

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ П. Плешков
“ ____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Розробка системи електропостачання головної
насосної станції
Development of the power supply system for the main
pumping station»**

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ЕЕ-22мб
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ М. Артьомов
« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи
доцент, канд. техн. наук
_____ О. Сіріков
« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

Міністерство освіти і науки України
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

_____ П. Плешков

« _____ » _____ 2025 р.

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

Артёмову Максиму Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи *Розробка системи електропостачання головної насосної станції*
Development of the power supply system for the main pumping station

2. Керівник роботи *Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент*

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

3. Строк подання роботи до захисту *05.06.2025 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи *Мета: розробка системи електропостачання головної насосної станції.*

Завдання: 1. Вступ. 2. Розрахунок електричних навантажень. 3. Побудова графіків електричних навантажень підприємства. 4. Побудова картограм електричних навантажень. 5. Вибір напруги і електричних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства. 6. Режими реактивної потужності системи електропостачання. 7. Вибір кількості, потужності трансформаторів підстанцій підприємства. 8. Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання і високовольтних мереж системи електропостачання. 9. Спеціальний розділ. Розробка системи електрозбереження. 10. Заключение. 11. Література.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	<i>03.03</i>	
2	<i>Розрахунок електричних навантажень підприємства</i>	<i>10.03</i>	
3	<i>Побудова графіків електричних навантажень підприємства</i>	<i>17.03</i>	
4	<i>Побудова картограм електричних навантажень</i>	<i>24.03</i>	
5	<i>Вибір напруги і електричних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства</i>	<i>31.03</i>	
6	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>	<i>07.04</i>	
7	<i>Вибір кількості, потужності трансформаторів підстанцій підприємства</i>	<i>14.04</i>	
8	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання і високовольтних мереж системи електропостачання</i>	<i>21.04</i>	
9	<i>Спеціальний розділ. Розробка системи електрозбереження</i>	<i>28.04</i>	
10	<i>Заключення</i>	<i>05.05</i>	
11	<i>Література</i>	<i>12.05</i>	
12	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та графічних матеріалів</i>	<i>19.05</i>	
13	<i>Виконання презентації графічних матеріалів кваліфікаційної роботи</i>	<i>05.06</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2025 р.

Підпис керівника

_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2025 р.

Підпис здобувача

_____ Артёмов М.Д.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 70 с.; 12 рис.; 25 табл.; 9 джерел

Артёмов М.Д. Розробка системи електропостачання головної насосної станції. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ЦНТУ, Кропивницький, 2025 рік.

В даній кваліфікаційній роботі розроблена система електропостачання головної насосної станції.

В першому розділі приведена коротка характеристика технологічного процесу, а також вихідні данні для розрахунку. В другому розділі проведено розрахунок силових електричних навантажень, а також розрахунок освітлювальних навантажень. В третьому розділі побудовані графіки електричних навантажень. В четвертому розділі виконані розрахунки для побудови картограми навантажень та обрано місце розташування ЦРП. В п'ятому розділі розглянуто питання вибору схем електропостачання шляхом техніко-економічного порівняння варіантів зовнішнього та внутрішнього електропостачання. В шостому розділі розглянуто питання компенсації реактивної потужності: обрано потужність компенсуючих пристроїв та місце їх розташування. В сьомому розділі проведено вибір кількості та потужності трансформаторних підстанцій насосної. В восьмому розділі розраховано струми короткого замкнення в схеми електропостачання, а також проведено вибір сучасного силового електрообладнання. В спеціальному розділі кваліфікаційної роботи розроблена система електрозбереження. Розглянутий загальний підхід та можливі заходи по електрозбереженню. Детально розглянуто питання економії електроенергії в високовольтних двигунах шляхом установки перетворювача частоти.

Ключові слова: електричне навантаження, розрахунок струмів короткого замикання, компенсація реактивної потужності, вибір силового обладнання, електрозбереження

ABSTRACT

Qualification work: 70 p.; 12 Fig.; 25 tables; 9 sources

Artyomov M.D. Development of the power supply system for the main pumping station. - Manuscript.

Qualification work of the first (bachelor's) level of higher education in specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", EPP "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". – Central National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

In this qualification work, the power supply system of the main pumping station is developed.

The first section provides a brief description of the technological process, as well as the initial data for the calculation. In the second section, the calculation of power electrical loads is carried out, as well as the calculation of lighting loads. In the third section, electrical load graphs are constructed. In the fourth section, calculations are made to build a load map and the location of the DCP is selected. In the fifth section, the issue of choosing power supply schemes is considered by means of a technical and economic comparison of external and internal power supply options. In the sixth section, the issue of reactive power compensation is considered: the power of compensating devices and their location are selected. In the seventh section, the number and power of transformer substations of the pumping station are selected. In the eighth section, the short-circuit currents in the power supply schemes are calculated, and modern power electrical equipment is selected. In a special section of the qualification work, an electricity saving system is developed. The general approach and possible measures for electricity saving are considered. The issue of saving electricity in high-voltage motors by installing a frequency converter is considered in detail.

Key words: electrical load, calculation of short-circuit currents, reactive power compensation, selection of power equipment, electricity saving

ЗМІСТ

1	Вступ. Коротка характеристика технологічного процесу підприємства.	7
2.	Розрахунок електричних навантажень головної насосної станції	9
2.1.	Вибір потужності високовольтних синхронних і асинхронних двигунів	10
2.2.	Розрахунок силових електричних навантажень головної насосної станції в електричних мережах до 1000 В.....	12
2.3	Розрахунок освітлювальних навантажень головної насосної станції	13
2.4.	Розрахунок електричних навантажень головної насосної станції в силових мережах вище 1000 В.....	13
3.	Побудова графіків електричних навантажень головної насосної станції.	19
4.	Побудова картограм електричних навантажень головної насосної станції та вибір місця розташування головної понижувальної підстанції або центрального розподільчого пристрою.....	24
5.	Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання головної насосної станції.....	26
5.1	Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього електропостачання підприємства	27
5.2	Техніко-економічне обґрунтування схем внутрішнього електропостачання головної насосної станції.....	33
6.	Режими реактивної потужності системи електропостачання головної насосної станції	34
6.1	Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв головної насосної станції.....	35
6.2	Вибір кількості та місць розташування компенсуючих пристроїв головної насосної станції.	40
7.	Вибір кількості, потужності трансформаторів підстанцій головної насосної станції	41
8.	Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання і мереж головної насосної станції.....	42
8.1.	Пуск синхронних двигунів головної насосної станції	49
8.2.	Самозапуск синхронних двигунів головної насосної станції.....	51
9.	Спеціальний розділ. Розробка системи електрозбереження головної насосної станції.	53
10.	Заклучення.	69
11.	Література	70

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Артёмов М.Д.		
Перевір.		Сіріков О.І.		
Н. Контр.		Сіріков О.І.		
Затв.		Плешков П.Г.		
Розробка системи електропостачання головної насосної станції			Літ.	Аркуш
			6	70
ЦНТУ гр. ЕЕ-22мб				

Таблиця 2.1. Розрахунок електричних навантажень головної насосної станції в мережі до 1000 В.

№ п/п	Найменування обладнання	n	Pн, кВт		Ки	Cos	tg	Середнє		пэ	Км	Розрахункове		
			Одного	Сумарна				Рср	Qср			Pp	Qp	Sp
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Насосна													
	Насоси	6	75-200	825	0,6	0,8	0,75	495	371,3					
	Маслонасоси	6	1,0-2,0	10	0,6	0,8	0,75	6	4,5					
	Вентилятори	12	1,0-5,0	35,5	0,64	0,8	0,75	22,72	17,0					
	Кран-балка	2	5,5	11	0,1	0,5	1,73	1,1	1,9					
	Дренажний насос	1	3,5	3,5	0,7	0,8	0,75	2,45	1,8					
	Фільтри очищення	10	5,0-10	85,00	0,35	0,55	1,52	29,75	45,2					
	Всього по насосній	37	1,0-200	970	0,57	0,78	0,79	557,02	441,7	10	1,28	712,99	441,7	838,72
2	Ремонтно-механічна майстерня													
	Верстат радіально-свердильний	2	11	22	0,2	0,65	1,17	4,4	5,1					
	Верстат вертикально-свердильний	2	6	12	0,14	0,4	2,29	1,68	3,8					
	Токарно-винторізний верстат	2	7,5	15	0,2	0,5	1,73	3	5,2					
	Фрезерувальний верстат	8	3,7-8,5	40,9	0,17	0,65	1,17	6,953	8,1					
	Горизонтально-фрезерувальний верстат	4	5,5-13	44,50	0,17	0,4	2,29	7,565	17,3					
	Заточний верстат	1	4	4	0,21	0,65	1,17	0,84	1,0					
	Долбінжний верстат	1	6	6	0,3	0,5	1,73	1,8	3,1					
	Пиловловлюючий агрегат	1	30	30	0,14	0,4	2,29	4,2	9,6					
	Кран-балка	1	5,5	5,5	0,1	0,5	1,73	0,55	1,0					
	Напівавтомат	3	15-19,6	49,6	0,12	0,4	2,29	5,952	13,6					
	Автомат токарний	1	15	15	0,2	0,5	1,73	3	5,2					
	Всього по майстерні	26	3,7-30	244,5	0,16	0,48	1,83	39,94	73,2	16	1,65	65,90	73,2	98,47
3	Склад													
	Навантажувач	1	10	10	0,4	0,8	0,75	4	3,0					
	Вентилятори	3	2,2	6,6	0,64	0,8	0,75	4,224	3,2					
	Кран-балка	1	5,5	5,5	0,1	0,5	1,73	0,55	1,0					
	Всього по складу	5	2,2-10	22,1	0,40	0,78	0,81	8,774	7,1	4	1,87	16,41	7,1	17,89
4	Гараж													
	Механічні підйомники	2	3	6	0,1	0,6	1,33	0,6	0,8					

Продовження таблиці 2.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Гідравлічні підйомники	3	4,2	12,6	0,1	0,6	1,33	1,26	1,7					
	Кран-балка	3	5,5	16,5	0,1	0,5	1,73	1,65	2,9					
	Гідравлічний прес	1	7	7	0,3	0,7	1,02	2,1	2,1					
	Сушільна камера	2	15	30	0,7	1	0,00	21	0,0					
	Всього по гаражу	14	3,0-15	77,1	0,46	0,90	0,49	35,61	17,5	10	1,5	53,42	17,5	56,20
5	Контора													
	Електронагрівачі	4	1,5	6	0,6	0,95	0,33	3,6	1,2					
	Комп'ютери	6	0,4	2,4	0,5	0,8	0,75	1,2	0,9					
	Кондиціонери	6	3,5-5,5	29	0,3	0,75	0,88	8,7	7,7					
	Бойлери	2	5	10	0,4	0,95	0,33	4	1,3					
	Всього по конторі	18	0,4-5,5	47,4	0,37	0,85	0,63	17,5	11,1	17	1,3	22,75	11,1	25,30
6	Склад для крупних агрегатів													
	Кран мостовий	2	15	30	0,1	0,6	1,33	3	4,0					
	Підйомники	2	3,3	6,6	0,1	0,6	1,33	0,66	0,9					
	Всього по складу	4	3,3-15	36,6	0,10	0,60	1,33	3,66	4,9	4	3,43	12,55	4,9	13,47
7	Хлораторна													
	Насос-дозатор їдкого нагру	1	3	3	0,6	0,8	0,75	1,8	1,4					
	Насос-дозатор сірчаної кислоти	2	1,1	2,2	0,6	0,8	0,75	1,32	1,0					
	Витяжка з реагентного відділення	2	2,2	4,4	0,6	0,8	0,75	2,64	2,0					
	Машина для завантаження сипучих матеріалів	2	12,5	25	0,3	0,8	0,75	7,5	5,6					
	Універсальний погрузчик	1	9,8	9,8	0,3	0,7	1,02	2,94	3,0					
	Насос розвантаження реагентів	4	13	52	0,7	0,8	0,75	36,4	27,3					
	Всього по хлораторній	12	1,1-13	96,4	0,55	0,79	0,77	52,6	40,2	12	1,25	65,75	40,2	77,09
8	Котельня													
	Насоси подачі	8	15-100	465	0,65	0,8	0,75	302,25	226,7					
	Димососи	2	55	110	0,7	0,8	0,75	77	57,8					
	Насоси живлячі	2	32	64	0,7	0,8	0,75	44,8	33,6					
	Вентилятори	4	27	108	0,8	0,7	1,02	86,4	88,1					
	Всього по котельні	16	15-100	747	0,68	0,78	0,80	510,45	406,2	16	1,15	587,02	406,2	713,84
	Всього по насосній	132	0,4-200	2241,1	0,55	0,77	0,82	1225,6	1001,85	22	1,17	1433,90	1001,8	1749,22

Таблиця 2.2. Розрахунок освітлювального навантаження головної насосної станції.

№ п/п	Найменування підрозділу	F, м ²	P ₀ , Вт/м ²	P _у , кВт	tg	Q _у , кВар	K _с	P _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА
1	Насосна	2800	12	33,6	1,73	58,13	0,95	31,9	55,2	63,8
2	Ремонтно-механічна майстерня	900	16	14,4	1,73	24,91	0,9	13,0	22,4	25,9
3	Склад	616	10	6,16	1,73	10,66	0,6	3,7	6,4	7,4
4	Гараж	1540	14	21,56	1,73	37,30	0,8	17,2	29,8	34,5
5	Контора	680	18	12,24	0,48	5,88	0,8	9,8	4,7	10,9
6	Склад для крупних агрегатів	810	8	6,48	1,73	11,21	0,6	3,9	6,7	7,8
7	Хлораторна	375	16	6	0,48	2,88	0,8	4,8	2,3	5,3
8	Котельня	740	16	11,84	0,48	5,68	0,85	10,1	4,8	11,2
9	КПП	98	10	0,98	0,48	0,47	0,9	0,9	0,4	1,0
10	Освітлення території	30540	0,1	3,054	1,73	5,28	1	3,1	5,3	6,1
	Всього по насосній	39099		116,3		162,4		98,3	138,1	169,6

Таблиця 2.3. Розрахунок електричних навантажень головної насосної станції в мережі вище 1000 В.

№ п/п	Найменування обладнання	п	Рн, кВт		Ки	Cos	tg	Середнє		n _о	Км	Розрахункове		
			Одного	Сумарна				Р _{ср}	Q _{ср}			Рр	Qp	Sp
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	ТП 1 1×(2×630)													
1	Насосна силова освітлення	37	1,0-200	970	0,57	0,78	0,79	557,02	441,71	10	1,28	712,99	441,71	838,722
	Всього по насосній							33,6	58,13			31,92	55,22	
5	Контора силова освітлення	18	0,4-5,5	47,4	0,37	0,85	0,63	17,5	11,07	17	1,3	22,75	11,07	25,30
	Всього по конторі							12,24	5,9			9,8	4,7	
6	Склад для крупних агрегатів силова освітлення	4	3,3-15	36,6	0,1	0,6	1,33	3,66	4,88	4	3,43	12,55	4,88	13,47
	Всього по складу							6,48	11,2			3,9	6,7	
	Всього силова по ТП 1	59	0,4-200	1054	0,55	0,78	0,79	578,18	457,6582	11	1,26	728,51	457,7	860,33
	Всього освітлення по ТП 1							52,32	75,2136			45,6	66,648	
	Всього по ТП 1							630,5	532,87			774,11	524,31	934,95
	КП 0,4 кВ												134,00	
	Всього по ТП 1 з КП											774,11	390,31	866,94
	Втрати потужності в тр-рах 2×630											11,74	58,01	
	Всього по ТП на шинах 10 кВ											785,84	448,31	904,73
	ТП 2 (2×630)													
	Ремонтно-механічна майстерня													
2	силова освітлення	26	3,7-30	244,5	0,16	0,48	1,83	39,94	73,16	16	1,65	65,90	73,16	98,47
	Всього по майстерні							14,4	24,9			12,96	22,42	
3	Склад силова освітлення	5	2,2-10	22,1	0,4	0,78	0,81	8,77	7,12	4	1,87	16,41	7,12	17,89
	Всього по складу							6,16	10,7			3,7	6,4	
4	Гараж силова освітлення	14	3,0-15	77,1	0,46	0,9	0,49	35,61	17,48	10	1,5	53,42	17,48	56,20
	Всього по гаражі							21,56	37,3			17,2	29,8	

Продовження таблиці 2.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Всього по гаражу							57,17	54,8			70,7	47,32	85,04
7	Хлораторна силова освітлення	12	1,1-13	96,4	0,55	0,79	0,77	52,6	40,24	12	1,25	65,75	40,24	77,09
	Всього по цеху							6	2,9			4,8	2,3	
8	Котельня силова освітлення	16	15-100	747	0,68	0,78	0,8	510,45	406,18	16	1,15	587,02	406,18	713,84
	Всього по котельні							11,84	5,7			10,1	4,8	
9	КПП освітлення							522,29	411,9			597,1	411,01	724,87
	Освітлення території заводу							0,98	0,5			0,9	0,4	
	Всього силова по ТП 2	73	1,1-100	1187,1	0,55	0,77	0,84	647,37	544,19	24	1,15	744,48	544,2	922,17
	Всього освітлення по ТП 2							63,99	87,18			52,70	71,50	
	Всього по ТП 2											797,18	615,69	1007,26
	КП 0,4 кВ												266,00	
	Всього по ТП 2 з КП											797,18	349,69	870,51
	Втрати потужності в тр-рах 2×630											11,80	58,28	
	Всього по ТП на шинах 10 кВ											808,98	407,96	906,03
	Всього силова по заводу 0,4 кВ	132	2-350	2241,1	0,55	0,77	0,82	1225,55	1001,85	13	1,12	1372,62	1001,8	1699,35
	Всього освітлення по заводу							116,31	162,40			98,30	138,14	
	Всього навантаження по заводу							1341,87	1164,25			1470,92	1139,99	1860,97
	Всього КП 0,4 кВ по заводу												400,0	
	Всього по заводу з КП											1470,92	739,99	1646,57
	Всього втрати потужності в тр-рах											23,5	116,3	
	Всього НН по ТП на шинах 10 кВ											1494,46	856,28	1722,38
1	Насосна СД 10 кВ	4	800	3200	0,8	0,9	0,48	2560	1239,9	4	1,14	2918,40	-200,0	2925,25
	Всього по заводу на шинах 10кВ											4412,9	656,28	4461,4

3. Побудова графіків електричних навантажень головної насосної станції.

Методика розрахунку характеристик графіків електричних навантажень та їх побудови, використаних в цьому розділі, детально наведена в [3-5] і тут не приводиться. При виконанні цього розділу застосований математичний пакет Mathcad, а нижче наводимо скріншот.

1. Активне розрахункове навантаження:

$$P_{\max} := 4412.9 \text{ кВт}$$

2. Реактивне розрахункове навантаження:

$$Q_{\max} := 1256.28 \text{ квар}$$

$$T_{\text{лето_р}} := 105 \quad T_{\text{лето_в}} := 48$$

$$T_{\text{зима_р}} := 147 \quad T_{\text{зима_в}} := 65$$

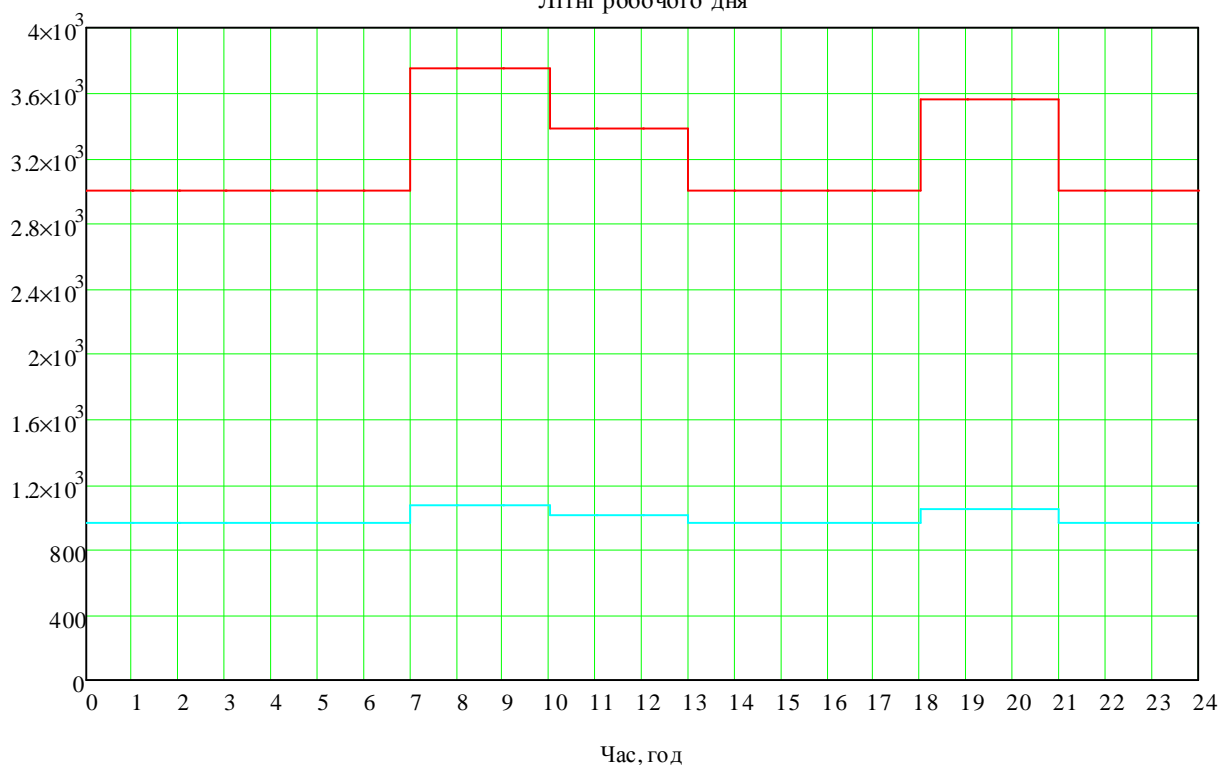
$$T_{\Gamma} = 365$$

3. Задання графіка навантаження (в %) для кожної ступені графіка (для активної потужності, 2 - для реактивної потужності):

Робочі дні		
	1	2
1	80	90
2	80	90
3	80	90
4	80	90
5	80	90
6	80	90
7	80	90
8	100	100
9	100	100
10	100	100
11	90	95
12	90	95
13	90	95
14	80	90
15	80	90
16	80	90
17	80	90
18	80	90
19	95	98
20	95	98
21	95	98
22	80	90
23	80	90
24	80	...

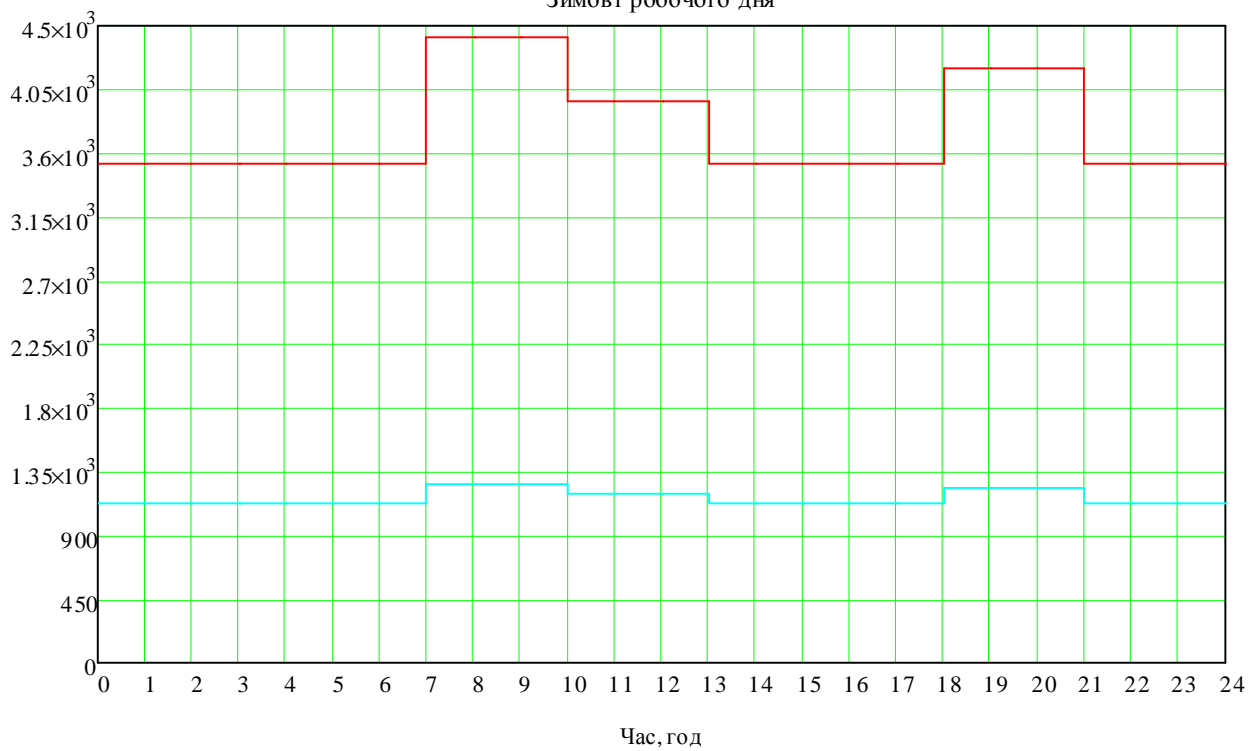
Вихідні дні		
	1	2
1	80	90
2	80	90
3	80	90
4	80	90
5	80	90
6	80	90
7	80	90
8	100	100
9	100	100
10	100	100
11	90	95
12	90	95
13	90	95
14	80	90
15	80	90
16	80	90
17	80	90
18	80	90
19	95	98
20	95	98
21	95	98
22	80	90
23	80	90
24	80	90

Літні робочого дня



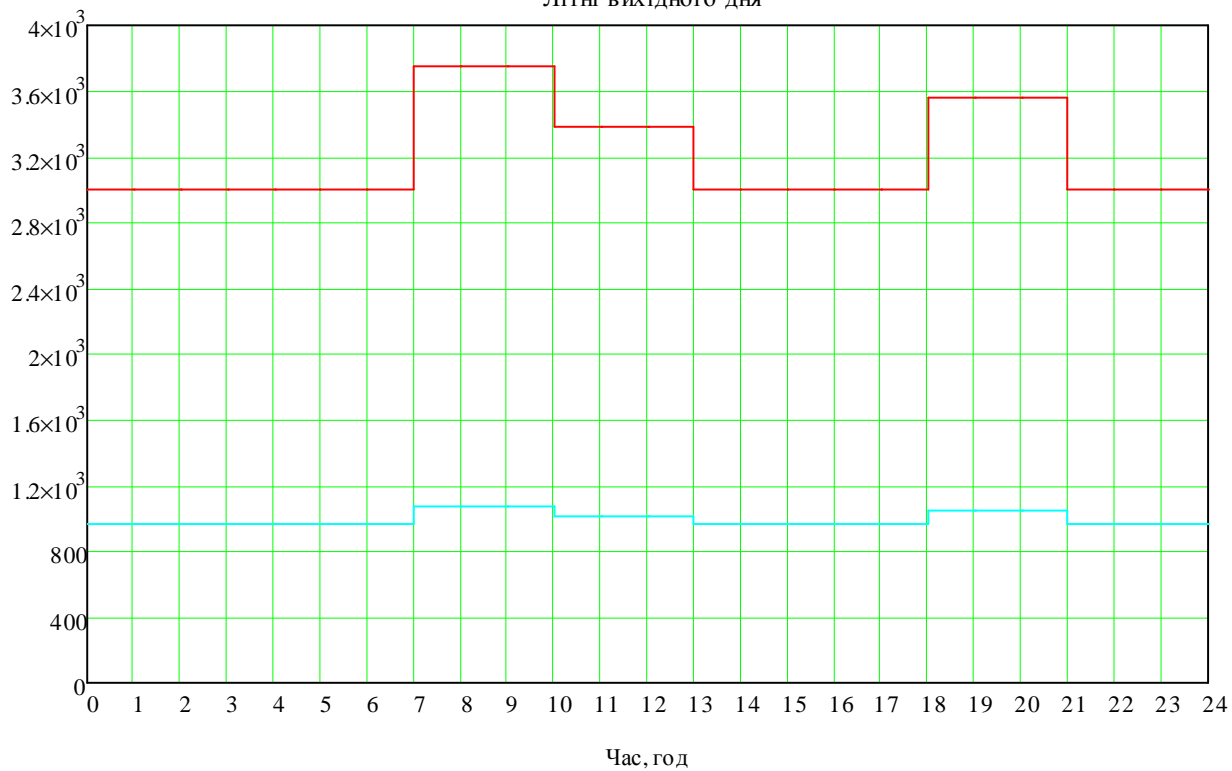
▬ P
▬ Q

Зимові робочого дня



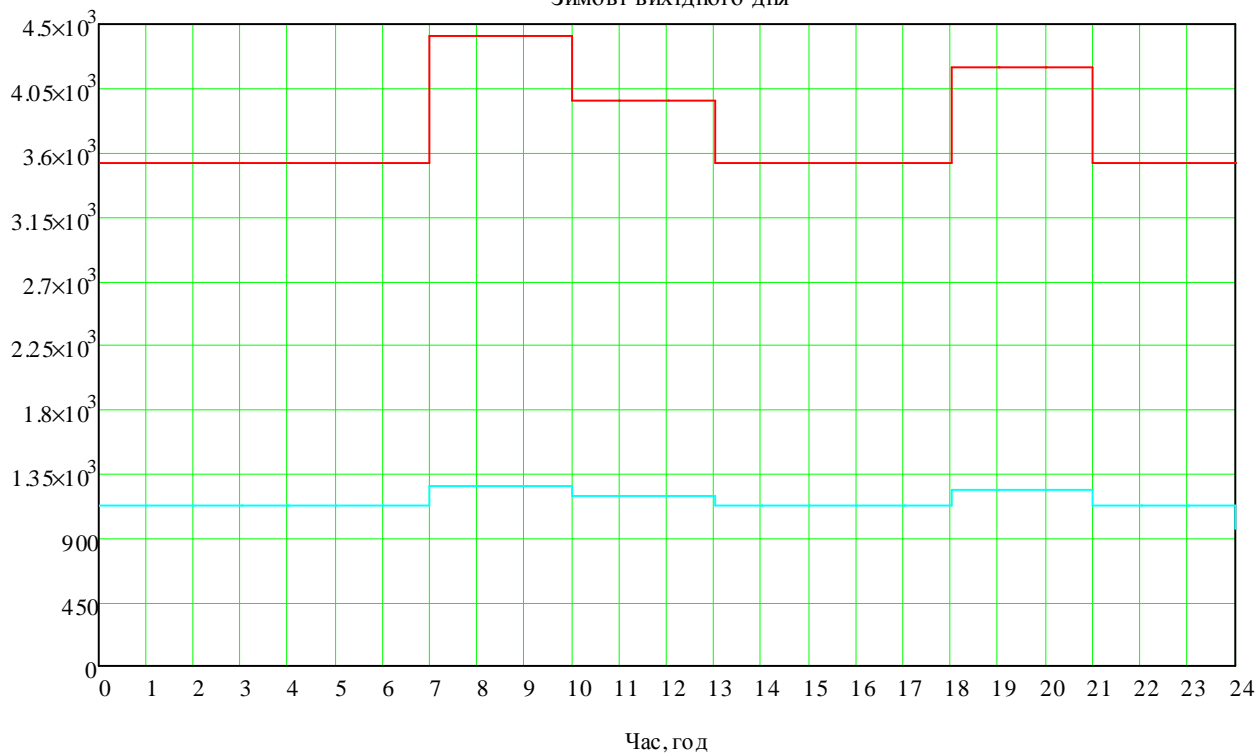
▬ P
▬ Q

Літні вихідного дня

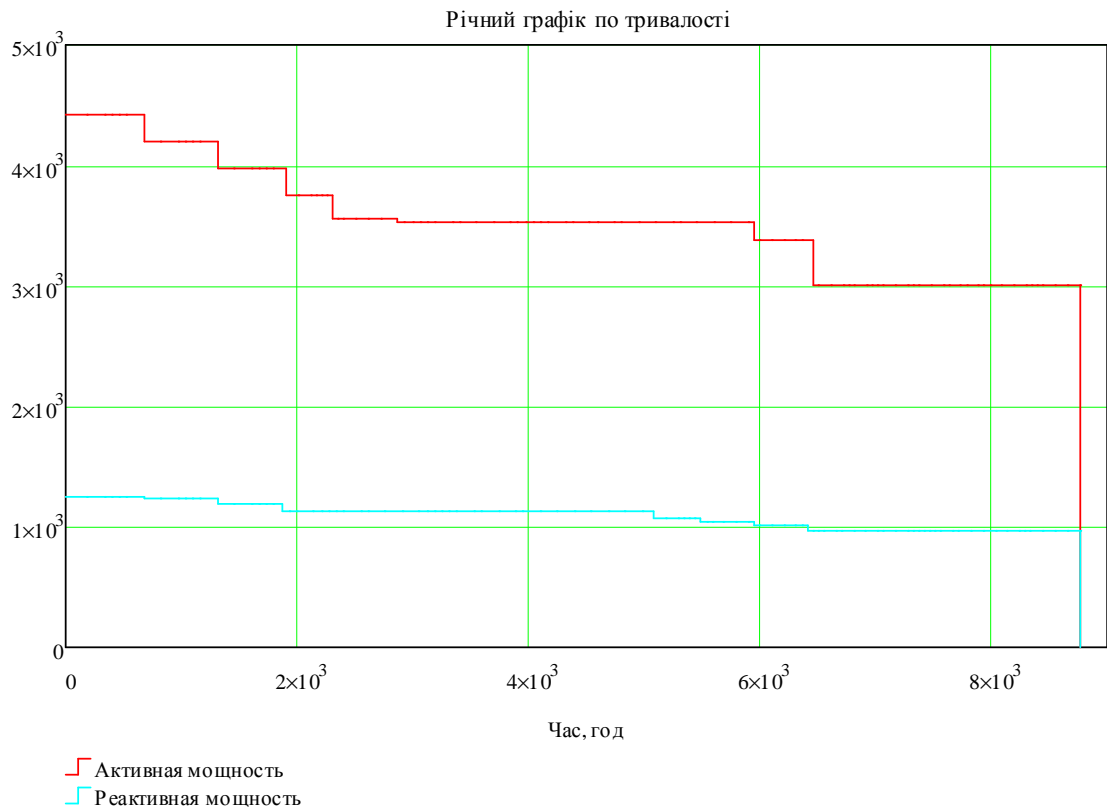


┌ P
┌ Q

Зимові вихідного дня



┌ P
┌ Q



Споживання активної електроенергії за літню вихідну добу, кВт·год:

$$W_{\text{лето_в}} = 77082$$

Споживання активної електроенергії за літню робочу добу, кВт·год:

$$W_{\text{лето_р}} = 77082$$

Споживання активної електроенергії за зимову вихідну добу, кВт·год:

$$W_{\text{зима_в}} = 90685$$

Споживання активної електроенергії за зимову робочу добу, кВт·год :

$$W_{\text{зима_р}} = 90685$$

Споживання реактивної електроенергії за літню вихідну добу, квар·год:

$$V_{\text{лето_в}} = 23802$$

Споживання реактивної електроенергії за літню робочу добу, квар·год:

$$V_{\text{лето_р}} = 23802$$

Споживання реактивної електроенергії за зимову вихідну добу, квар·год :

$$V_{\text{зима_в}} = 28002$$

Споживання реактивної електроенергії за зимову робочу добу, квар·год:

$$V_{\text{зима_р}} = 28002$$

Річне споживання активно електроенергії, кВт·год:

$$W_{\Gamma} = 31018837$$

Річне споживання реактивної електроенергії, квар·год:

$$V_{\Gamma} = 9578249$$

Кількість годин використання максимуму потужності, год:

$$T_{\text{max}} = 7075$$

Річний час максимальних втрат, год:

$$\tau = 5794$$

4. Побудова картограм електричних навантажень головної насосної станції та вибір місця розташування головної понижувальної підстанції або центрального розподільчого пристрою.

Розрахунок будемо проводити за методикою з [3-5].

Для прикладу наведемо побудову для ремонтно-механічної майстерні, приймемо, що масштаб $m = 0,1$ кВт/мм²:

Радіус кола для ремонтно-механічної майстерні:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_1}{\pi m}} = \sqrt{\frac{78,86}{\pi 0,1}} = 16 \text{ мм},$$

Сектор, що відповідає освітлювальному навантаженню ремонтно-механічної майстерні:

$$\alpha_i = \frac{P_{i.осв} \cdot 360}{P_1} = \frac{12,96 \cdot 360}{78,86} = 59^\circ.$$

Розрахунок радіусу кола та сектору для інших будівель і приміщень є подібним, результати розрахунку представлені в табл. 4.

Розрахуємо координати центру електричних навантажень головної насосної станції:

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = 271591/4550,43 = 60 \text{ м},$$

$$Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = 237702/4550,43 = 52 \text{ м}.$$

Отже, центр електронавантаження головної насосної станції знаходиться в точці з координатами $X = 60$ м, $Y = 52$ м.

Таблиця 4. Розрахунок картограми електричних навантажень головної насосної станції.

№ на плані	Найменування цеху або відділення	$P_{p}^{сил}, кВт$	$P_{p}^{овс}, кВт$	$\Sigma P_{p}, кВт$	R, мм	$\alpha,$ град	X, м	Y, м	PX, кВт·м	PY, кВт·м
1	Насосна	712,99	31,92	744,91	49	15	50	32	37245,28	23837
		2918,40		2918,40	96	0	50	32	145920	93389
2	Ремонтно-механічна майстерня	65,90	12,96	78,86	16	59	90	104	7097,49	8202
3	Склад	16,41	3,70	20,10	8	66	140	100	2814,4732	2010
4	Гараж	53,42	17,25	70,66	15	88	175	100	12366,025	7066
5	Контора	22,75	9,79	32,54	10	108	135	35	4393,17	1139
6	Склад для крупних агрегатів	12,55	3,89	16,44	7	85	165	28	2712,897	460
7	Хлораторна	65,75	4,80	70,55	15	24	30	135	2116,5	9524
8	Котельня	587,02	10,06	597,08	44	6	95	154	56722,7425	91951
9	КПП	0,00	0,9	0,9	2	360	230	140	202,86	123
	Всього			4550,43					271591	237702

5. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання головної насосної станції

Надійне та економічно доцільне електропостачання головної насосної станції є одним з ключових чинників стабільної роботи систем водопостачання, меліорації, промислових об'єктів чи інженерної інфраструктури. Насосні станції, як правило, є об'єктами з високим рівнем енергоспоживання, а їхній безперебійний режим роботи критично важливий для забезпечення сталого функціонування усього комплексу водо- або техногенного господарства. Відтак вибір оптимальних схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання стає одним із визначальних завдань при проектуванні або реконструкції таких об'єктів.

У межах цього розділу розглядається техніко-економічне обґрунтування альтернативних варіантів побудови системи електропостачання, що включає оцінку надійності, енергоефективності, вартості реалізації, втрат електроенергії та рівня автоматизації. При виборі схеми зовнішнього електропостачання враховуються такі фактори, як відстань до джерела живлення, можливість приєднання до існуючих енергосистем, рівень напруги, категорія надійності, умови території, нормативні обмеження та перспективи розвитку. Для внутрішнього електропостачання насосної станції розглядається структура розподільчих мереж, трансформаторів, вибір електрообладнання з урахуванням режимів роботи насосних агрегатів.

Результати техніко-економічного порівняння дозволяють визначити найбільш доцільну схему з точки зору балансу між капітальними витратами, експлуатаційними витратами, надійністю електропостачання та технічною доцільністю. Це, своєю чергою, забезпечує сталу роботу насосної станції, мінімізує ризики простоїв та енергетичних втрат, а також сприяє ефективному використанню інвестиційних ресурсів.

Вибір напруги і схеми зовнішнього електропостачання проведемо згідно з методикою наведеною в [1, 3, 4].

						Арк.
						26

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{ІКК}} I_{\Sigma} K_3^2 = 125 \cdot 20 \cdot 0,139^2 = 48,3 \text{ кВт},$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} \tau = 48,3 \cdot 5794 = 279865 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Втрати енергії в трансформаторах при нормальному режимі роботи:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ТР}} = 2(\Delta P_{\text{Х}} t_{\text{вкл}} + \Delta P_{\text{К}} K_3^2 \tau) = 2(5,6 \cdot 8760 + 33,5 \cdot 5794 \cdot 0,558^2) = 218983 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сумарні втрати в трансформаторах і лінії складуть:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{л}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ТР}} = 279865 + 218983 = 498848 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Вартість втрат електроенергії:

$$C_{\text{ВТР}} = \Delta \mathcal{E} \cdot C_0 = 498848 \cdot 6,9 = 1097,3 \text{ тис. грн}.$$

Розрахунок витрат за варіантами наведено в таблицях 5.1.1 - 5.1.3.

Таблиця 5.1.1. Розрахунок капітальних вкладень в схеми електропостачання головної насосної станції.

№ вар.	Елемент схеми	Од.	К-ть	Вартість тис. грн	Всього тис. грн
I	Шафи вимикачами, що додатково встановлені на п/ст	шт.	2	150	300
	Кабель ААБ	км	20	260	5200
	Траншея	км	10	118,2	1182
Всього					6682
II	ЛЕП 35 кВ на З/Б опорах	км	10	535	5350
	КТБП 35/10 кВ	Комплект	1	9506,4	9506,4
Всього					14856,4

Таблиця 5.1.2. Розрахунок поточних витрат в схеми електропостачання головної насосної станції.

№ вар.	Елементу схеми	K_j тис. грн.	P_{aj} %	C_{aj} тис. грн.	$P_{эj}$ %	$C_{эj}$ тис. грн.	C_j тис. грн.
I	Кабельна лінія з урахуванням траншеї	6382	5	319,1	2	127,64	446,74
	Шафи КРУ з вимикачами	300	15	45	3	9	54
Всього							500,74
II	ЛЕП 35 кВ	5350	5	267,5	0,14	7,49	274,99
	КТБП 35/10 кВ	9506,4	15	1426	3	285,2	1711,2
Всього							1986,2

Розрахуємо збиток від ймовірного перериву електропостачання для двох варіантів з різними класами напруг.

ВАРІАНТ №1.

Схема для розрахунку надійності одного ланцюга живлення містить вимикач 10 кВ та кабельну лінію з загальною довжиною 10 км

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,01 + 10 \cdot 0,08 = 0,81 \frac{1}{\text{рік}}$$

Середній час на відновлення одного ланцюга

$$T_B = \frac{\sum \lambda_i \cdot T_{B_i}}{\lambda} = \frac{0,01 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} + 0,08 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{0,81} = 0,705 \cdot 10^{-3} \frac{\text{год}}{\text{рік}}$$

Коефіцієнт планового простою для одного ланцюга

$$K_{\text{п}} = 1,2 \cdot K_{\text{пmax}} = 1,2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 10^{-3}$$

Коефіцієнт аварійного простою для одного ланцюга

$$K_{\text{а}} = \lambda \cdot T_B = 0,81 \cdot 0,705 \cdot 10^{-3} = 0,571 \cdot 10^{-3}$$

Коефіцієнт аварійного простою для випадку коли один ланцюг відключений для планового ремонту і при цьому другий відключається із-за пошкодження

$$K_{\text{ап}} = 0,5 \cdot \lambda \cdot K_{\text{п}}^2 = 0,5 \cdot 0,81 \cdot (2,4 \cdot 10^{-3})^2 = 2,333 \cdot 10^{-6}$$

Коефіцієнт аварійного простою двох ліній

$$K_{\text{а}}^{(2)} = K_{\text{а}}^2 + 2 \cdot K_{\text{ап}} = (0,571 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot 2,333 \cdot 10^{-6} = 4,992 \cdot 10^{-6}$$

Середньорічний час аварійного простою схеми електропостачання напругою 10 кВ

$$T_{\text{а}} = K_{\text{а}}^{(2)} \cdot 8760 = 4,992 \cdot 10^{-6} \cdot 8760 = 0,0437 \text{ год.}$$

Середньорічне активне навантаження головної насосної станції складає:

$$P_{\text{ср}} = \frac{4412,9 \cdot 5794}{8760} = 2918,8 \text{ кВт.}$$

Збиток від аварійного недопостачання 1 кВт-год електроенергії головної насосної станції при прийнятому збитку $Y_o = 20$ грн. становить:

$$Y = Y_o \cdot P_{\text{ср}} \cdot T_{\text{а}} = 20 \cdot 2918,8 \cdot 0,0437 = 2,55 \text{ тис.грн.}$$

$$Q_{\text{СДmax}} = \frac{n \cdot \alpha \cdot P_{\text{н}} \cdot \text{tg}\varphi}{\eta} = \frac{4 \cdot 1,3 \cdot 800 \cdot 0,484}{0,94} = 2141,9 \text{ квар.}$$

де α – коефіцієнт перевантаження по реактивній потужності [1].

Мінімально можлива кількість трансформаторів головної насосної станції в:

$$N_0 = \frac{P_{\text{н}}}{K_3 \cdot S_{\text{Т.Н}}} = \frac{1470,92}{0,7 \cdot 630} = 3,33 \approx 4.$$

Розглянемо три варіанти компенсації реактивної потужності головної насосної станції при кількості трансформаторів: $N = N_0$; $N = N_0 + 1$; $N = N_0 + 2$.

Варіант I. Мінімальна кількість трансформаторів $N = N_0 = 4$.

Реактивна потужність, яка може бути передана з мережі 10 кВ в мережу 0,4 кВ головної насосної станції:

$$Q_{\text{П}} = \sqrt{(N \cdot K_3 \cdot S_{\text{Н.Т.}})^2 - P_{\text{Н}}^2} = \sqrt{(4 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 1470,92^2} = 973,7 \text{ квар.}$$

Значення потужності компенсуючих пристроїв, які встановлюються в мережі 0,4 кВ визначаємо з балансу реактивної потужності на шинах ТП:

$$Q_{\text{КН}} = Q_{\text{Н}} - Q_{\text{П}} = 1139,99 - 973,7 = 166,29 \text{ квар.}$$

Прийемо стандартну потужність конденсаторних батарей $Q_{\text{КН}} = 400$ квар, за даними табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Вибір кількості, потужності і місця розташування БК головної насосної станції

№ ТП	$N_{\text{ТР}}$	$P_{\text{Р}}$, кВт	$Q_{\text{Р}}$, кВар	$Q_{\text{П}}$, кВар	$Q_{\text{КП}}$, кВар	$N_{\text{БК}}$	Тип БК	$\Sigma Q_{\text{БК}}$, кВар	K_3	$S_{\text{Р}}$, кВА
Варіант 1 $N = 4$										
ТП 1	2	774,11	524,31	422,7	101,6	2	УКМ58-0,4-67	134	0,69	866,94
ТП 2	2	797,18	615,69	377,4	238,3	2	УКМ58-0,4-133	266	0,69	870,51
Варіант 2 $N = 5$										
ТП 1	2	774,11	524,31	422,7	101,6	2	УКМ58-0,4-67	134	0,69	866,94
ТП 2,3	3	797,18	615,69	1055,9	0,0	-	-	0	0,53	1007,26
Варіант 3 $N = 6$										
ТП 1,2	3	774,11	524,31	1072,9	0,0	-	-	0	0,49	934,96
ТП 2,3	3	797,18	615,69	1055,9	0,0	-	-	0	0,53	1007,26

Обчислимо фактичне значення пропускної потужності трансформаторів Q_{Π} :

$$Q_{\Pi} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{кн}} = 1139,99 - 400 = 739,99 \text{ квар.}$$

Потужність КП, що встановлюються в мережі 10 кВ головної насосної станції визначаємо з умови балансу на шинах 10 кВ ЦРП:

$$Q_{\text{кв}} = Q_{\text{р}} - Q_{\text{кн}} - Q_{\text{е}} = 1256,29 - 400 - 661,92 = 194,37 \text{ квар.}$$

Відповідно, потужність високовольтних батарей конденсаторів виходячи з того ж самого балансу:

$$Q_{\text{вбк}} = Q_{\text{кв}} - Q_{\text{сдmax}} = 194,37 - 2141,9 = -1947,53 \text{ квар.}$$

Так як $Q_{\text{кв}} < 0$ встановлювати високовольтні батареї конденсаторів не потрібно. Тобто, синхронні двигуни насосів можуть повністю забезпечити реактивною потужністю високу сторону.

Уточнюємо значення потужності, яка видається СД:

$$Q_{\text{сд}} = Q_{\text{кв}} - Q_{\text{вбк}} = 194,37 - 0 = 194,37 \text{ квар.}$$

Визначимо втрати активної потужності в низьковольтних та високовольтних батареях конденсаторів при генерації реактивної:

$$\Delta P_{\text{кн}} = \Delta P_{\text{пит}}^{\text{кн}} \cdot Q_{\text{кн}} = 0,0045 \cdot 400 = 1,8 \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{\text{кв}} = \Delta P_{\text{пит}}^{\text{кв}} \cdot Q_{\text{кв}} = 0,0025 \cdot 0 = 0 \text{ кВт,}$$

де $\Delta P_{\text{пит}}^{\text{кн}}$, $\Delta P_{\text{пит}}^{\text{кв}}$ – відповідно питомі втрати активної потужності в низьковольтних і високовольтних БК на генерацію реактивної, кВт/квар.

Втрати активної потужності при передачі реактивної через трансформатори знижувальних підстанцій:

$$\Delta P_{\text{тп}} = \frac{Q_{\text{п}}^2}{U_{\text{н}}^2} \cdot R_{\text{ек}}' = \frac{739,99^2}{10^2} \cdot 0,000479 = 2,62 \text{ кВт,}$$

$$\text{де } R_{\text{ек}}' = \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot U_{\text{н}}^2}{N \cdot S_{\text{т.н}}^2} = \frac{7,6 \cdot 10^2}{4 \cdot 630^2} = 0,000479 \text{ ком.}$$

Визначимо вартість низьковольтних конденсаторних батарей головної насосної станції для варіанту з мінімальною кількістю трансформаторів ТП:

$$K_{\text{кн}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{кні}} \cdot K_{\text{ккв0,4і}} = 2 \cdot 35112,5 + 2 \cdot 26290 = 122805 \text{ грн.}$$

де 35112,5 грн. – вартість комплектної конденсаторної установки на 133 квар;

26290 грн. – вартість комплектної конденсаторної установки на 67 квар.

Визначимо вартість КТП головної насосної станції для варіанту з мінімальною кількістю трансформаторів ТП:

$$K_{\text{КТП}} = N_{\text{КТП-1}} \cdot K_{\text{КТП-1}} + N_{\text{КТП-2}} \cdot K_{\text{КТП-2}} = 2 \cdot 1839000 = 3678000 \text{ грн.},$$

де $N_{\text{КТП-1}}$; $N_{\text{КТП-2}}$ – кількість одно та двох трансформаторних КТП;

$K_{\text{КТП-1}}$; $K_{\text{КТП-2}}$ – вартість одно та двох трансформаторних КТП.

Приведені розрахункові витрати на компенсацію реактивної потужності головної насосної станції для варіанту з мінімальною кількістю трансформаторів:

$$\begin{aligned} Z &= E_H \cdot (K_{\text{КН}} + K_{\text{КВ}} + K_{\text{КТП}}) + (\Delta P_{\text{КН}} + \Delta P_{\text{КВ}} + \Delta P_{\text{КТП}}) \cdot C_0 \cdot \tau = \\ &= 0,12 \cdot (122805 + 0 + 3678000) + (1,8 + 0 + 2,62) \cdot 6,9 \cdot 5794 = 528687 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Розрахунки варіантів з більшою кількістю трансформаторів ТП $N = N_0 + 1$ та $N = N_0 + 2$ є подібними і нижче наводимо розрахунок без пояснень.

Варіант II $N = N_0 + 1 = 5$

$$Q_{\text{II}} = \sqrt{(N \cdot K_3 \cdot S_{\text{H.T.}})^2 - P_{\text{H}}^2} = \sqrt{(5 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 1470,92^2} = 1642,7 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{КН}} = Q_{\text{H}} - Q_{\text{II}} = 1139,99 - 1642,7 = -502,71 \text{ квар.}$$

Приймаємо $Q_{\text{КН}} = 134$ квар, згідно з табл. 6.1.

$$Q_{\text{II}} = Q_{\text{H}} - Q_{\text{КН}} = 1139,99 - 134 = 1005,99 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{КВ}} = Q_{\text{р}} - Q_{\text{КН}} - Q_{\text{е}} = 1256,29 - 134 - 661,92 = 460,37 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{ВБК}} = Q_{\text{КВ}} - Q_{\text{СДmax}} = 460,37 - 2141,9 = -1681,53 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{СД}} = Q_{\text{КВ}} - Q_{\text{ВБК}} = 460,37 - 0 = 460,37 \text{ квар},$$

$$\Delta P_{\text{КН}} = \Delta P_{\text{ПИТ}}^{\text{КН}} \cdot Q_{\text{КН}} = 0,0045 \cdot 134 = 0,603 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{\text{ТП}} = \frac{Q_{\text{II}}^2}{U_{\text{H}}^2} \cdot R_{\text{ЕК}} = \frac{1005,99^2}{10^2} \cdot 0,000383 = 3,876 \text{ кВт},$$

$$\text{де } R_{\text{ЕК}} = \frac{\Delta P_{\text{К}} \cdot U_{\text{H}}^2}{N \cdot S_{\text{T.H}}^2} = \frac{7,6 \cdot 10^2}{5 \cdot 630^2} = 0,000383 \text{ кОм},$$

$$K_{\text{КН}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{КН}i} \cdot K_{\text{ККУ0,4i}} = 2 \cdot 35112,5 = 70225 \text{ грн.},$$

$$K_{\text{КТП}} = N_{\text{КТП-1}} \cdot K_{\text{КТП-1}} + N_{\text{КТП-2}} \cdot K_{\text{КТП-2}} = 1 \cdot 930000 + 2 \cdot 1839000 = 4608000 \text{ грн.},$$

7. Вибір кількості, потужності трансформаторів підстанцій головної насосної станції

Надійне та безперервне електропостачання головної насосної станції є одним із ключових чинників стабільної роботи всього комплексу водопостачання або водовідведення. Враховуючи, що електрообладнання насосних агрегатів має значну встановлену потужність та працює в умовах високої експлуатаційної відповідальності, особливе значення має правильний вибір кількості та номінальної потужності трансформаторів підстанцій, які забезпечують живлення споживачів головної насосної станції.

Трансформаторна підстанція виконує функцію пониження напруги від лінії живлення до рівня, необхідного для живлення електроприймачів, а також забезпечує живлення оперативного струму та систем керування. Невірною обраною кількості або потужності трансформаторів може призвести до перевантаження обладнання, підвищених втрат електроенергії, зниження надійності електропостачання та економічної неефективності всього енергокомплексу.

Рациональний вибір трансформаторів дозволяє забезпечити необхідну якість електропостачання, зменшити витрати на експлуатацію та підвищити загальну надійність і ефективність роботи головної насосної станції. Вибір ТП головної насосної станції представлений у табл. 7.1.

Таблиця 7.1. Вибір кількості, потужності трансформаторів головної насосної станції та їх місця розташування

n/n	Тип ТП	S_p	K_3	K^{ab}_3	Тип трансформатору	Місце встановлення	Вид розміщення
1	КТП-2х630	866,94	0,69	1,38	ТМ-630	Насосна	Вбудована
2	КТП-2х630	870,51	0,69	1,38	ТМ-630	Котельня	Вбудована

8. Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання і мереж головної насосної станції

Одним із найважливіших етапів проектування системи електропостачання головної насосної станції є визначення струмів коротких замкнень. Ці струми виникають у результаті аварійних режимів роботи мережі та мають значний вплив на вибір, конструктивне виконання і параметри високовольтного електротехнічного обладнання. Неправильно визначені розрахункові струми можуть призвести до використання неадекватного обладнання, що, у свою чергу, становить потенційну загрозу для безпеки персоналу, надійності енергопостачання та загальної роботи насосної станції.

Головна насосна станція є відповідальним об'єктом, від якого залежить безперервне водопостачання або водовідведення, тому її електропостачання має забезпечуватись високим рівнем надійності. З цієї причини підбір високовольтного обладнання – таких як вимикачі, кабельні лінії тощо – має базуватись на детальному аналізі аварійних режимів і точному розрахунку струмів короткого замикання у критичних точках системи.

Раціональний вибір обладнання, оснований на результатах розрахунків струмів коротких замкнень, дозволяє підвищити безпеку, ефективність та довговічність експлуатації системи електропостачання головної насосної станції.

Розрахунок струмів короткого замкнення проводимо за методикою наведеною в [1, 3, 4].

Для розрахунку струмів к. з. головної насосної станції складаємо розрахункову схему, яка зображена на рис. 8.1 та розрахункову схему заміщення яка зображена на рис. 8.2.

Розрахуємо опори елементів схеми заміщення системи електропостачання головної насосної станції показаної на рис. 8.2:

– трансформатор ТМ 630

$$R = \frac{P_{кз} U_H^2}{S_H^2} = \frac{7,6 \cdot 10^2}{630^2} = 1,915 \text{ Ом,}$$

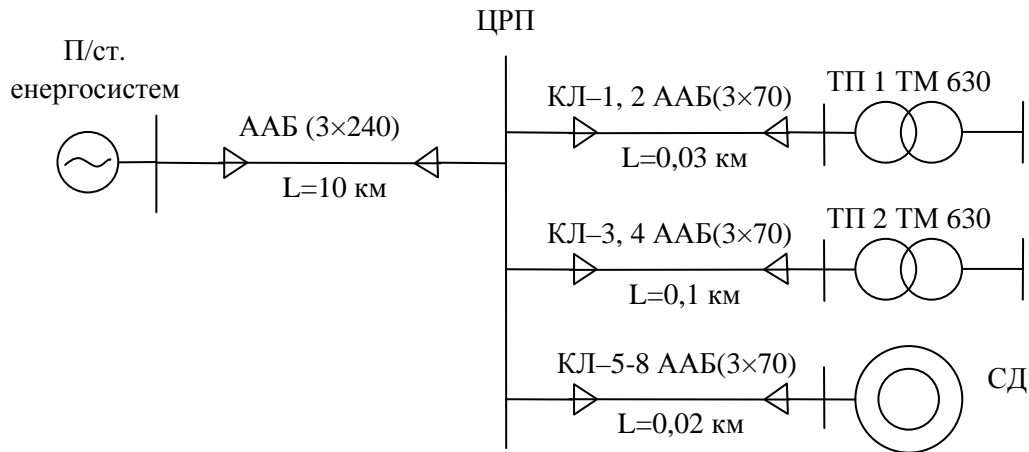


Рис. 8.1. Розрахункова схема ЦРП для розрахунку струмів к. з. головної насосної станції

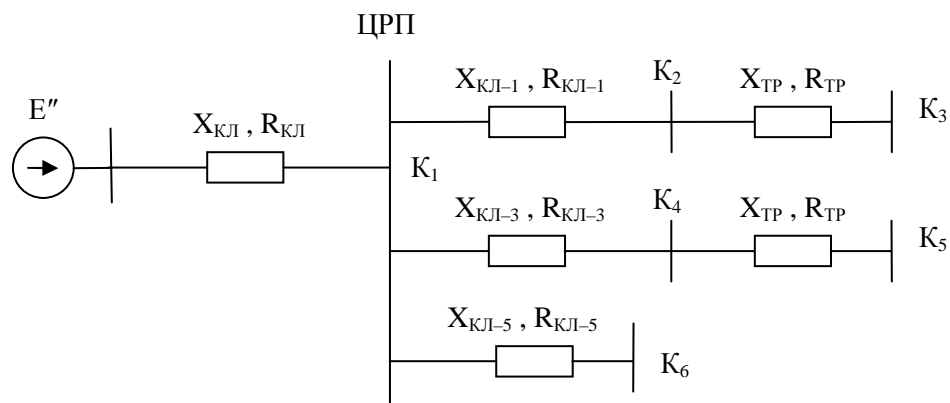


Рис. 8.2. Схема заміщення ЦРП для розрахунку струмів к. з. головної насосної станції

$$Z = \frac{U_{\kappa} \% U_n^2}{S_n} = \frac{5,5 \cdot 10^2}{630} = 8,73 \text{ Ом},$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{8,73^2 - 1,915^2} = 8,517 \text{ Ом}.$$

– КЛ від п/ст енергосистеми до ЦРП

$$X = \frac{x_0 l}{n} = \frac{0,075 \cdot 10}{1} = 0,75 \text{ Ом},$$

$$R = \frac{r_0 l}{n} = \frac{0,129 \cdot 10}{1} = 1,29 \text{ Ом},$$

– КЛ від ЦРП до ТП-1

$$X = x_0 l = 0,086 \cdot 0,03 = 0,003 \text{ Ом},$$

$$R = r_0 l = 0,443 \cdot 0,03 = 0,013 \text{ Ом}.$$

Розрахунок опорів інших кабельних ліній головної насосної станції подібний, а результати розрахунку зведені в табл. 8.1.

Таблиця 8.1. Розрахунок опорів кабельних ліній головної насосної станції.

№ КЛ	L, км	R, Ом	X, Ом
ТП-1	0,03	0,013	0,003
ТП-2	0,1	0,044	0,009
СД-10 кВ	0,02	0,009	0,002

Визначимо струм підживлення від синхронного двигуна. В якості СД використаний двигун СДН314-49-6У3 з параметрами:

$$P_H = 800 \text{ кВт}; U_H = 10 \text{ кВ}; n_c = 1000 \text{ об/хв.}; \eta = 94 \%, \cos\phi_H = 0,9; \frac{I_n}{I_{ном}} = 7,5$$

$$I_{CD}'' = n K_{II} I_H = 2 \cdot 7,5 \cdot 0,0546 = 0,819 \text{ кА}$$

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos\phi \eta} = \frac{800}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,9 \cdot 0,94} = 54,6 \text{ А}$$

$$i_{yCD} = \sqrt{2} I_{CD}'' K_y = \sqrt{2} \cdot 0,819 \cdot 1,82 = 2,108 \text{ кА}$$

де K_y – ударний коефіцієнт, $K_y = 1,82$ для двигунів серії СДНЗ.

Розрахуємо струм к.з. в т. К1.

Струм к.з. від енергосистеми нескінченної потужності:

$$I'' = \frac{U}{\sqrt{3} z_{рез}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,492} = 4,06 \text{ кА},$$

$$R_{екв} = R_{КЛ} = 1,29 \text{ Ом},$$

$$X_{екв} = X_{КЛ} = 0,75 \text{ Ом},$$

$$Z_{екв} = \sqrt{X_{екв}^2 + R_{екв}^2} = \sqrt{0,75^2 + 1,29^2} = 1,492 \text{ Ом}.$$

Ударний струм к. з. від енергосистеми нескінченної потужності:

$$i_y = \sqrt{2} I'' (1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}) = \sqrt{2} \cdot 4,06 (1 + e^{\frac{-0,01}{0,00185}}) = 5,77 \text{ кА},$$

$$T_a = \frac{X_{\text{екв}}}{\omega \cdot R_{\text{екв}}} = \frac{0,75}{314 \cdot 1,29} = 0,00185 \text{ 1/с.}$$

Струм к. з. в т. К1 з урахуванням синхронних двигунів:

$$I''_{\text{К1}} = I''_{\text{СД}} + I'' = 0,819 + 4,06 = 4,879 \text{ кА} \quad i_{\text{уК1}} = i_{\text{у}} + i_{\text{уСД}} = 5,77 + 2,108 = 7,878 \text{ кА}$$

Розрахунки струмів короткого замкнення для інших точок системи електропостачання головної насосної станції подібні, а результати розрахунку зведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2. Розрахунок струмів короткого замкнення.

№ т. к. з.	$X_{\text{екв}}$, Ом	$R_{\text{екв}}$, Ом	I_{Σ}'' , кА	T_a , 1/с	$i_{\text{у}\Sigma}$, кА
1	0,75	1,29	4,879	0,00185	7,878
2	0,753	1,303	4,847	0,00184	8,993
3	9,273	3,213	15,443	0,00919	29,197
4	0,759	1,334	4,769	0,00181	8,879
5	9,279	3,244	15,418	0,00911	29,079
6	0,752	1,299	4,858	0,0018	9,008

Вибір електричного обладнання головної насосної станції

Вибір кабелів напругою 10 кВ для високовольтної мережі насосної.

Методика вибору КЛ 10 кВ та їх перевірки, яка застосована в даному розділі кваліфікаційної роботи детально викладена в [1, 3, 4].

В якості прикладу, виберемо кабель для лінії КЛ-1, що йде від ЦРП до ТП №1.

Площа поперечного перерізу кабелю КЛ-1:

$$F_e = \frac{I_p}{J_{\text{ек}}} = \frac{25}{1,2} = 20,83 \text{ мм}^2,$$

$$\text{де } I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_n} = \frac{866,94}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 25 \text{ А.}$$

$$\text{При } T_{\text{max}} = 7075 \text{ год} - J_{\text{ек}} = 1,2 \text{ А/мм}^2$$

Обираємо кабель типу ААБ (3×70) мм² з допустимим довготривалим струмом $I_{\text{доп}} = 165 \text{ А}$.

Перевірка кабелю за допустимим тривалим струмовим навантаженням:

Таблиця 8.4. Вибір вимикачів 10 кВ на вводах головної насосної станції.

Параметри мережі	Розрахункові формули	Параметри вимикача
10 кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	10 кВ
245,3 А	$I_{роб\ форс} \leq I_{ном}$	1000 А
4,06 кА	$I_K \leq I_{дин}$	52 кА
5,77 кА	$i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин}$	132 кА
4,06 кА	$I_{пт} \leq I_{ном\ відкл}$	20 кА
$\sqrt{2} \cdot 4,06 + 0,026 = 5,768\text{кА}$	$\sqrt{2}I_{номт} + i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{нвідкл} (1 + \beta_n)$	$\sqrt{2} \cdot 20 \cdot (1 + 0,5) = 42,426\text{кА}$
$B_K \leq I_K^2(t_{выд} + t_{рз}) =$ $= 4,06^2(1,5 + 0,045) =$ $= 25,5\text{кА}^2\text{с}$	$B_K \leq I_{тер}^2 t_{тер}$	$I_{тер}^2 t_{тер} = 20^2 \cdot 3 = 1200\text{кА}^2\text{с}$

$$i_{ат} = \sqrt{2}I''e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 4,06e^{-\frac{0,01}{0,00185}} = 0,026 \text{ кА}$$

На лініях, що відходять до ТП та СД від ЦРП головної насосної станції, встановлені такі ж самі вимикачі. Розрахунки по вибору та перевірці вимикачів приведені в табл. 8.5 і 8.6.

Таблиця 8.5. Вибір вимикачів на лініях до ТП головної насосної станції.

Параметри мережі	Розрахункові формули	Параметри вимикача
10 кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	10 кВ
50,3 А	$I_{роб\ форс} \leq I_{ном}$	1000 А
4,06 кА	$I_K \leq I_{дин}$	52 кА
5,77 кА	$i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин}$	132 кА
4,06 кА	$I_{пт} \leq I_{ном\ відкл}$	20 кА
$\sqrt{2} \cdot 4,06 + 0,026 = 5,768\text{кА}$	$\sqrt{2}I_{номт} + i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{нвідкл} (1 + \beta_n)$	$\sqrt{2} \cdot 20 \cdot (1 + 0,5) = 42,426\text{кА}$
$B_K \leq I_K^2(t_{выд} + t_{рз}) =$ $= 4,06^2(0,5 + 0,045) =$ $= 8,98\text{кА}^2\text{с}$	$B_K \leq I_{тер}^2 t_{тер}$	$I_{тер}^2 t_{тер} = 20^2 \cdot 3 = 1200\text{кА}^2\text{с}$

9. Спеціальний розділ. Розробка системи електрозбереження головної насосної станції.

Загальні фактори економії електроенергії

Фактори, що впливають на економію електричної енергії на підприємствах, можна умовно поділити на чотири основні групи: *технічні, технологічні, економічні та організаційні*. Кожна з цих категорій відіграє важливу роль у формуванні ефективної політики енергозбереження.

Технічні фактори економії електроенергії

До технічних засобів зниження енергоспоживання належать заходи, спрямовані на підвищення ефективності функціонування системи електропостачання та енергетичного обладнання. Основні серед них:

1. Скорочення втрат у лініях електропередачі, розподільчих мережах і пристроях:

- використання трансформаторів з обмотками з поліпшеної електротехнічної сталі та зниженою питомою втратою;
- застосування трансформаторів з можливістю регулювання напруги під навантаженням для зменшення втрат і покращення якості електроенергії;
- встановлення компенсаційних пристроїв (конденсаторних батарей), що знижують рівень реактивної потужності в мережі;
- модернізація кабельних та повітряних ліній шляхом застосування сучасних матеріалів і конструкцій.

2. Зменшення втрат під час безпосереднього використання електроенергії:

- узгодження встановленої та фактичної споживаної потужності обладнання;
- зменшення втрат у струмопровідних елементах установок;
- впровадження пристроїв, які обмежують споживання енергії у режимі холостого ходу;
- оптимізація структури і конфігурації цехових електричних мереж;
- раціоналізація режимів роботи силового, освітлювального та технологічного обладнання для уникнення пікових навантажень та надмірного

енергоспоживання.

Технологічні фактори енергозбереження

Ця група факторів пов'язана зі зміною або вдосконаленням виробничих процесів:

1. Модернізація структури виробничого обладнання:

– впровадження сучасного енергоефективного технологічного та електротехнічного обладнання;

– списання застарілої техніки та обладнання, яке втратило технічну та енергетичну ефективність;

– перехід на автоматизовані системи керування технологічними процесами.

2. Інші технологічні заходи:

– скорочення непланових простоїв та зниження втрат продуктивного часу;

– мінімізація механічних втрат та впровадження енергозберігаючих методів обробки матеріалів;

– перехід від енергоємних способів обробки (наприклад, механообробки) до більш ефективних, як-от штампування чи прокатка замість фрезерування.

Комплексне впровадження технічних та технологічних заходів енергозбереження у поєднанні з належним економічним і організаційним супроводом дає змогу суттєво знизити рівень споживання електроенергії на промислових підприємствах. Це, у свою чергу, призводить до зменшення витрат на виробництво, підвищення енергоефективності, покращення фінансових результатів підприємства, зменшення навантаження на енергосистему країни та покращення екологічної ситуації.

Економічні фактори енергозбереження

До економічних чинників, що сприяють раціональному використанню електроенергії, можна віднести:

1. Удосконалення механізмів економічного стимулювання ефективного використання енергоресурсів, у тому числі через податкові пільги, субсидії чи штрафи за надмірне споживання.

2. Запровадження плати за використання виробничих фондів, включаючи

Економія електроенергії в електродвигунах.

Електродвигуни є одним із головних споживачів електричної енергії на промислових підприємствах – на них припадає до 60–70% загального енергоспоживання. Тому підвищення енергоефективності електродвигунів є важливим напрямом зниження витрат електроенергії в промисловості.

Основні напрямки економії електроенергії в електродвигунах включають:

1. Використання енергоефективних двигунів

Заміна застарілих асинхронних двигунів новими, з класом енергоефективності IE3 або IE4 (відповідно до міжнародного стандарту IEC 60034-30), дозволяє знизити втрати електроенергії до 15–30%. Хоча такі двигуни мають вищу вартість, економія на споживанні електроенергії впродовж терміну служби значно перевищує початкові витрати.

2. Правильний вибір потужності двигуна

Поширеною проблемою є використання двигунів завищеної потужності, що працюють з низьким завантаженням, що призводить до зниження ККД. Оптимальний режим навантаження асинхронного двигуна становить 70–90% від номінального. Тому слід правильно підбирати потужність двигунів відповідно до характеру технологічного процесу.

3. Використання частотних перетворювачів

Частотне регулювання дозволяє гнучко змінювати швидкість обертання двигуна залежно від навантаження. Це особливо ефективно для вентиляторів, насосів і компресорів, де зменшення швидкості навіть на 20% може призвести до скорочення споживання енергії на 50%. Частотні перетворювачі також зменшують пускові струми, підвищуючи довговічність обладнання.

4. Своєчасне технічне обслуговування

Виконання регулярної діагностики та обслуговування двигунів (перевірка підшипників, ізоляції, вентиляції, балансування ротора) забезпечує роботу з оптимальними характеристиками та мінімізує енергетичні втрати через механічні несправності або перегрів.

5. Відключення двигунів у холостому режимі

Підтримка електродвигунів у холостому режимі без потреби веде до невиправданого енергоспоживання. Автоматизація технологічних процесів з впровадженням таймерів, датчиків навантаження або ПЛК дозволяє своєчасно вимикати неактивні установки.

Заходи по економії електроенергії в насосних установках

Насосні установки є важливими споживачами електроенергії на підприємствах водопостачання, промислових та енергетичних об'єктах. Значна частина витрат електроенергії на таких об'єктах припадає саме на електродвигуни насосів. Тому підвищення енергоефективності насосного обладнання є ключовим напрямом енергозбереження.

Основні заходи для зменшення енергоспоживання насосними установками включають:

1. Оптимізація режимів роботи насосів

Найбільш ефективним є режим, коли насос працює поблизу точки найбільшого ККД. Необхідно уникати роботи насосів при зниженому навантаженні або в режимі кавітації, які призводять до перевитрати електроенергії.

Ефективність роботи насоса визначається коефіцієнтом корисної дії (ККД):

$$\eta = (P_{\text{вих}}/P_{\text{вх}})100\%$$

де η – ККД насоса; $P_{\text{вих}}$ – корисна потужність; $P_{\text{вх}}$ – споживана потужність.

2. Встановлення частотних перетворювачів (ЧП)

Використання ЧП дає змогу точно регулювати оберти електродвигуна насоса відповідно до змін споживання. Це особливо ефективно для систем з непостійним водоспоживанням. Енергозбереження при цьому може становити до 30–50%.

Потужність, що споживається насосом, залежить від частоти обертання згідно з кубічним законом:

Економія електроенергії в насосних установках застосуванням регульованого електроприводу

На рис. 9.1 графічно проілюстровані можливості зниження потужності, що споживається двигуном насосу, при зміні швидкості обертання валу електроприводу в порівнянні з методом регулюванням дросельною заслінкою [8, 9].

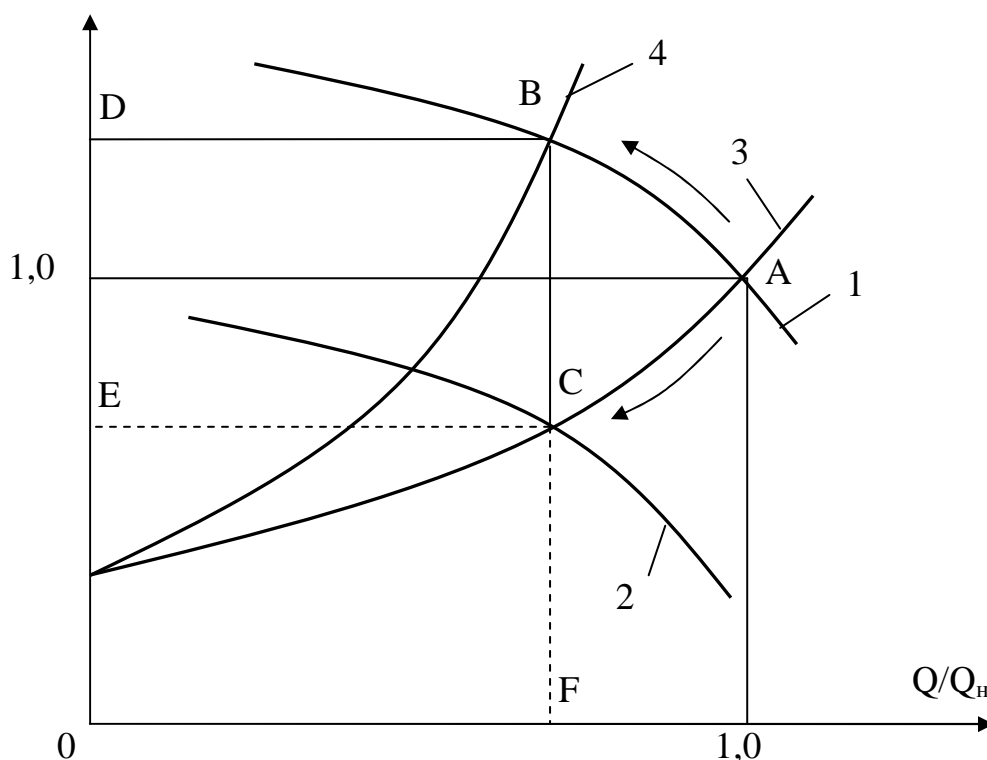


Рис. 9.1. Порівняння різних способів регулювання продуктивності насосів:

- 1 – характеристика насоса на номінальній швидкості обертання валу двигуна,
- 2 – характеристика насоса при зниженій швидкості обертання валу двигуна (менше номінальної),
- 3 – характеристика магістрального трубопроводу або системи,
- 4 – змінена характеристика магістралі або системи при регулюванні дроселем (засувкою).

При роботі насоса на номінальній витраті та напорі, його робоча точка знаходиться в т. А, яка відповідає перетину робочої характеристики насоса (крива 1) при номінальній частоті обертання двигуна та характеристикі магістралі (крива 3). У випадку зменшення витрати за відсутності регулювання швидкості обертання валу двигуна, зміну режиму забезпечують за допомогою дросельного регулювання. Це призводить до зміни гідравлічного опору системи, яка описується новою характеристикою магістралі (крива 4), і робоча точка

переміщується в положення *B*. У цьому випадку напір насоса зростає понад номінальне значення, а споживана потужність визначається площею прямокутника *ODBF*, що свідчить про зниження енергоефективності.

У разі застосування регульованого електропривода, зменшення витрати досягається шляхом зниження частоти обертання двигуна. Це змінює характеристику насоса на нову (крива 2), при цьому характеристика магістралі залишається незмінною (крива 3). Насос працює в т. С – знижуються як витрата, так і напір, відповідно зменшується споживана потужність, яка візуалізується площею *OECF*. Такий підхід демонструє перевагу впровадження регульованих електроприводів, оскільки дозволяє значно знизити енергоспоживання та втрати потужності в насосних установках, підвищуючи загальну енергоефективність системи.

Напірну характеристику відцентрового насоса $H = f(Q)$, який працює при змінній частоті обертання, можна описати виразом [9]:

$$H = H_{\phi} (n^*)^2 - S_{\phi} Q^2, \quad (9.1)$$

де H_{ϕ} і S_{ϕ} – відповідні фіктивні параметри насоса, n^* – відносна швидкість обертання насоса, що визначається виразом:

$$n^* = n_i / n_{\text{НОМ}}$$

де n_i і $n_{\text{НОМ}}$ – відповідно фактична або реальна і номінальна швидкість обертання колеса насоса.

З виразу (9.1) випливає, що гідравлічні втрати при незмінній подачі насоса не залежать від частоти його обертання. Це означає, що при зміні швидкості обертання насоса його напірні характеристики залишаються геометрично подібними – вони не змінюють своєї форми, а лише вертикально зміщуються на графіку в координатах витрати (Q) і напору (H). Відповідно, зміна частоти

При обчисленні втрат у разі регулювання засувкою втрати також розраховуються за (9.8), але при цьому враховується лише ККД електродвигуна ($\eta_{\text{ПР}}=1$).

Енергія, яка спожита з мережі W_M складається з корисної роботи $W_{\text{сп}}$ та втрат W_B :

$$W_M = W_{\text{сп}} + W_B. \quad (9.9)$$

Застосування частотно-регульованого електроприводу дасть економію електроенергії W_E

$$W_E = W_{M1} - W_{M2},$$

де W_{M1} – енергія, яка спожита при регулюванні засувкою, W_{M2} – енергія, яка спожита при регулюванні частотою обертання.

Режим функціонування групи насосів має свої особливості порівняно з роботою одного насоса. У формулу, що використовуються для розрахунку загальної економії енергії, вводиться коригувальний коефіцієнт ϕ . Це пов'язано з тим, що надлишковий тиск, створений груповою роботою насосів, є нижчим за тиск, який розвиває окремий насос при аналогічній загальній подачі. Як наслідок, рівень енергозбереження в цьому випадку є меншим.

$$W_P = W_E \phi.$$

Коефіцієнта ϕ залежить від кількості одночасно працюючих насосів (табл. 9.1).

Таблиця 9.1. Значення коригувального коефіцієнту ϕ в залежності від кількості одночасно працюючих насосів.

Кількість одночасно працюючих насосів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ	1,0	0,75	0,66	0,56	0,5	0,47	0,44	0,42	0,4	0,38

Розрахунок економії електроенергії при застосуванні регульованого електроприводу насосних установок.

Добова витрата води на одну насосну установку задана графіком рис. 9.2. та відповідною таблицею (табл. 9.2).

Характеристики насосу типу Д2000-100:

- номінальна подача $Q_{\text{ном}} = 1500 \text{ м}^3/\text{год}$ (417 л/с);
- номінальний напір $H_{\text{ном}} = 100 \text{ м}$;
- ККД насосу $\eta_{\text{М}} = 0,77$;
- фіктивні параметри: $H_{\text{ф}} = 121 \text{ м}$, $S_{\text{ф}} = -120,941 \text{ с}^2/\text{м}^2$.

Характеристики трубопроводу:

- статичний напір $H_{\text{ст}} = 35 \text{ м}$.

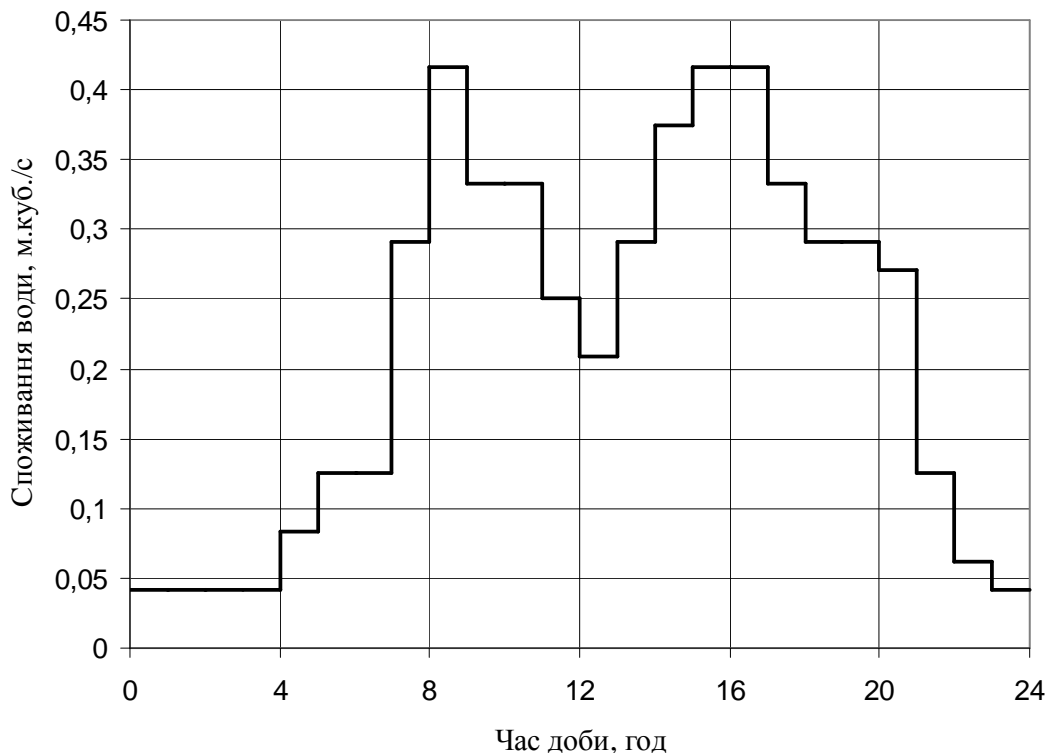


Рис. 9.2. Графік добової витрати води (на одну насосну установку).

Визначаємо гідравлічний опір трубопроводу з номінальних параметрів насосної установки:

$$S = \frac{H_{\text{ном}} - H_{\text{ст}}}{Q_{\text{ном}}^2} = \frac{100 - 35}{0,4167^2} = 374,34 \text{ м} \cdot \text{с}^2 / (\text{м} \cdot \text{куб}.)^2$$

Таблиця 9.2. Добова витрата води (на одну насосну установку).

Час доби, год	$Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	Час доби, год	$Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$
1	0,0417	13	0,2917
2	0,0417	14	0,3750
3	0,0417	15	0,4167
4	0,0833	16	0,4167
5	0,1250	17	0,3334
6	0,1250	18	0,2917
7	0,2917	19	0,2917
8	0,4167	20	0,2709
9	0,3334	21	0,1250
10	0,3334	22	0,0625
11	0,2500	23	0,0417
12	0,2084	24	0,0417

Визначимо за (9.2) відносну швидкість обертання для першої ступені графіку (рис.9.5).

$$n^* = \sqrt{Q^{*2} \left(1 - \frac{H_n}{H_\phi}\right) + \left(\frac{H_n}{H_\phi}\right)} = \sqrt{\left(\frac{0,0417}{0,4167}\right)^2 \left(1 - \frac{35}{121}\right) + \frac{35}{121}} = 0,544 \text{ в.о.}$$

Визначимо за (9.1) напір при регулюванні заслінкою

$$H = H_\phi (n^*)^2 - S_\phi Q^2 = 121 \cdot (1,0)^2 - 120,941 \cdot 0,0417^2 = 120,79 \text{ м.}$$

Визначимо за (9.5) напір при регулюванні швидкістю обертання

$$H_c = H_n + SQ^2 = 35 + 374,34 \cdot 0,0417^2 = 35,65 \text{ м.}$$

Визначимо за (9.4) ККД насоса при регулюванні заслінкою

$$\eta_{\text{нас}} = \eta_{\text{ном}} \frac{H_c}{H} = 0,77 \frac{35,65}{120,79} = 0,227.$$

Визначимо за (9.3) ККД при регулюванні швидкістю обертання

$$\eta_{\text{нас}} = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{(n^*)^{0,36}} = 1 - \frac{1 - 0,77}{(0,544)^{0,36}} = 0,714.$$

Визначимо потужність, яку споживає насос від двигуна при регулюванні заслінкою на першій сходинці графіку:

$$P_{\text{нас1}} = \frac{\rho g H_1 Q_1}{1000 \eta_{\text{нас}}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 120,79 \cdot 0,0417}{1000 \cdot 0,227} = 217,3 \text{ кВт.}$$

Визначимо потужність, яку споживає насос від двигуна при регулюванні швидкістю обертання на першій сходинці графіку:

$$P_{\text{нас1}} = \frac{\rho g H_1 Q_1}{1000 \eta_{\text{нас}}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 35,65 \cdot 0,0417}{1000 \cdot 0,714} = 20,4 \text{ кВт.}$$

Втрат потужності в двигуні при регулюванні заслінкою

$$W_{B1} = W_{\text{сп1}}((1-\eta_{\text{ПР}})+\zeta+(1-\eta_{\text{ДВ}})) = 12393,1((1-1)+0+(1-0,94)) = 743,58 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу.}$$

Енергія спожита з електромережі при регулюванні заслінкою

$$W_{M1} = W_{\text{сп1}} + W_{B1} = 12393,1 + 743,58 = 13136,6 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу.}$$

Втрат потужності в двигуні при регулюванні швидкістю обертання

$$W_{B2} = W_{\text{сп2}}((1-\eta_{\text{ПР}})+\zeta+(1-\eta_{\text{ДВ}})) = 4967,7((1-0,9)+0,05+(1-0,94)) = 1043,2 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу,}$$

прийmemo, що ККД перетворювача $\eta_{\text{ПР}} = 0,9$, а додаткові втрати від несинусоїдальності $\zeta=0,05$.

Енергія спожита з електромережі при регулюванні швидкістю обертання

$$W_{M2} = W_{\text{сп2}} + W_{B2} = 4967,7 + 1043,2 = 6010,9 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу.}$$

Економія електроенергії при застосуванні регульованого електроприводу дорівнює

$$W_E = W_{M1} - W_{M2} = 13136,6 - 6010,9 = 7125,8 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу.}$$

Результуюча економія енергії при чотирьох насосних установках

$$W_P = W_E N \varphi = 7125,8 \cdot 4 \cdot 0,56 = 15961,7 \text{ кВт}\cdot\text{год/добу,}$$

де N – кількість насосних установок.

Вартість зекономленої електроенергії за місяць

$$B = W_P C_0 D = 15961,7 \cdot 6,9 \cdot 30 = 3304072 \text{ грн./міс.}$$

де D – кількість днів за розрахунковий період.

Термін окупності при застосуванні системи регулювання швидкості обертання на насосних установках при орієнтовній вартості $K = 24000$ тис. грн. складе:

$$T_{\text{окп}} = \frac{N \cdot K}{B} = \frac{4 \cdot 24000000}{3304072} = 29 \text{ міс.} \approx 2,5 \text{ роки.}$$

