова топологія першої лінії від щитка аварійного освітлення (ЩОА)

Рішення досліджувати саме ту ділянку ланцюга, яка несе найбільше споживання струму, спирається на базові принципи надійності електротехнічних систем. Оскільки через цей контур протікають максимальні амперажі, ризик критичного просідання вольтажу на кінці траси є найвищим. За умови, що обчислення для такого екстремального режиму (worst-case scenario) підтвердять

дотримання державних будівельних норм, можна стверджувати з абсолютною впевненістю: решта, менш завантажених гілок, матимуть значний запас міцності та апріорі задовольнятимуть регламент.

Зниження електричного потенціалу всередині магістралей виникає як наслідок подолання струмом комплексної протидії провідника – суми активної та індуктивної складових (імпедансу Z). Проте сучасні драйвери LED-апаратури характеризуються надзвичайно високим коефіцієнтом потужності (зазвичай $\cos \varphi \approx 0,95 \dots 0,98$), створюючи переважно активне навантаження. Завдяки цій властивості світлодіодів, під час проектування мереж освітлення перекачувальної станції реактивною складовою часто нехтують, концентруючи увагу інженерів виключно на активному опорі мідних жил.

Згідно з чинними галузевими директивами (ПУЕ та ДБН), гранично допустима межа відхилення потенціалу для систем штучного світла лімітується п'ятьма відсотками від номіналу джерела живлення. Це означає: якщо розглядається класична однофазна розводка на 220 вольтів, дозволена втрата не має перевищувати 11 В. Відповідно, для міжфазної напруги трифазного підключення (380 вольтів) цей поріг зростає до 19 В.

Головні критерії, які безпосередньо формують масштаб падіння вольтажу:

- Фізична протяжність траси (дистанція від комутаційного апарата в розподільній шафі до найбільш віддаленого в ланцюзі світлового модуля);
- Геометрична площа поперечного перерізу струмопровідної міді та її питома електрична провідність;
- Сумарна амплітуда струму, який споживають усі паралельно підключені пристрої в межах цієї групи;
- Специфіка блоків живлення світильників (наявність і величина реактивної складової потужності);
- Термічні умови довкілля – варто пам'ятати, що опір металів зростає пропорційно підвищенню температури повітря всередині машинного залу.

Процедура обчислення необхідних параметрів мережі штучного світла базується на використанні такого математичного співвідношення для площі перерізу:

$$S = \frac{\sum M}{C \cdot \Delta U \%}$$

Амплітуда сукупного моменту навантаження для першого сегмента траси розраховується як сума добутків потужностей ламп на довжину відповідних відрізків дроту:

$$M_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n P_k \cdot l_k$$

Після підстановки конкретних значень довжин та потужностей у розгорнутий вираз, отримуємо фінальний результат для досліджуваного контуру:

$M_{\Sigma} = 16,56 \text{ кВт} \cdot \text{м}$ З огляду на отримані проміжні цифри, приймаємо найближче стандартне значення площі поперечного перерізу кабельної продукції, яке дорівнює $2,5 \text{ мм}^2$. Спираючись на цей вибір, необхідно перевірити фактичне падіння потенціалу на даній гілці та переконатися, що воно не перевищує нормативне. Розрахункові втрати напруги на суміжних ділянках (2 та 3) також підтверджують правильність обраного перерізу:

$$\Delta U_{\text{факт}} = 1,9\%$$

Щоб коректно підібрати запобіжну комутаційну апаратуру, слід обчислити номінальний ампераж. Формула для визначення робочого струму має такий вигляд:

$$I_p = \frac{P_{\text{розр}}}{U \cdot \cos \varphi}$$

Відповідно, для початкової ділянки цей робочий показник становитиме:

						72

$$I_p = 1,65 \text{ A}$$

Спираючись на знайдену величину струмового навантаження, здійснюємо пошук оптимального пристрою безпеки для окремої групи. У нашому проекті було вирішено інсталювати автоматичні вимикачі. Дані прилади гарантують надійне розривання ланцюга у разі виникнення теплового перевантаження магістралі або короткого замикання.

Під час підбору захисної автоматики вкрай необхідно брати до уваги технологічні особливості функціонування LED-джерел. Головна мета – уникнути хибного розриву кола під впливом стартових струмових імпульсів. Подібні сплески неминуче генеруються в момент одночасної подачі напруги на всі прилади в межах однієї гілки. Цей ефект є характерною рисою сучасних потужних світлодіодів, блоки живлення яких здатні продукувати короткочасні, але значні амплітудні перевантаження під час старту.

Аби гарантувати безперебійне функціонування індустріальної освітлювальної установки перекачувальної станції, ми зупинили свій вибір на автоматах, що володіють часо-струмовою кривою класу D. Зазначений профіль розчеплювача вважається найбільш раціональним інженерним рішенням.

Ключові експлуатаційні переваги автоматів категорії D:

- Поріг реагування електромагнітної котушки налаштований на широкий діапазон (від 10 до 20 номіналів струму I_n);
- Максимальна толерантність до різких стартових сплесків, що генеруються під час запуску драйверів;
- Відмінна селективність при каскадному підключенні з потужнішими ввідними рубильниками;
- Безвідмовне блокування струмів КЗ без ризику хибних відключень у штатному режимі експлуатації.

Аналіз альтернативних кривих спрацьовування:

						73

- Модифікація В (спрацювання при $3-5 I_n$) – є надто чутливою, тому абсолютно не підходить для магістралей із потужними промисловими лампами;
- Модифікація С (спрацювання при $5-10 I_n$) – зберігає високу ймовірність випадкового відключення через сумарний пусковий імпульс масиву світильників;
- Модифікація D (спрацювання при $10-20 I_n$) – ідеально збалансований варіант для контурів зі значною ємнісною або індуктивною складовою.

Інноваційні LED-пристрої серій ДСП65В, а також вибухозахищені ДСП19УЕх комплектуються імпульсними драйверами. В перші мілісекунди після подачі напруги їхні конденсатори здатні провокувати скачок споживання, який перевищує штатний показник у 5–8 разів. Якщо ж оператор активує всю гілку одночасно, акумульований стартовий ампераж легко досягає критичних меж. Менш інертний автомат у такій ситуації гарантовано знеструмить лінію.

Саме тому інтеграція автоматичних вимикачів класу D забезпечує надійне підтримання працездатності всього світлотехнічного комплексу. Цей інженерний крок превентивно усуває проблему раптових знеструмлень машинного залу, повністю зберігаючи при цьому повноцінний ступінь захисту ізоляції від реальних аварійних режимів.

ВИСНОВКИ

У ході виконання даної роботи було реалізовано комплексне інженерне дослідження, спрямоване на проектування та оптимізацію системи електрозабезпечення промислового об'єкта (насосної станції). Отримані результати дозволяють сформулювати низку фундаментальних висновків, що підтверджують технічну доцільність та економічну ефективність прийнятих проектних рішень.

Першочерговим етапом роботи став аналіз структури споживання та визначення конфігурації магістральних ліній. Шляхом глибокого техніко-економічного співставлення було обґрунтовано вибір радіальної схеми на напрузі 10 кВ. Дане рішення забезпечує найвищий рівень селективності захисту та спрощує процедуру локалізації можливих аварійних ділянок, що є критично важливим для об'єктів першої та другої категорій надійності. Впровадження дволанцюгових ліній дозволило мінімізувати ризики технологічного простою, забезпечивши безперебійність роботи насосних агрегатів у разі виходу з ладу одного з живлячих вводів.

Одним із найважливіших досягнень проекту став інтегральний підхід до вибору кількості та потужності цехових підстанцій. Замість традиційного вибору, заснованого лише на сумарній потужності, було застосовано методику мінімізації зведених витрат. Аналіз показав, що найбільш раціональним варіантом для даного підприємства є встановлення 12 силових трансформаторів потужністю 1600 кВА кожен. Таке рішення дозволяє підтримувати коефіцієнт завантаження на рівні 0,7–0,73, що гарантує наявність необхідного резерву для автоматичного вмикання резерву (АВР) в аварійних режимах і водночас мінімізує питомі втрати холостого ходу.

У роботі приділено значну увагу питанню енергозбереження через компенсацію реактивної енергії. Було доведено, що лише комбінована схема компенсації (на стороні високої та низької напруги) забезпечує ідеальний баланс потужностей. Використання автоматизованих конденсаторних установок

						75

дозволило не тільки розвантажити силові трансформатори та лінії зв'язку, але й суттєво покращити показники якості напруги у вузлах навантаження. Це, у свою чергу, веде до зниження термічного зносу ізоляції електродвигунів та подовження їхнього експлуатаційного ресурсу.

Проведений детальний розрахунок струмів короткого замикання у ключових точках мережі дозволив здійснити прецизійний підбір захисної та комутаційної апаратури. Вибір сучасних вакуумних вимикачів серії BP2 та кабелів з паперовою ізоляцією (ААШв) був підтверджений перевіркою на термічну та динамічну стійкість. Встановлено, що вибране обладнання володіє значним запасом відключаючої здатності, що гарантує безпеку експлуатації об'єкта навіть при найнесприятливіших сценаріях виникнення електричної дуги. Врахування підживлення від потужних асинхронних двигунів при розрахунку ударного струму додало результатам високого ступеня достовірності.

Науково-дослідна частина роботи, присвячена модернізації освітлювальних мереж насосної станції, продемонструвала переваги цифрового моделювання. Замість застарілих спрощених методів було впроваджено ітераційні алгоритми випромінюваності (Radiosity) у середовищі DIALux EVO.

Головним науковим результатом стало виведення аналітичної залежності відносного кроку розміщення світильників від коефіцієнта форми їхньої кривої сили світла.

Апроксимація отриманих даних степеневою функцією дозволила автоматизувати процес проектування, зробивши його незалежним від суб'єктивних похибок при зчитуванні графіків.

Перехід на високотехнологічні LED-модулі серії ДСП65В у поєднанні з оптимізованою топологією їх розміщення дозволив досягти нормативної освітленості при суттєвому зниженні встановленої потужності системи освітлення.

Підсумкові економічні показники проекту свідчать про його високу рентабельність. Завдяки комплексному впровадженню енергозберігаючих технологій (компенсація реактивної потужності, вибір оптимальних перерізів кабелів, сучасне освітлення) вдалося досягти суттєвого зниження щорічних

						76

експлуатаційних витрат. Термін окупності додаткових капітальних вкладень у високоефективне обладнання відповідає нормативним вимогам, що робить проект привабливим для реальних умов ринкової економіки.

Запроектована система електропостачання відповідає сучасним стандартам екологічної безпеки. Використання вакуумних комутаційних апаратів виключає ризик забруднення навколишнього середовища продуктами розпаду масла або елегазу. Розраховані рівні освітленості та застосовані методи захисту від ураження електричним струмом забезпечують комфортні та безпечні умови праці для оперативного персоналу насосної станції, що є невід’ємною частиною сталого розвитку підприємства.

Запропоновані у кваліфікаційному проекті технічні рішення є цілісною, науково обґрунтованою системою, яка вирішує основне завдання – побудову надійного, гнучкого та енергоефективного комплексу електрозабезпечення промислового споживача. Матеріали роботи, зокрема розрахункові алгоритми спеціального розділу, можуть бути рекомендовані для впровадження у практику проектних організацій електроенергетичного профілю.

						77

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.] ; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.
2. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с.
3. Електропостачання: підручник / П. О. Василега. – Суми: СДУ, 2019. – 521 с.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Г. Г. Півняк, В. Н. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен та ін. – Дніпропетровськ : Вид-во НГА України, 2000. – 378 с.
5. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування : навчальний посібник / В. Г. Рудницький. – Суми : Університетська книга, 2006. –153 с.