

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 ПЛІШКОВ

«__-__» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Проектування системи електропостачання
підприємства галузі гідромашинобудування»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ-23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Станіслав МУРАВА

«__-__» _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Валентин СОЛДАТЕНКО

«__-__» _____ 2026 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

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

Мурави Станіслава Михайловича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Проектування системи електропостачання підприємства галузі гідромашинобудування

Design of a power supply system for an enterprise in the hydraulic engineering industry

2. Керівник роботи Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 01.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є розроблення системи електропостачання підприємства галузі гідромашинобудування. 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
1	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>13.04-20.04</i>	
2	<i>Картограма електричних навантажень</i>	<i>21.04-25.04</i>	
3	<i>Техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання</i>	<i>26.04-01.05</i>	
4	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>	<i>02.05-08.05</i>	
5	<i>Вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства</i>	<i>09.05-11.05</i>	
6	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i>	<i>12.05-18.05</i>	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>19.05-25.05</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>26.05-28.05</i>	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>29.05-31.05</i>	

Дата видачі завдання
«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Станіслав МУРАВА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 85 с.; 18 рис.; 20 табл.; 5 джерел

Мурава С. М. Проектування системи електропостачання підприємства галузі гідромашинобудування. – Рукопис.

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

У кваліфікаційній роботі вирішувалося завдання щодо проектування системи електропостачання підприємства галузі гідромашинобудування.

Розраховані потужності навантаження дали змогу сформувати базові характеристики графіків енергоспоживання підприємства. Було детально вивчено баланс перетікань реактивної потужності, проаналізовано струми аварійних режимів схеми, за якими проведено вибір обладнання.

Обрана схема живлення відповідає інженерним та галузевим вимогам. Створена мережа гарантує безперебійну роботу технологічного обладнання, належну маневреність оперативних перемикань і безпечні умови під час виконання регламентного обслуговування.

Обґрунтовано доцільність інтеграції автономних мікрогідроакумулювальних систем із локальними сонячними електростанціями для балансування добового енергоспоживання. Задля аналізу перехідних процесів та оптимізації робочих режимів розроблено комплексну імітаційну модель такого гібридного комплексу в середовищі MATLAB/Simulink. Створений цифровий двійник дозволяє високоточно досліджувати стохастичні електротехнічні та гідродинамічні процеси, гарантуючи безаварійну експлуатацію обладнання.

Ключові слова: електричні навантаження, система електропостачання, реактивна потужність

ABSTRACT

Qualification work: 85 p.; 18 Fig.; 20 tables; 5 sources

Murava S. Development of a power supply system for a hydraulic equipment enterprise. – 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.

The qualification work solved the problem of designing a power supply system for an enterprise in the hydraulic engineering industry.

The calculated load capacities made it possible to form the basic characteristics of the enterprise's energy consumption schedules. The balance of reactive power flows was studied in detail, the currents of the emergency modes of the circuit were analyzed, and the equipment was selected based on them.

The selected power supply scheme meets engineering and industry requirements. The created network guarantees uninterrupted operation of technological equipment, proper maneuverability of operational switching and safe conditions during routine maintenance.

The feasibility of integrating autonomous micro-hydro storage systems with local solar power plants for balancing daily energy consumption has been substantiated. To analyze transient processes and optimize operating modes, a comprehensive simulation model of such a hybrid complex has been developed in the MATLAB/Simulink environment. The created digital twin allows for highly accurate investigation of stochastic electrical and hydrodynamic processes, guaranteeing trouble-free operation of the equipment.

Keywords: electrical loads, power supply system, reactive power

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	17
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	22
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	24
3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....	24
3.2 Схема внутрішнього електропостачання	27
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.....	44
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	45
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСУ, ПОБУДОВАНОГО НА БАЗІ МІКРОГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ	46
7.1 Сучасні методи збереження виробленої електроенергії.....	46
7.2 Характеристика принципової будови ізольованого гідроаккумуляційного комплексу накопичення електроенергії.....	60
7.3 Створення цифрового двійника для дослідження експлуатаційних режимів відокремленого гідроаккумуляційного енергокомплексу	63
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Мурава С.М.			Проектування системи електропостачання підприємства галузі гідромашинобудування Design of a power supply system for an enterprise in the hydraulic engineering industry	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перев.		Солдатенко В.П.					6	85	
						ЦНТУ зр. ЕЕ-23мб			
Н. контр.		Солдатенко В.П.							
Затвер.		Плешков П.Г.							

ВСТУП

Дана кваліфікаційна робота спрямована на створення цілісної мережі живлення підприємства, що випускає гідравлічні агрегати. Подібна задача залишається вкрай важливою з огляду на сьогоденний індустріальний прогрес і постійне збільшення вимог до безперебійного постачання енергії для технологічних циклів.

Задоволення попиту індустріальних об'єктів на енергоресурси має ключове значення для роботи новітніх високотехнологічних підприємств. Електрична енергія є базою для результативного функціонування різнопланового машинного парку, роботизованих конвеєрів і супутніх комунікацій. Саме тому безперервне і стабільне подання струму стає головною передумовою для отримання відмінних результатів виробітку, гарантування найвищої рентабельності та успішної ринкової конкуренції заводу.

Заводи, що виготовляють гідроапаратуру, відрізняються унікальними характеристиками споживання електрики, які виникають через багаторівневість і варіативність виробничих процедур. Створення елементів гідравліки охоплює чимало процесів із високими витратами енергії. Серед них – механічна обробка заготовок на верстатному парку, загартування за допомогою індукційних печей, тестування зібраних вузлів під значним тиском рідини, а також функціонування компресорів, які живлять пневмомережі. Характерною рисою таких цехів виступає потреба у гарантуванні надзвичайної точності виготовлення запчастин, а це неможливо без бездоганно рівного та надійного постачання струму.

Нинішні заводи у сфері гідромашбуду комплектуються великим масивом приймачів електроенергії з різноманітним призначенням і показниками навантаження. До ключових категорій споживачів входять: обробні центри з числовим програмним керуванням, що споживають від 5 до 100 кВт, потужні преси з зусиллям до 1000 тонн, установки для нагрівання струмами високої частоти до 500 кВт, компресори, що генерують стиснене повітря для цехових

						Ар.
						7

потреб, установки вентиляції для нормалізації параметрів повітряного середовища всередині будівель, плюс освітлювальні прилади й супутнє устаткування.

Електрична мережа заводу з випуску гідрокомпонентів зобов'язана гарантувати живлення моторів різного калібру – від одиниць до сотень кіловат. Одночасно вкрай важливо сфокусуватися на збереженні високих показників якості електроенергії. Будь-які відхилення номіналів напруги чи частоти здатні згубно позначитися на точності виточування деталей, провокуючи появу дефектних виробів і подальші фінансові збитки.

Специфікою використання енергоресурсів на об'єктах гідравлічної промисловості виступає значна нестабільність навантажень впродовж однієї зміни. Максимальні стрибки потужності з'являються під час паралельного включення групи енергоємних машин або у моменти здійснення гідровипробувань продукції. Така ситуація зумовлює потребу у скрупульозному вивченні добових діаграм енергоспоживання і вдосконаленні графіків функціонування обладнання заради досягнення максимальної економічної віддачі всієї системи енергозабезпечення.

Передові компанії у сфері створення гідравліки зараз активно інтегрують інноваційні методи заощадження ресурсів та автоматизовані комплекси контролю за живленням. Зокрема, використання установок для генерації реактивної потужності дозволяє суттєво підвищити значення коефіцієнта потужності на заводі та мінімізувати втрати електроенергії у живлячих магістралях.

Проектування раціональної схеми електрозабезпечення для гідромашинобудівного заводу потребує всебічного бачення. Цей процес охоплює детальне дослідження етапів виготовлення, удосконалення конфігурацій мереж, підбір оптимальних характеристик апаратури і встановлення новітніх приладів для автоматизації й моніторингу за використанням енергії.

						Ар.
						8

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ

Зразок визначення силових споживачів напругою до 1000 В для цеху виготовлення гідроциліндрів продемонстровано далі.

$$m = \frac{P_{H.max}}{P_{H.min}} = \frac{146,74}{2,02} = 72,64$$

$$P_{зм} = \Sigma P_H \cdot K_B = 2207,17 \cdot 0,2 = 441,43 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 441,43 \cdot 1,17 = 516,47 \text{ квар}$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot \Sigma P_H}{P_{H.max}} = \frac{2 \cdot 2207,17}{146,74} \approx 30$$

Відповідно до джерела [1], коефіцієнт $K_p = 1,44$.

Таким чином, обчислені параметри потужності для цеху виготовлення гідроциліндрів становлять:

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 441,43 \cdot 1,44 = 635,66 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 516,47 \text{ квар}$$

Підсумкові дані проведених обчислень систематизовано у таблиці 1.1.

						Ар.
						9

Таблиця 1.1. Силові навантаження до 1000 В

№	Назва цеху	N спож шт	P одн.сп.		P сум, кВт	m	K _в	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		n сф	K _р	Розрах. навант.		
			min, кВт	max, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
1	Цех виготовлення гідроциліндрів	83	2,02	146,7	2207,2	72,5	0,2	0,65	1,17	441,43	516,47	30	1,44	635,66	516,47	819,03
2	Дільниця виробництва гідророзподільників	48	1,52	86,02	2127,2	56,7	0,2	0,65	1,17	425,44	497,4	48	1,34	568,77	497,4	755,59
3	Цех збирання насосних станцій	47	2,53	354,2	3497,5	140	0,2	0,65	1,17	699,49	817,8	20	1,55	1087,31	817,8	1360,53
4	Дільниця виробництва рукавів високого тиску	46	3,54	554,1	2621,1	156,4	0,2	0,65	1,17	524,22	612,88	9	1,89	991,92	674,16	1199,33
5	Станція перекачування мастил	55	3,54	37,95	529,28	10,7	0,5	0,65	1,17	264,64	309,4	28	1,21	319,28	309,4	444,59
6	Дільниця виробництва фітінгів	61	3,8	48,07	920,92	12,7	0,2	0,65	1,17	184,18	215,33	38	1,38	254,96	215,33	333,73
7	Головний цех складання гідроагрегатів	87	4,25	38,96	1943	9,2	0,2	0,65	1,17	388,61	454,34	87	1,24	482,51	454,34	662,75
8	Сховище робочих рідин та хімматеріалів	39	2,28	17,71	394,68	7,8	0,2	0,65	1,17	78,94	92,28	39	1,38	108,83	92,28	142,69
9	Дільниця складання міні-гідростанцій	22	5,36	17,71	425,04	3,3	0,2	0,65	1,17	85,01	99,39	22	1,52	129,62	99,39	163,34
10	Головний адміністративний корпус	50	1,27	28,34	414,92	22,4	0,2	0,65	1,17	82,98	97,02	29	1,45	120,15	97,02	154,43
11	Дільниця виготовлення гідроаккумуляторів	90	10,1	101,2	1416,8	10	0,7	0,85	0,62	991,76	614,64	28	1,11	1100,88	614,64	1260,84
12	Пожежна станція	51	2,78	278,3	642,62	100	0,35	0,7	1,02	224,92	229,46	5	1,85	416,78	252,4	487,25
13	Ковальсько-пресовий цех	21	1,16	37,95	202,4	32,6	0,4	0,65	1,17	80,96	94,65	11	1,46	117,85	94,65	151,15
14	Цех механічної обробки гідрокомпонентів	127	2,78	146,7	1578,7	52,7	0,3	0,59	1,37	473,62	648,14	22	1,39	658,21	648,14	923,75
15	Ремонтно-механічний цех	42	1,16	27,32	384,56	23,5	0,2	0,65	1,17	76,91	89,92	28	1,46	112,06	89,92	143,67
16	Генераторне відділення	15	5,57	12,65	283,36	2,3	0,3	0,7	1,02	85,01	86,73	15	1,49	126,42	86,73	153,31
17	Транспортний відділ	14	4,55	13,66	141,68	3	0,18	0,6	1,33	25,5	34	14	1,73	44,2	34	55,77
18	Теплогенераторна станція	48	4,55	113,9	1771	25	0,4	0,65	1,17	708,4	828,21	31	1,25	884,78	828,21	1211,93
19	Комплекс харчування	35	1,01	35,42	106,26	35	0,6	0,8	0,75	63,76	47,82	6	1,4	89,13	52,6	103,5
Σ	Всього по заводу	981	1	554	21608	548	0,27	0,68	1,08	5905,8	6385,49	78	1,21	7117,2	6385,5	9561,8

1.2 Освітлювальні електричні навантаження

Зразок обчислення енергоспоживання освітлювальних установок для цеху виготовлення гідроциліндрів продемонстровано далі.

$$P_{\text{BCT}} = F \cdot P_0 \cdot 10^{-3} = 1599 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 19,19 \text{ кВТ}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot K_1 \cdot P_{\text{BCT}} = 0,95 \cdot 1,2 \cdot 19,19 = 21,88 \text{ кВТ}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 21,88 \cdot 0,484 = 10,59 \text{ кВар}$$

Підсумки решти проведених обчислень систематизовано у таблиці 1.2.

						Ap.
						10

Таблиця 1.2. Освітлювальні навантаження

№	Назва цеху	F , м ²	P_0 , Вт/м ²	$P_{вст}$, кВт	$K_{п}$	K_1	cosφ	tgφ	P_p , кВт	Q_p , квар	S_p , кВА
1	Цех виготовлення гідроциліндрів	1599	12	19,19	0,950	1,20	0,90	0,484	21,88	10,6	24,31
2	Дільниця виробництва гідророзподільників	1115	14	15,61	0,950	1,20	0,90	0,484	17,79	8,61	19,77
3	Цех збирання насосних станцій	1215	14	17,01	0,950	1,20	0,90	0,484	19,39	9,38	21,54
4	Дільниця виробництва рукавів високого тиску	767	14	10,74	0,950	1,20	0,90	0,484	12,24	5,92	13,6
5	Станція перекачування мастил	709	14	9,93	0,950	1,20	0,90	0,484	11,32	5,48	12,58
6	Дільниця виробництва фітингів	1854	14	25,96	0,950	1,20	0,90	0,484	29,59	14,3	32,88
7	Головний цех складання гідроагрегатів	1709	14	23,93	0,950	1,20	0,90	0,484	27,28	13,2	30,31
8	Сховище робочих рідин та хімматеріалів	1407	14	19,7	0,950	1,20	0,90	0,484	22,46	10,9	24,95
9	Дільниця складання міні-гідростанцій	643	14	9	0,950	1,20	0,90	0,484	10,26	4,97	11,4
10	Головний адміністративний корпус	1282	16	20,51	0,950	1,20	0,90	0,484	23,38	11,3	25,98
11	Дільниця виготовлення гідроаккумуляторів	1609	12	19,31	0,950	1,20	0,90	0,484	22,01	10,7	24,45
12	Пожежна станція	420	14	5,88	0,950	1,20	0,90	0,484	6,7	3,24	7,44
13	Ковальсько-пресовий цех	208	14	2,91	0,950	1,20	0,90	0,484	3,32	1,61	3,69
14	Цех механічної обробки гідрокомпонентів	789	14	11,05	0,950	1,20	0,90	0,484	12,6	6,1	14
15	Ремонтно-механічний цех	1136	14	15,9	0,950	1,20	0,90	0,484	18,13	8,77	20,14
16	Генераторне відділення	210	14	2,94	0,950	1,20	0,90	0,484	3,35	1,62	3,72
17	Транспортний відділ	863	14	12,08	0,950	1,20	0,90	0,484	13,77	6,66	15,3
18	Теплогенераторна станція	1265	14	17,71	0,950	1,20	0,90	0,484	20,19	9,77	22,43
19	Комплекс харчування	1144	12	13,73	0,950	1,20	0,90	0,484	15,65	7,57	17,39
20	Територія заводу	81060	0,1	8,11	1,000	1,12	0,50	1,732	9,08	15,7	18,17
Σ	Всього по заводу			281,2					320,4	166	364,1

1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ

Підсумкові дані обчислень для устаткування, що живиться від мережі високої напруги, систематизовано у вигляді таблиці 1.3.

						Ap.
						11

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	$N_{\text{спож}}$ шт	$P_{\text{одн.сп.}}$		$P_{\text{сум.}}$ кВт	m	$K_{\text{в}}$	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	Сер. зм. нав.		$n_{\text{эф}}$	$K_{\text{р}}$	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
ТП-1, ТП-2															
Цех виготовлення гідроциліндрів															
силове:	83	2,02	146,7	2207,17	72,5	0,2	0,65	1,17	441,43	516,09	30	1,44	635,4	516,09	818,58
освітлювальне:									19,19				21,87	10,59	
Всього:									460,62	516,09			657,26	526,68	842,25
Дільниця виробництва рукавів високого тиску															
силове:	46	3,54	554,1	2621,08	156,4	0,2	0,65	1,17	524,22	612,88	9	1,89	991,92	674,16	1199,33
освітлювальне:									10,74				12,25	5,93	
Всього:									534,95	612,88			1004,17	680,09	1212,8
Пожежна станція															
силове:	51	2,78	278,3	642,62	100	0,35	0,7	1,02	224,92	229,46	5	1,85	416,78	252,4	487,25
освітлювальне:									5,88				6,7	3,24	
Всього:									230,8	229,46			423,48	255,64	494,67
Всього по ТП-1, ТП-2:															
силове:	180	2,02	554,1	5470,87	273,7	0,22	0,66	1,14	1190,57	1358,43	20	1,52	1813,17	1358,43	2265,59
освітлювальне:									35,8				40,81	19,75	
БК 0,4 кВ									-487,78				-487,78		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-1, ТП-2:									1226,37	870,64			1853,98	890,4	2056,71
Втрати в трансформаторах:													22,76	119,13	
Кількість трансформаторів: 3															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,68$															
Всього на шинах 10 кВ ТП-1, ТП-2:													1876,74	1009,53	2131,04
ТП-3															
Дільниця виробництва гідророзподільників															
силове:	48	1,52	86,02	2127,22	56,7	0,2	0,65	1,17	425,44	497,4	48	1,34	568,77	497,4	755,59
освітлювальне:									15,62				17,8	8,61	
Всього:									441,06	497,4			586,58	506,01	774,68
Станція перекачування мастил															
силове:	55	3,54	37,95	529,28	10,7	0,5	0,65	1,17	264,64	309,4	28	1,21	319,28	309,4	444,59

Продовження табл. 1.3

освітлювальне:									9,93				11,31	5,48	
Всього:									274,57	309,4			330,59	314,87	456,54
Головний цех складання гідроагрегатів															
силове:	87	4,25	38,96	1943,04	9,2	0,2	0,65	1,17	388,61	454,34	87	1,24	482,51	454,34	662,75
освітлювальне:									23,93				27,28	13,21	
Всього:									412,54	454,34			509,8	467,54	691,73
Сховище робочих рідин та хім матеріалів															
силове:	39	2,28	17,71	394,68	7,8	0,2	0,65	1,17	78,94	92,28	39	1,38	108,83	92,28	142,69
освітлювальне:									19,69				22,45	10,87	
Всього:									98,63	92,28			131,28	103,15	166,96
Всього по ТП-3:															
силове:	229	1,52	86,02	4994,22	56,7	0,23	0,65	1,17	1157,63	1353,42	116	1,19	1372,69	1353,42	1927,7
освітлювальне:									69,17				78,84	38,16	
БК 0,4 кВ									-1456,27				-1456,27		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-3:									1226,8	-102,85			1451,53	-64,69	1452,97
Втрати в трансформаторах:													16,43	85,71	
Кількість трансформаторів: 2															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,72															
Всього на шинах 10 кВ ТП-3:													1467,97	21,02	1468,12
ТП-4															
Головний адміністративний корпус															
силове:	50	1,27	28,34	414,92	22,4	0,2	0,65	1,17	82,98	97,02	29	1,45	120,15	97,02	154,43
освітлювальне:									20,51				23,39	11,32	
Всього:									103,5	97,02			143,54	108,34	179,84
Ковальсько-пресовий цех															
силове:	21	1,16	37,95	202,4	32,6	0,4	0,65	1,17	80,96	94,65	11	1,46	117,85	94,65	151,15
освітлювальне:									2,91				3,32	1,61	
Всього:									83,87	94,65			121,17	96,26	154,75
Цех механічної обробки гідрокомпонентів															
силове:	127	2,78	146,7	1578,72	52,7	0,3	0,59	1,37	473,62	648,14	22	1,39	658,21	648,14	923,75
освітлювальне:									11,05				12,6	6,1	
Всього:									484,67	648,14			670,81	654,24	937,03

Продовження табл. 1.3

Ремонтно-механічний цех																
силове:	42	1,16	27,32	384,56	23,5	0,2	0,65	1,17	76,91	89,92	28	1,46	112,06	89,92	143,67	
освітлювальне:									15,91				18,13	8,77		
Всього:									92,82	89,92			130,19	98,69	163,37	
Генераторне відділення																
силове:	15	5,57	12,65	283,36	2,3	0,3	0,7	1,02	85,01	86,73	15	1,49	126,42	86,73	153,31	
освітлювальне:									2,94				3,36	1,63		
Всього:									87,95	86,73			129,78	88,36	157	
Всього по ТП-4:																
силове:	255	1,16	146,7	2863,96	126,1	0,28	0,62	1,27	799,48	1016,45	39	1,3	1037,42	1016,45	1452,38	
освітлювальне:									53,33				60,8	29,44		
БК 0,4 кВ									-227,7				-227,7			
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-4:									852,81	788,75			1098,22	818,19	1369,5	
Втрати в трансформаторах:													15,15	79,3		
Кількість трансформаторів: 2																
Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,68$																
Всього на шинах 10 кВ ТП-4:													1113,37	897,49	1430,07	
ТП-5																
Транспортний відділ																
силове:	14	4,55	13,66	141,68	3	0,18	0,6	1,33	25,5	34	14	1,73	44,2	34	55,77	
освітлювальне:									12,08				13,77	6,67		
Всього:									37,59	34			57,98	40,67	70,82	
Теплогенераторна станція																
силове:	48	4,55	113,9	1771	25	0,4	0,65	1,17	708,4	828,21	31	1,25	884,78	828,21	1211,93	
освітлювальне:									17,71				20,19	9,78		
Всього:									726,11	828,21			904,97	837,99	1233,36	
Комплекс харчування																
силове:	35	1,01	35,42	106,26	35	0,6	0,8	0,75	63,76	47,82	6	1,4	89,13	52,6	103,5	
освітлювальне:									13,72				15,65	7,57		
Всього:									77,48	47,82			104,77	60,17	120,82	
Заводська територія																
освітлювальне:									8,11				9,08	15,73		

Продовження табл. 1.3

Всього:									8,11	0			9,08	15,73	18,16
Всього по ТП-5:															
силове:	97	1,01	113,9	2018,94	112,5	0,4	0,66	1,14	797,66	910,03	35	1,24	985,28	910,03	1341,24
освітлювальне:									51,62				58,69	39,74	
БК 0,4 кВ									-67,8				-67,8		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-5:									849,28	842,23			1043,97	881,97	1366,66
Втрати в трансформаторах:													15,11	79,09	
Кількість трансформаторів: 2															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,68															
Всього на шинах 10 кВ ТП-5:													1059,08	961,06	1430,13
ТП-6, ТП-7															
Цех збирання насосних станцій															
силове:	47	2,53	354,2	3497,47	140	0,2	0,65	1,17	699,49	817,8	20	1,55	1087,31	817,8	1360,53
освітлювальне:									17,01				19,39	9,38	
Всього:									716,51	817,8			1106,7	827,18	1381,67
Дільниця виробництва фітингів															
силове:	61	3,8	48,07	920,92	12,7	0,2	0,65	1,17	184,18	215,33	38	1,38	254,96	215,33	333,73
освітлювальне:									25,96				29,59	14,32	
Всього:									210,14	215,33			284,55	229,65	365,67
Дільниця складання міні-гідростанцій															
силове:	22	5,36	17,71	425,04	3,3	0,2	0,65	1,17	85,01	99,39	22	1,52	129,62	99,39	163,34
освітлювальне:									9				10,25	4,96	
Всього:									94	99,39			139,87	104,35	174,5
Дільниця виготовлення гідроаккумуляторів															
силове:	90	10,12	101,2	1416,8	10	0,7	0,85	0,62	991,76	614,64	28	1,11	1100,88	614,64	1260,84
освітлювальне:									19,31				22,01	10,66	
Всього:									1011,07	614,64			1122,89	625,3	1285,26
Всього по ТП-6, ТП-7:															
силове:	220	2,53	354,2	6260,23	140	0,31	0,75	0,89	1960,45	1747,16	35	1,29	2526,69	1747,16	3071,93
освітлювальне:									71,28				81,24	39,32	
БК 0,4 кВ									-910,8				-910,8		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-6, ТП-7:									2031,72	836,36			2607,93	875,67	2751,02

Продовження табл. 1.3

Втрати в трансформаторах:														30,48	159,5	
Кількість трансформаторів: 4																
Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,68$																
Всього на шинах 10 кВ ТП-6, ТП-7:														2638,42	1035,17	2834,23
Всього по об'єкту																
силове:	981	1,01	554,1	21608,2	547,5	0,27	0,88	0,55	5905,78	3235,13	78	1,21	7117,2	3235,13	7817,96	
освітлювальне:									281,2				320,39	166,41		
Всього:									6186,98	3235,13			7437,58	3401,54	8178,52	
Потужність КП 0,4 кВ:									-3150,36				-3150,36			
Втрати в трансформаторах:													99,95	522,73		
Всього по об'єкту:													7537,53	3924,27	8497,89	
Всього по об'єкту 10 кВ:													7537,53	3924,27	8497,89	
КП 10 кВ:														-3086,6		
Всього 10 кВ з КП:													7537,53	837,67	7583,93	

1.4 Графіки електричних навантажень заводу

Підсумкові показники обчислення щоденних режимів використання електроенергії продемонстровано далі.

Таблиця 1.4 Вихідна інформація щодо визначення характеристик енергоспоживання

№	Роб. дні		Вих.дні	
	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %
1	72,1	92,9	30,6	48,4
2	62,2	73,1	30,6	48,4
3	41,5	62,2	30,6	48,4
4	43,5	69,2	30,6	48,4
5	42,5	56,3	30,6	48,4
6	55,3	62,2	30,6	48,4
7	45,4	60,3	30,6	48,4
8	77,1	82	30,6	48,4
9	87,9	89,9	22,7	39,5
10	96,8	85	22,7	39,5
11	81	93,9	22,7	39,5
12	81	87,9	22,7	39,5
13	85	93,9	22,7	39,5
14	86	91,9	22,7	39,5
15	98,8	98,8	22,7	39,5
16	83	83	22,7	39,5
17	59,3	75,1	22,7	39,5
18	68,2	79	22,7	39,5
19	75,1	79	30,6	48,4
20	83	89,9	30,6	48,4
21	77,1	87,9	30,6	48,4
22	71,1	81	30,6	48,4
23	86,9	91,9	30,6	48,4
24	70,1	86	30,6	48,4

Таблиця 1.5. Результати розрахунків доб. графіків

№	Зим.дні						Літн. дні					
	Роб. дні			Вих.і дні			Роб. дні			Вих.і дні		
	$P_{д}$ кВт	$Q_{д}$ квар	$S_{д}$ кВА	$P_{д}$ кВт	$Q_{д}$ квар	$S_{д}$ кВА	$P_{д}$ кВт	$Q_{д}$ квар	$S_{д}$ кВА	$P_{д}$ кВт	$Q_{д}$ квар	$S_{д}$ кВА
1	5502	787	5558	2337	411	2372	4677	669	4725	1987	349	2017
2	4748	620	4789	2337	411	2372	4036	527	4070	1987	349	2017
3	3166	527	3209	2337	411	2372	2691	448	2728	1987	349	2017
4	3316	586	3368	2337	411	2372	2819	499	2863	1987	349	2017
5	3241	478	3277	2337	411	2372	2755	406	2784	1987	349	2017
6	4221	527	4253	2337	411	2372	3588	448	3616	1987	349	2017
7	3467	511	3505	2337	411	2372	2947	434	2978	1987	349	2017
8	5880	695	5920	2337	411	2372	4997	591	5032	1987	349	2017
9	6709	762	6752	1734	335	1766	5703	648	5739	1473	284	1501
10	7387	721	7422	1734	335	1766	6278	612	6308	1473	284	1501
11	6180	795	6231	1734	335	1766	5253	676	5297	1473	284	1501
12	6180	746	6225	1734	335	1766	5253	634	5292	1473	284	1501
13	6482	795	6530	1734	335	1766	5510	676	5552	1473	284	1501
14	6558	779	6604	1734	335	1766	5574	662	5614	1473	284	1501
15	7537	838	7584	1734	335	1766	6407	712	6446	1473	284	1501
16	6331	703	6370	1734	335	1766	5382	598	5415	1473	284	1501
17	4523	637	4567	1734	335	1766	3845	541	3882	1473	284	1501
18	5201	670	5243	1734	335	1766	4420	570	4457	1473	284	1501
19	5729	670	5768	2337	411	2372	4870	570	4903	1987	349	2017
20	6331	762	6377	2337	411	2372	5382	648	5420	1987	349	2017
21	5880	746	5927	2337	411	2372	4997	634	5038	1987	349	2017
22	5427	687	5471	2337	411	2372	4613	584	4649	1987	349	2017
23	6633	779	6678	2337	411	2372	5638	662	5676	1987	349	2017
24	5351	729	5401	2337	411	2372	4549	619	4590	1987	349	2017

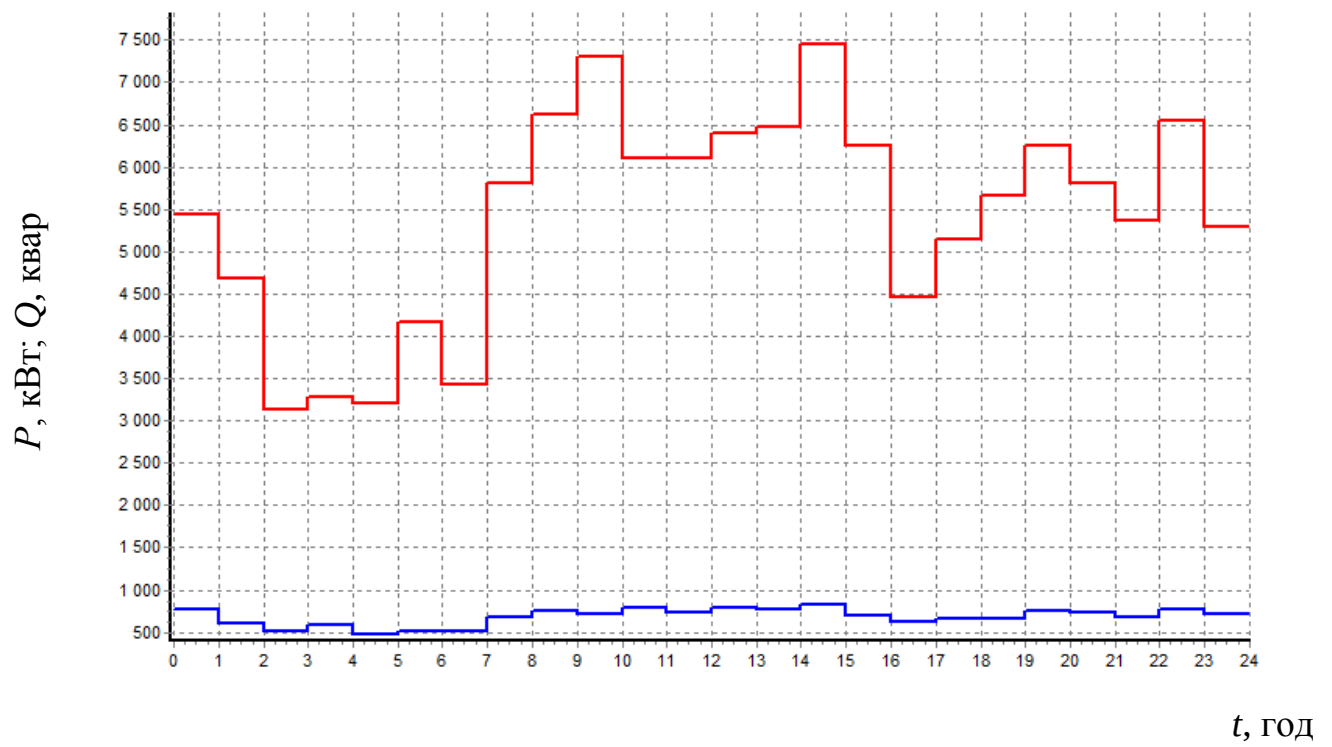


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

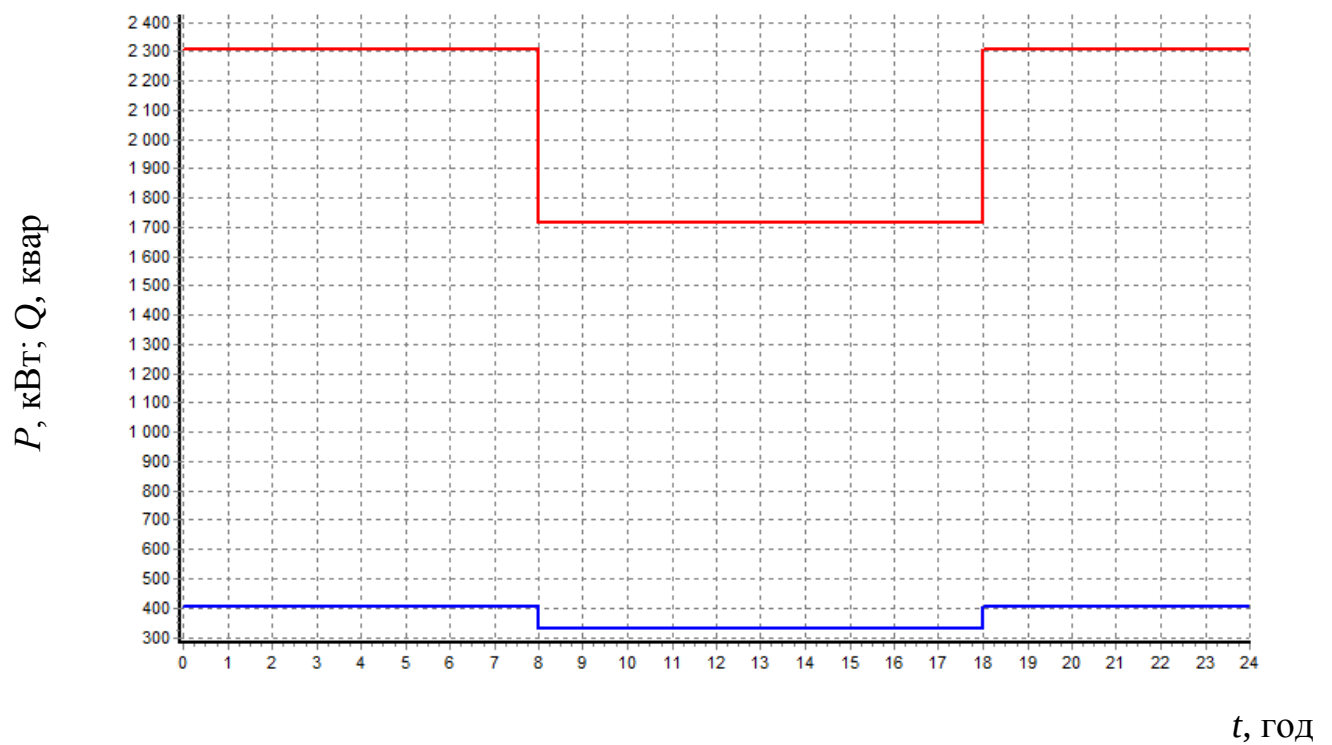


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (з.в.)

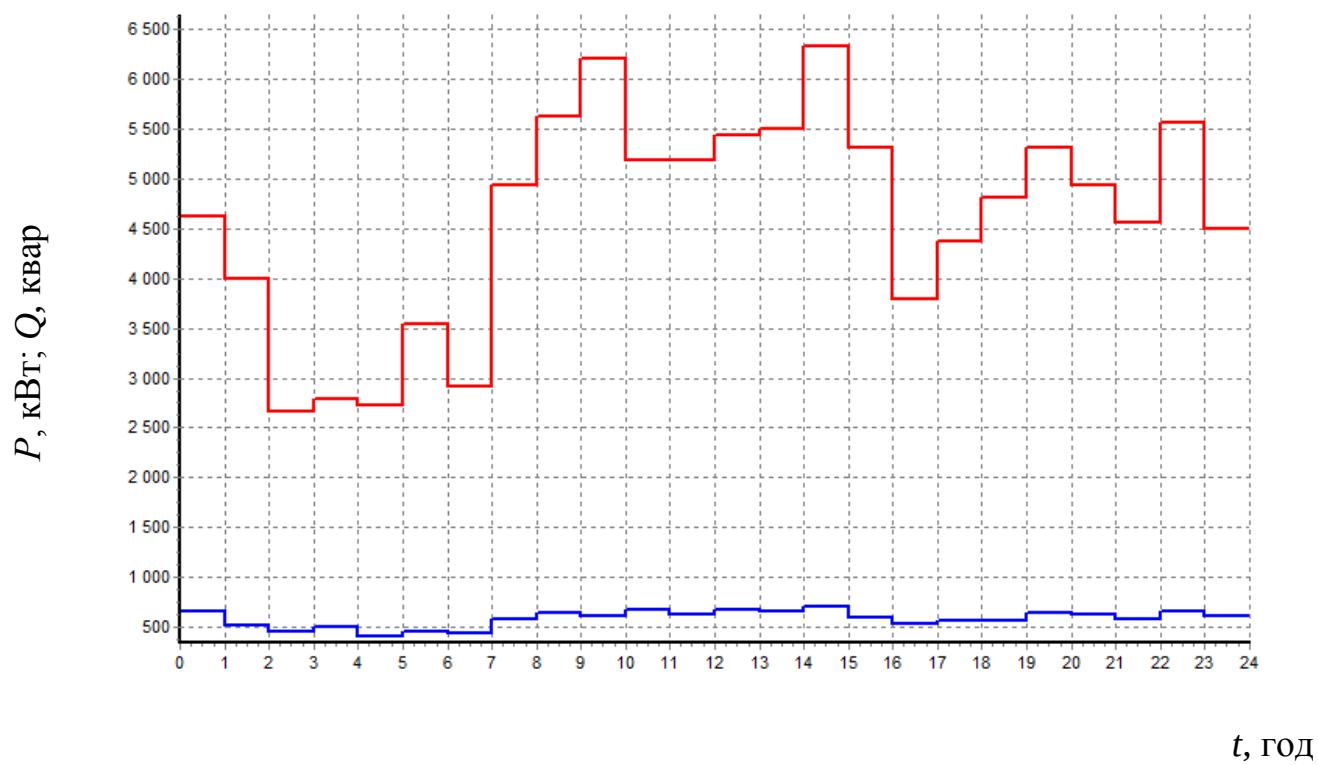


Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

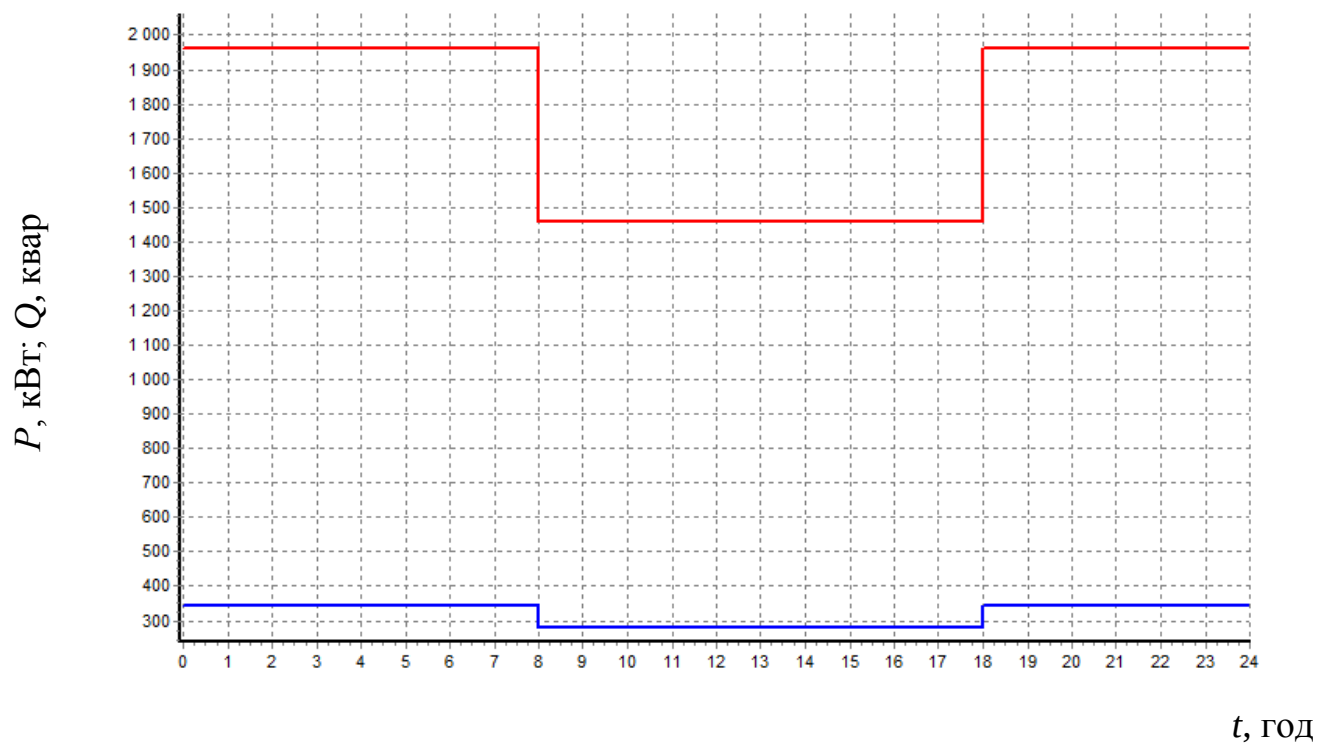


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

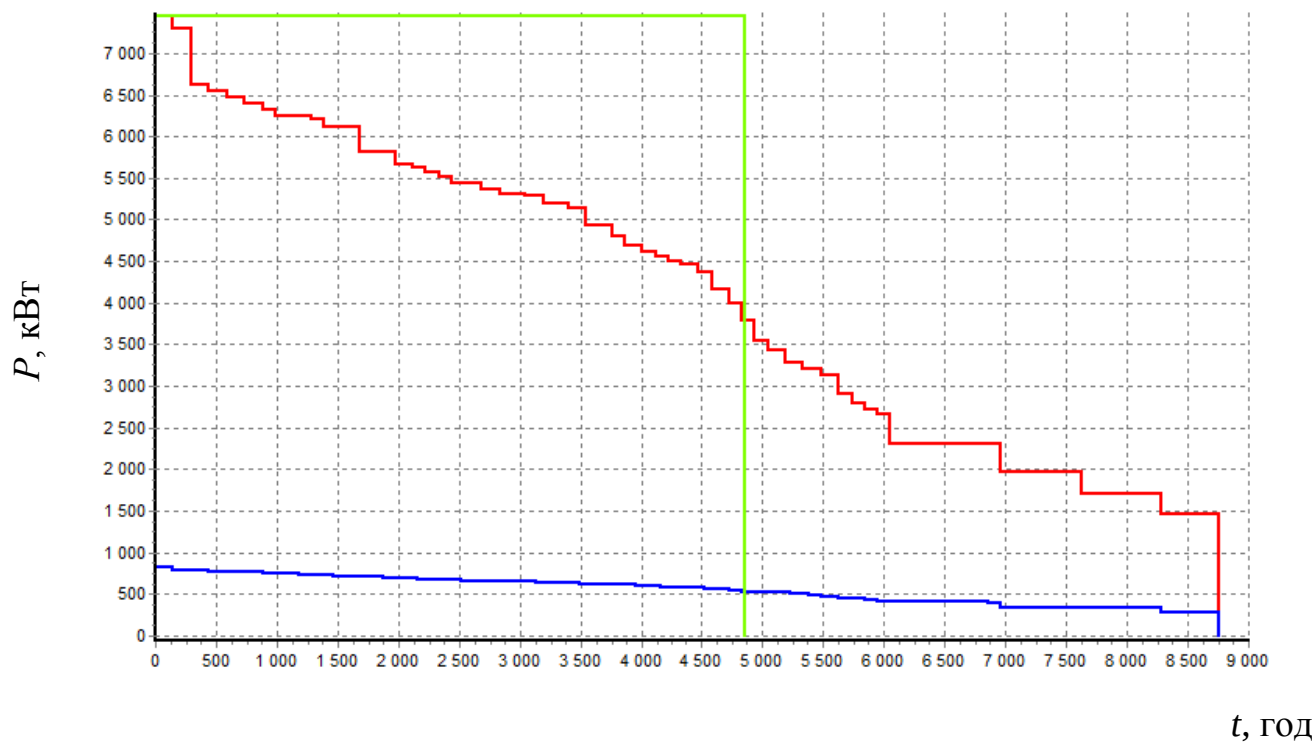


Рис. 1.5. Річний графік за тривалістю (Р)

Таблиця 1.6. Результати розрах. параметрів графіків

№	Назва параметру	Знач.	Од. вим.
1	$S_{\text{розр}}$	7583,93	МВА
2	$W_{\text{з.р.}}$	19401057	кВт·год
3	$V_{\text{з.р.}}$	2433035	квар·год
4	$W_{\text{з.в.}}$	3253215	кВт·год
5	$V_{\text{з.в.}}$	591625	квар·год
6	$W_{\text{л.р.}}$	11779346	кВт·год
7	$V_{\text{л.р.}}$	1477120	квар·год
8	$W_{\text{л.в.}}$	2042232	кВт·год
9	$V_{\text{л.в.}}$	371120	квар·год
10	$W_{\text{річн.}}$	36475850	кВт·год
11	$V_{\text{річн.}}$	4872901	квар·год
12	$T_{\text{м}}$	4910,58	год
13	$\tau_{\text{м}}$	3290,44	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Зразок обчислення геометричних характеристик діаграми для цеху виготовлення гідроциліндрів наведено нижче:

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{р.сил}} + P_{\text{р.осв}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{635,40 + 21,87}{3,14 \cdot 0,3}} = 26,41 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{360 \cdot P_{\text{р.осв}}}{P_{\text{р.сил}} + P_{\text{р.осв}}} = \frac{360 \cdot 21,87}{635,40 + 21,87} = 12,0^\circ$$

Розрахунки для інших структурних одиниць заводу згруповано у таблиці 2.1.

Координати умовного центра електричних навантажень підприємства визначаються так:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m X_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{1553557,75}{8573,83} = 181,20 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j \cdot P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{869818,65}{8573,83} = 101,45 \text{ м}$$

						Ар.
						22

Таблиця 2.1. Результати розрахунку картограми електричних навантажень

№ п/п		$P_{P. \text{силь}}$ кВт	$P_{P. \text{осв}}$ кВт	$P_{P, \text{кВт}}$	m	$R, \text{мм}$	a	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$	$P \cdot x,$ кВт · м	$P \cdot y,$ кВт · м
1	Цех виготовлення гідроциліндрів	635,40	21,87	657,27	0,3	26,41	12,0	22	70	14460,0	46009,0
2	Дільниця виробництва гідророзпо	568,77	17,80	586,57	0,3	24,95	10,9	152	37	89158,6	21703,1
3	Цех збирання насосних станцій	1087,31	19,39	1106,70	0,3	34,26	6,3	246	40	272248,2	44268,0
4	Дільниця виробництва рукавів ви	991,92	12,25	1004,17	0,3	32,64	4,4	65	44	65271,1	44183,5
5	Станція перекачування мастил	319,28	11,31	330,59	0,3	18,73	12,3	117	124	38679,0	40993,2
6	Дільниця виробництва фітінгів	254,96	29,59	284,55	0,3	17,37	37,4	244	87	69430,2	24755,9
7	Головний цех складання гідроагре	482,51	27,28	509,79	0,3	23,26	19,3	136	75	69331,4	38234,3
8	Сховище робочих рідин та хіммате	108,83	22,45	131,28	0,3	11,81	61,6	161	118	21136,1	15491,0
9	Дільниця складання міні-гідростан	129,62	10,25	139,87	0,3	12,18	26,4	253	73	35387,1	10210,5
10	Головний адміністративний корпу	120,15	23,39	143,54	0,3	12,34	58,7	291	196	41770,1	28133,8
11	Дільниця виготовлення гідроакум	1100,88	22,01	1122,89	0,3	34,51	7,1	210	62	235806,9	69619,2
12	Пожежна станція	416,78	6,70	423,48	0,3	21,20	5,7	59	116	24985,3	49123,7
13	Ковальсько-пресовий цех	117,85	3,32	121,17	0,3	11,34	9,9	173	186	20962,4	22537,6
14	Цех механічної обробки гідрокомп	658,21	12,60	670,81	0,3	26,68	6,8	196	196	131478,8	131478,8
15	Ремонтно-механічний цех	112,06	18,13	130,19	0,3	11,75	50,1	210	176	27339,9	22913,4
16	Генераторне відділення	126,42	3,36	129,78	0,3	11,73	9,3	169	171	21932,8	22192,4
17	Транспортний відділ	44,20	13,77	57,97	0,3	7,85	85,5	357	128	20695,3	7420,2
18	Теплогенераторна станція	884,78	20,19	904,97	0,3	30,99	8,0	348	231	314929,6	209048,1
19	Комплекс харчування	89,13	15,65	104,78	0,3	10,54	53,8	343	189	35939,5	19803,4
20	Заводська територія	0,00	9,08	9,08	0,3	3,11	360,0	190	132	1725,2	1198,6
Σ	Разом	8252,97	320,86	8573,83						1553557,75	869818,65

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Схема зовнішнього електропостачання

Заводські потужності можуть забезпечуватися енергією від опорного підстанційного вузла 35/10 кВ, віддаленого на 10,65 км. Проаналізуємо 2 можливі підходи:

Кабельні траси КЛ 10 кВ (рис. 3.1 а).

Повітряні споруди ПЛ 35 кВ (рис. 3.1 б).

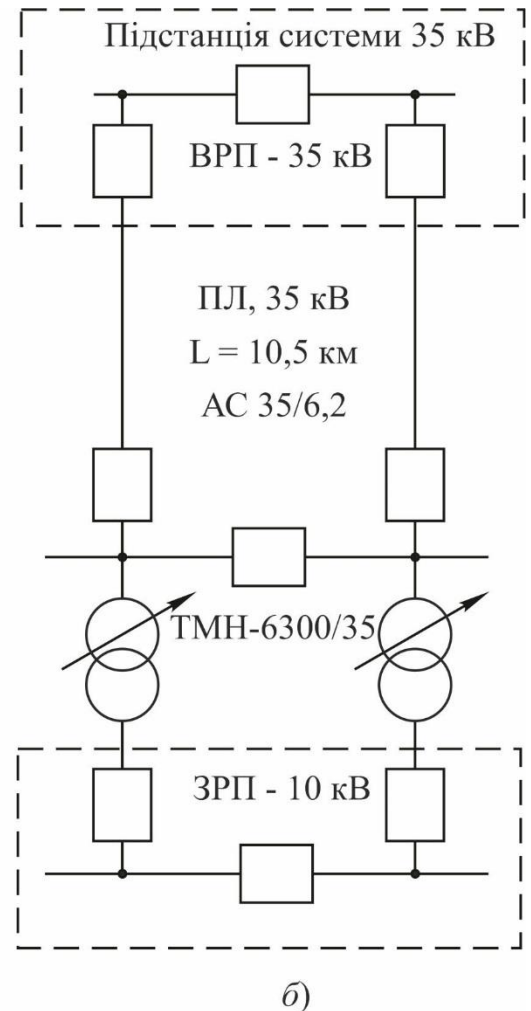
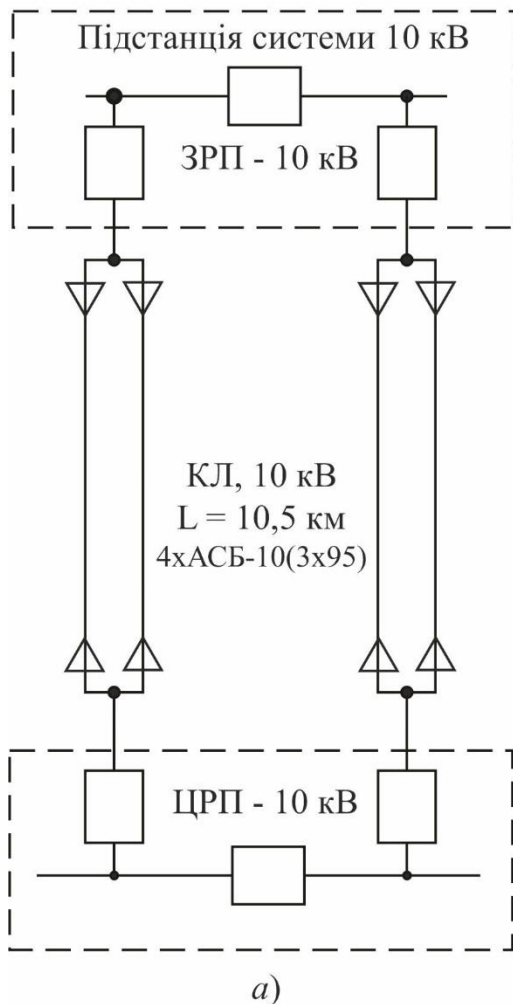


Рис. 3.1. Схеми зовн. електропостач.

Варіант 1. Кабельні лінії напругою 10 кВ.

$$I_p = \frac{7583,93}{\sqrt{3} \cdot 10} = 437,86 \text{ А}$$

Приймаємо до прокладання 4 паралельні лінії марки АСБ-10(3х95).

Контрольна перевірка кабельних ліній за умовами тривалого струмового навантаження та в аварійному режимі:

$$I_p = 109,52 \text{ А} \leq K_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 0,84 \cdot 192 = 161,28 \text{ А}$$

$$I_{p.\text{ав}} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 109,52 = 219,04 \text{ А} \leq K_{\text{ав}} \cdot K'_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 192 = 240 \text{ А}$$

Обрані кабельні лінії повністю задовольняють критеріям працездатності.

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{109,52}{192} = 0,57$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{1\text{км}} \cdot l_{\text{кл}} \cdot K_3^2 = 16 \cdot 42 \cdot 0,3249 = 218,33 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma} \cdot \tau_{\text{м}} = 218,33 \cdot 3290,44 = 718398,03 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$C_{\text{в.тр}} = \Delta W_{\Sigma} \cdot C_0 \cdot 0,001 = 718398,03 \cdot 8,87 \cdot 0,001 = 6372,19 \text{ тис. грн}$$

Таблиця 3.1. Розрахунок капвкладень

№	Назва	Од.	К-сть	Вартість	Всього
1	Кабельні лінії 10 кВ	км	42	81,6	3470,04
2	Земляні роботи	км	10,65	14,3	152,03
3	Розподільчі комірки КРП серії КУ-10	шт.	2	10,7	21,4
Всього					3643,47

						Ар.
						25

Таблиця 3.2. Поточні витрати

№	Назва	K_j	P_{aj}	C_{aj}	P_{ej}	C_{ej}	C_j
1	Кабельні лінії 10 кВ	3470,04	5	173,5	5	173,5	347
2	Земляні роботи (Траншея)	152,03	5	7,6	5	7,6	15,2
3	Розподільчі комірки КРП серії КУ-10	21,4	15	3,21	5	1,07	4,28
Σ	Разом						366,48

Розрахунки збитків од недовідпуску електроенергії приведено нижче.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,00405 + 1,701 = 1,70505 \text{ 1/рік}$$

$$T_B = \frac{\sum \lambda_i T_{Bi}}{\lambda} = \frac{(0,00405 \cdot 0,000456 + 1,701 \cdot 0,00149)}{1,70505} = 0,00148753 \text{ рік}$$

$$K_{\Pi} = 1,2 \cdot K_{\Pi max} = 1,2 \cdot 0,00202 = 0,002424$$

$$K_a = \lambda T_B = 1,70505 \cdot 0,00148753174 = 0,0025363$$

$$K_{a\Pi} = 0,5 \cdot \lambda \cdot K_{\Pi}^2 = 0,5 \cdot 1,70505 \cdot 0,000005876 = 0,0000050095$$

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2K_{a\Pi} = 0,00000643282 + 2 \cdot 0,0000050095 = 0,0000164518$$

$$T_a = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,0000164518 \cdot 8760 = 0,14412 \text{ год}$$

$$Y = Y_0 \cdot P_{\text{сп}} \cdot T_a = 26,94 \cdot 4,18 \cdot 0,14412 = 16,23 \text{ тис. грн}$$

Зведені витрати:

						Ар.
						26

$$Z_1 = E_H \cdot K_1 + C_1 + C_{\text{в.тр.1}} + Y_1 =$$

$$= 0,12 \cdot 3643,47 + 366,48 + 6372,19 + 16,23 = 7192,12 \text{ тис. грн/рік}$$

Таблиця 3.3. Результати порівняння схем зовн. електропостачання

Найменування показника	Варіант 1 (КЛ 10 кВ)	Варіант 2 (ПЛ 35 кВ)
Першочергові капітальні інвестиції, тис. грн.	3643,47	944,38
Річні експлуатаційні видатки, тис. грн.	366,48	122,28
Вартість технологічних втрат електроенергії, тис. грн.	6372,19	3737,88
Очікувані збитки від недовідпуску енергії, тис. грн.	16,23	5,32
Сумарні зведені витрати, тис. грн/рік	7192,12	4020,44

Як видно, для варіанту 2 (ПЛ 35 кВ) зведені витрати більш прийнятні, обираємо саме його.

3.2 Схема внутрішнього електропостачання

Для побудови системи внутрішнього розподілу енергії оптимальним кроком є впровадження радіальної структури побудови мережі. Ця топологія має комплекс істотних інженерних та експлуатаційних переваг.

За такої архітектури кожен окремий фідер відповідає за енергозабезпечення чітко визначеної технологічної групи приймачів. У разі аварійного виходу з ладу будь-якої лінії, дефектний елемент миттєво ізолюється автоматикою, що запобігає поширенню збою на інші вузли. Ця особливість є ключовою відмінністю від магістрального принципу, де замикання або обрив здатні повністю позбавити живлення всіх споживачів, підключених нижче за напрямком передачі струму.

Радіальне компонування виділяється максимально прозорою та послідовною побудовою. Це суттєво полегшує діагностику дефектів, локалізацію пошкоджень та виконання будь-яких профілактичних чи аварійних робіт. Завдяки однозначному розподілу кіл живлення, чергові інженери можуть оперативно аналізувати стан мережі та оперативно відновлювати нормальний режим роботи підприємства.

Якщо виникає потреба в підключенні додаткових виробничих потужностей, радіальна схема дозволяє легко масштабувати інфраструктуру. Нові об'єкти інтегруються за допомогою прокладання окремих кабельних ліній без необхідності масштабного перевлаштування наявних вузлів розподілу. Натомість магістральні мережі в подібних обставинах нерідко змушують проводити повну заміну головного кабелю через брак його пропускної здатності.

Незалежність функціонування кожної лінії мінімізує ризик виникнення системних каскадних аварій, коли вимкнення одного сегмента тягне за собою ланцюгове перевантаження та зупинку суміжних ділянок, що нерідко трапляється в розгалужених магістралях.

Окрім того, подібна організація мережі створює чудові умови для точного моніторингу та збалансованого розподілу потужностей між усіма напрямками. Це дозволяє гнучко керувати енергоспоживанням заводу, знижувати загальні втрати та покращувати загальні показники енергоефективності.

Проте варто брати до уваги, що створення радіальних мереж супроводжується потребою в монтажі збільшеної кількості захисних апаратів та комутаційних пристроїв. Як наслідок, це може потягнути за собою певне збільшення початкових фінансових інвестицій на стадії будівництва порівняно з магістральним підходом.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Баланс реактивної потужності

$$P_p = P_H + \Delta P_T + P_B = 8573,83 + 87,08 + 0 = 8660,91 \text{ кВТ}$$

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B = 6644,05 + 458,66 + 0 = 7102,71 \text{ кВар}$$

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 8660,91 \cdot 0,12 = 1039,31 \text{ кВар}$$

$$Q_{\text{кп}} = Q_{\text{п}} - Q_{\text{е}} = 7102,71 - 1039,31 = 6063,40 \text{ квар}$$

Для визначення мінімальної кількості силових трансформаторних одиниць на об'єкті застосовується така математична залежність:

$$N_0 = \frac{P_H}{\beta \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{8573,83}{0,7 \cdot 1000} = 12,25 \approx 13 \text{ шт.}$$

Варіант 1. $N = 13$ шт. Математичні залежності для визначення розподілу потужності компенсувальних пристроїв за умови $N = 13$ шт наведено далі.

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{\text{HOM}})^2 - (P_{\text{H}} + \Delta P_{\text{T}})^2} = \sqrt{(13 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 8660,91^2} = 2816,58 \text{ кВар}$$

$$Q_{KH} = (Q_H + \Delta Q_T) - Q_1 = 7102,71 - 2816,58 = 4286,13 \text{ кВт}$$

Таблиця 4.4. Результати вибору КП ($N_T = 15$ шт.)

№ КТП	К-сть м-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	Кількість та потужність БК, шт. · кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп} -$ $Q_{бк}$, кВАр	K_z	S_p , кВА
1,2	3	1876,74	1009,53	496,25	513,28	$1 \times 150; 2 \times 166$	482	31,28	0,68	2131,04
3	3	1467,97	21,02	1538,26	0	—	0	0	0,68	2083,55
4	2	1113,37	897,49	669,79	227,7	$2 \times 112,5$	225	2,7	0,68	1430,07
5	2	1059,08	961,06	893,26	67,8	1×67	67	0,8	0,68	1430,13
6,7	5	2638,42	1035,17	2366,66	0	—	0	0	0,64	3272,18

Потужність БК 0,4 кВ: 774 квар; сумарна потужність БК 10 кВ: 5468 квар.

Нижче наведено розрахункові вирази для визначення технологічних втрат активної потужності в елементах системи електропостачання підприємства

$$\Delta P_{KH} = P_{пит}^{KH} \cdot Q_{KH} = 0,0045 \cdot 3123 = 14,05 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{KB} = P_{пит}^{KB} \cdot Q_{KB} = 0,003 \cdot 3087 = 9,26 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{ТП} = \frac{P_H^2 + Q_1^2}{U_H^2} \cdot R_T \cdot 10^{-3} = \frac{8573,83^2 + 2816,58^2}{10^2} \cdot 0,07 \cdot 0,001 = 57,01 \text{ кВт}$$

Нижче наведено розрахункові вирази для визначення капітальних вкладень у низьковольтні та високовольтні компенсувальні пристрої об'єкта.

$$K_{KH} = \sum_{i=1}^n N_{KH i} \cdot K_{KH i}$$

$$= 1 \cdot 3,57 + 2 \cdot 3,95 + 1 \cdot 4,77 + 2 \cdot 4,81 + 4 \cdot 5,60 + 1 \cdot 6,79 + 1 \cdot 7,25 + 2 \cdot 8,28 = 78,85 \text{ тис. грн}$$

$$K_{KB} = \sum_{i=1}^n N_{KB i} \cdot K_{KB i} = 1 \cdot 21,54 + 1 \cdot 27,10 = 48,64 \text{ тис. грн}$$

						Ар.
						31

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Конфігурація розрахункової схеми разом із відповідною схемою заміщення електричної мережі відображені на рис. 6.1 та 6.2.

Еквівалентні електричні опори компонентів системи до комутаційних шин напругою 35 кВ головної знижувальної підстанції (стосовно розрахункової точки K_0) обчислюються таким чином.

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з.}} = \frac{37^2}{55000} = 0,025 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{0,025}{25} = 0,001 \approx 0 \text{ Ом}$$

$$R_{л} = r_0 \cdot l = 0,85 \cdot 10,65 = 9,053 \text{ Ом}$$

$$X_{л} = x_0 \cdot l = 0,438 \cdot 10,65 = 4,665 \text{ Ом}$$

$$X_{K0} = X_c + X_{л} = 0,025 + 4,665 = 4,690 \text{ Ом}$$

$$R_{K0} = R_c + R_{л} = 0 + 9,053 = 9,053 \text{ Ом}$$

$$Z_{K0} = \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2} = \sqrt{9,053^2 + 4,690^2} = 10,195 \text{ Ом}$$

Параметри струму к.з. в т. K_0 :

						Ар.
						34

$$I''_{K0} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K0}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 10,195} = 2,10 \text{ кА}$$

$$T_{a0} = \frac{X_{K0}}{\omega \cdot R_{K0}} = \frac{4,665}{314 \cdot 9,053} = 0,00164 \text{ с}, \quad k_{yд0} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a0}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,00164}} = 1,002$$

$$i_{yд0} = \sqrt{2} \cdot k_{yд0} \cdot I''_{K0} = \sqrt{2} \cdot 1,002 \cdot 2,10 = 2,98 \text{ кА}$$

Опори елементів мережі приведені до напруги 10 кВ ГЗП (точка К1):

$$X'_{K0} = X_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 4,665 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,376 \text{ Ом}$$

$$R'_{K0} = R_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 9,053 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,729 \text{ Ом}$$

$$Z'_{K0} = Z_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}} \right)^2 = 10,195 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,821 \text{ Ом}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{ср.ном.}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^3 = \frac{47 \cdot 10,5^2}{6300^2} \cdot 10^3 = 0,13 \text{ Ом}$$

$$X_T = \frac{U_{K, \%} \cdot U_{\text{ср.ном.}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot 10 = \frac{7,5 \cdot 10,5^2}{6300} \cdot 10 = 1,31 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X'_{K0} + X_T = 0,376 + 1,31 = 1,686 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R'_{K0} + R_T = 0,729 + 0,13 = 0,859 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,859^2 + 1,686^2} = 1,892 \text{ Ом}$$

						Ар.
						35

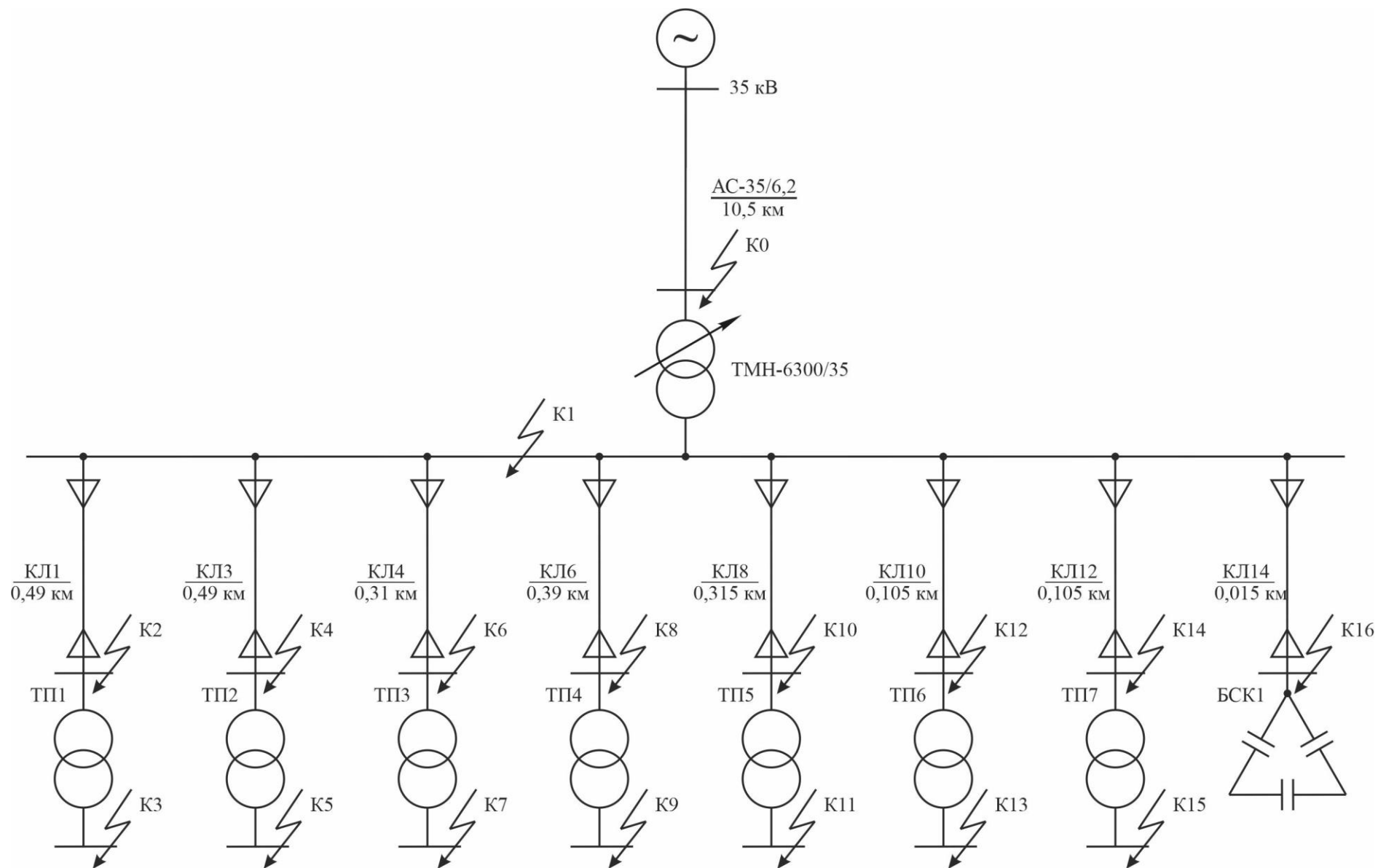


Рис. 6.1. Розрахункова схема

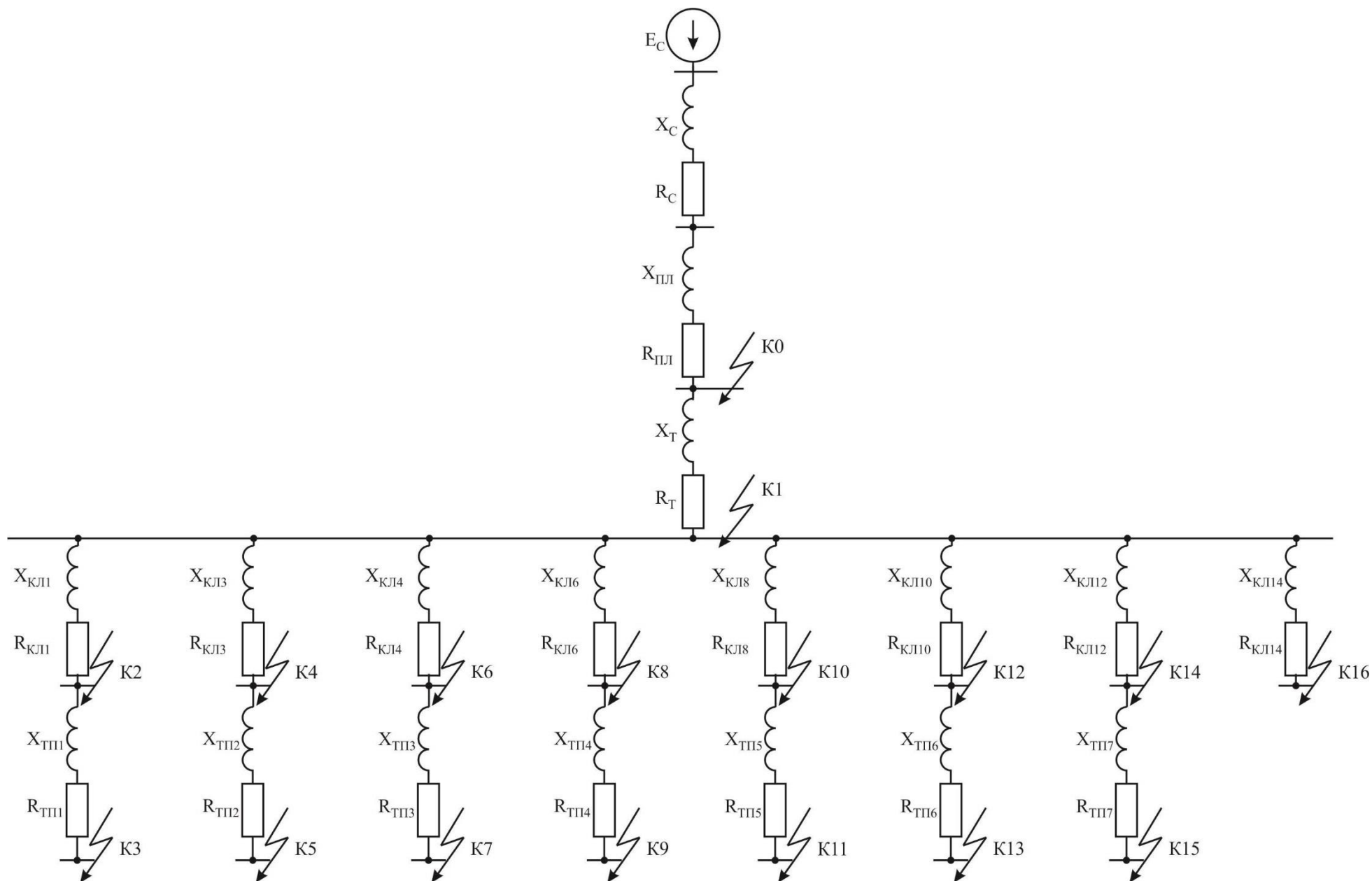


Рис. 6.2. Схема заміщення

Параметри струму к.з. в т. К₁:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,892} = 3,20 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,686}{314 \cdot 0,859} = 0,00625 \text{ с}$$

$$k_{yд1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,00625}} = 1,202$$

$$i_{yд1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{yд1} \cdot I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,202 \cdot 3,20 = 5,44 \text{ кА}$$

Параметри вибору КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1421,40}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 39,13 \text{ А}$$

$$B_K = I''_{K1}{}^2 \cdot (t_{\text{п.з.мин}} + T_a) = 3,20^2 \cdot (0,525 + 0,00625) = 5,44 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{1}{C} \cdot \sqrt{B_K} \cdot 10^3 = \frac{1}{94} \cdot \sqrt{5,44} \cdot 10^3 = 24,81 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель ААШВ-10(3 х 35).

Опір КЛ1:

$$R_{\text{КЛ}} = r_0 \cdot l_{\text{КЛ}} = 0,89 \cdot 0,50 = 0,445 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{КЛ}} = x_0 \cdot l_{\text{КЛ}} = 0,095 \cdot 0,50 = 0,048 \text{ Ом}$$

Опори інших ліній наведено в табл. 6.1.

						Ар.
						38

Таблиця 6.1. Розрахунок опорів КЛ

№ КЛ	$l, \text{ км}$	$r_0, \text{ Ом/км}$	$x_0, \text{ Ом/км}$	$R, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$
1, 2	0,5	0,89	0,095	0,445	0,048
3	0,5	0,89	0,095	0,445	0,048
4, 5	0,315	0,89	0,095	0,28	0,03
6, 7	0,395	0,89	0,095	0,352	0,038
8, 9	0,32	0,89	0,095	0,285	0,03
10, 11	0,106	0,89	0,095	0,094	0,01
12, 13	0,106	0,89	0,095	0,094	0,01
14, 15	0,015	0,326	0,083	0,005	0,001

Параметри струму к.з. в т. К2:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кл} = 1,686 + 0,048 = 1,734 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кл} = 0,859 + 0,445 = 1,304 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{1,304^2 + 1,734^2} = 2,170 \text{ Ом}$$

$$I''_{K2} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,170} = 2,79 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega \cdot R_{K2}} = \frac{1,734}{314 \cdot 1,304} = 0,00424 \text{ с}$$

$$k_{yд2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,00424}} = 1,095$$

$$i_{yд2} = \sqrt{2} \cdot k_{yд2} \cdot I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,095 \cdot 2,79 = 4,32 \text{ кА}$$

Опір трансформатора ТМ-1000/10:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_k U_{cp, ном}^2}{S_{ном}^2} = \frac{8,6 \cdot 10,5^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 0,948 \text{ Ом}$$

$$X_{mp} = \frac{U_{k, \%} U_{cp, ном}^2}{S_{ном}} = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{1000} \cdot 10 = 6,064 \text{ Ом}$$

Параметри струму к.з. в т. КЗ:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{тр}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (1,734 + 6,064) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0113 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{тр}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (1,304 + 0,948) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0033 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0033^2 + 0,0113^2} = 0,0118 \text{ Ом}$$

$$I''_{K3} = \frac{U_{cp, ном.}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0118} = 19,57 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0113}{314 \cdot 0,0033} = 0,01090 \text{ с}$$

$$k_{уд3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,01090}} = 1,399$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot k_{уд3} \cdot I''_{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,399 \cdot 19,57 = 38,72 \text{ кА}$$

Розрахунок струмів к.з. в інших точках наведено в табл. 6.2.

						Ар.
						40

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

№ точки к.з.	$R, \text{Ом}$	$X, \text{Ом}$	$I_{\kappa}'' , \text{кА}$	$T_a, \text{с}$	$k_{y\partial}$	$i_{y\partial}, \text{кА}$
0	8,925	4,62	2,13	0,0016	1,002	3,02
1	0,849	1,682	3,22	0,0063	1,204	5,48
2	1,285	1,729	2,81	0,0043	1,098	4,36
3	0,0032	0,0113	19,74	0,0112	1,409	39,33
4	1,285	1,729	2,81	0,0043	1,098	4,36
5	0,0032	0,0113	19,74	0,0112	1,409	39,33
6	1,125	1,711	2,96	0,0048	1,125	4,71
7	0,003	0,0113	19,74	0,012	1,435	40,06
8	1,196	1,719	2,89	0,0046	1,114	4,55
9	0,0031	0,0113	19,74	0,0116	1,422	39,7
10	1,129	1,712	2,96	0,0048	1,125	4,71
11	0,003	0,0113	19,74	0,012	1,435	40,06
12	0,942	1,692	3,13	0,0057	1,173	5,19
13	0,0027	0,0113	19,91	0,0133	1,471	41,42
14	0,942	1,692	3,13	0,0057	1,173	5,19
15	0,0027	0,0113	19,91	0,0133	1,471	41,42
16	0,854	1,683	3,21	0,0063	1,204	5,47

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Нижче наведено розрахунковий вираз для визначення номінального робочого струму кабельної лінії, що здійснює живлення трансформаторної підстанції ТП-1.

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1421,40}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 39,13 \text{ А}$$

Нижче наведено розрахункові вирази для перевірки умов вибору та стійкості до струмів короткого замикання кабельної лінії живлення підстанції ТП-1 (двох паралельно прокладених кабелів марки ААШв-10 із перерізом жил $3 \times 35 \text{ мм}^2$).

$$I_p = 39,13 \text{ A} \leq K_{\pi} \cdot I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 80 = 73,6 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав}} = 78,26 \text{ A} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_{\pi} \cdot I_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 80 = 100 \text{ A}$$

$$B_{\kappa} = I_{\kappa 1}''^2 \cdot (t_{\text{п.з.мин}} + T_a) = 3,20^2 \cdot (0,525 + 0,00625) = 5,44 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{1}{C} \cdot \sqrt{B_{\kappa}} \cdot 10^3 = \frac{1}{94} \cdot \sqrt{5,44} \cdot 10^3 = 24,81 \text{ мм}^2$$

В табл. 6.3 наведено результати вибору КЛ.

						Ар.
						42

Таблиця .6.3. Вибір КЛ

№ КЛ	n , шт	S_p , МВА	I_p , А	$I_{p.\text{ав.}}$, А	B_k , $\text{кА}^2\text{с}$	$F_{\min}$, мм^2	Марка кабелю	$I_{\text{дон}}$, А	K_n	$K_n I_{\text{дон}}$, А	K_{an}	K'_n	$K_{an} K'_n$ $I_{\text{дон}}$, А
1, 2	2	1421,4	39,13	78,26	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×35)	80	0,92	73,6	1,25	1	100
3	1	710,7	39,13	—	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×35)	80	1	80	—	—	—
4, 5	2	1430,07	39,37	78,74	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×35)	80	0,92	73,6	1,25	1	100
6, 7	2	1430,13	39,37	78,74	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×35)	80	0,92	73,6	1,25	1	100
8, 9	2	1417,11	39,01	78,02	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×35)	80	0,92	73,6	1,25	1	100
10, 11	2	1417,11	39,01	78,02	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×35)	80	0,92	73,6	1,25	1	100
12, 13	2	2083,55	57,36	114,72	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
14, 15	1	1822,5	100,21	—	5,44	24,81	ААШВ-10 (3×95)	155	1	155	—	—	—

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Нижче наведено розрахункові вирази для перевірки параметрів та умов вибору ввідного високовольного вимикача напругою 35 кВ (для точки К₀).

$$\tau = t_{p.з.min} + t_{с.в} = 0,02 + 0,05 = 0,07 \text{ с}$$

$$i_{ат} = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 2,10 \cdot e^{\frac{-0,07}{0,00164}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_k = I''^2 \cdot (t_{с.в} + t_{p.з.max} + T_a) = 2,10^2 \cdot (0,05 + 1,02 + 0,00164) = 4,73 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Умови вибору та перевірки вимикача 35 кВ типу ВР35НС-35-20/1600У1 приведені нижче, у вигляді табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача 35 кВ

Параметр вимикача	Умова вибору	Розрахункові дані	Каталожні дані
Номінальна напруга, кВ	$U_{ном} \geq U_{мережі}$	35	35
Довготривалий робочий струм, А	$I_{доп} \geq I_{р.мах}$	145,49	1600
Відключаюча здатність:			
- симетричний струм відключення, кА	$I_{вим.ном} \geq I''$	2,1	20
- аперіодична складова струму, кА	$i_{ат.ном} \geq i_{ат}$	0	11,31
- повний струм відключення, кА	$I_{вим.повн} \geq 2 \cdot I'' + i_{ат}$	2,96	39,6
Динамічна стійкість:			
- симетричний струм, кА	$I_{дин} \geq I''$	2,1	52
- ударний струм, кА	$i_{дин} \geq i_{уд}$	2,98	132,37
Термічна стійкість, кА ² ·с	$I_{тер}^2 \cdot t_{тер} \geq B_k$	4,73	1200

Обираємо ВР35НС-35-20/1600У1.

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема приєднання ТВП до мережі наведена на рис. 6.3.

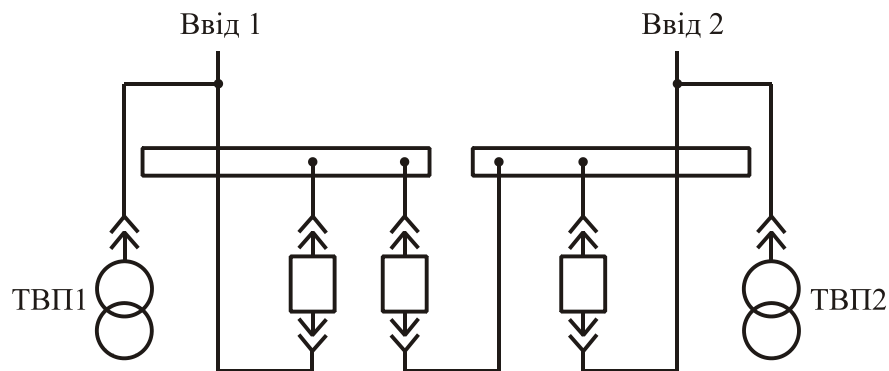


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП до мережі

Нижче наведено розрахункові вирази для визначення сумарного електричного навантаження власних потреб підстанції об'єкта, а також перевірки коефіцієнта завантаження обраного силового обладнання.

$$S_{\text{уст}} = \sqrt{P_{\text{уст}}^2 + Q_{\text{уст}}^2} = \sqrt{99,9^2 + 41^2} = 107,99 \text{ кВА}$$

$$S_p = K_c \cdot S_{\text{уст}} = 0,8 \cdot 107,99 = 86,39 \text{ кВА}$$

Обираємо ТМ-63/10.

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{86,39}{2 \cdot 63} = 0,69$$

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСУ, ПОБУДОВАНОГО НА БАЗІ МІКРОГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

7.1 Сучасні методи збереження виробленої електроенергії

Стрімке поширення зеленої генерації генерує виклики, пов'язані зі зберіганням згенерованих потужностей через добову флуктуацію їхньої віддачі. Найбільш гостро вказана дилема постає перед локальними домогосподарствами, які експлуатують фотовольтаїчні панелі. Багатонадійним виходом вбачається інтеграція мікрогідроакумулювальних комплексів у єдину мережу з геліосистемами. Фундаментальний механізм функціонування базується на спрямуванні профіцитних кіловат-годин для транспортування рідини у верхній б'єф, формуючи таким чином резерв гравітаційної взаємодії. Під час настання пікових навантажень в електромережі, накопичений ресурс трансформується у зворотньому напрямку. Подібна методика гарантує раціональну експлуатацію екологічно чистих ресурсів і суттєво підвищує загальну надійність електропостачання. Крім того, завдяки згладжуванню графіків навантаження, значно подовжується термін служби інверторного обладнання та знижуються втрати на транзит струму.

Гідравлічні накопичувачі успішно впроваджуються різними категоріями користувачів: від приватних осіб до глобальних об'єднаних енергосистем. Денний профіцит генерації від сонячних променів живить насосні агрегати, котрі наповнюють штучні водойми на підвищеннях. Такий алгоритм нівелює потребу балансування за допомогою теплових ТЕЦ, заощаджуючи викопні ресурси. Згідно з оцінками експертів, застосування подібних гібридних рішень дозволяє знизити викиди вуглекислого газу в атмосферу на 18,5-21,5 %. У вечірній та нічний час потенціал маси води покриває дефіцит потужності шляхом проходження крізь лопаті гідротурбін. Комбінована топологія полегшує включення альтернативних

						Ар.
						46

джерел до загальної інфраструктури, водночас розширюючи межі її гнучкості та стійкості до можливих блекаутів.

Мініатюрні насосно-турбінні комплекси радикально оптимізують процеси акумуляції від нетрадиційних генеруючих потужностей на рівні ізольованих мікрогрідів та приватних садиб. Сучасні розробки демонструють середній загальний коефіцієнт корисної дії таких міні-станцій на рівні 67-74 %, що робить їх конкурентоспроможними в довгостроковій перспективі. З огляду на нагальну необхідність створення безвідмовних та рентабельних сховищ значних обсягів струму, співставлення існуючих рішень за ключовими критеріями (ціна, ефективність перетворення, життєвий цикл) стає фундаментальним завданням проектування.

На сучасному етапі розвитку інженерії доступний широкий спектр методів зберігання: гідравлічні резервуари, хімічні комірки, кінетичні ротори, пневматичні балони високого тиску та термальні сховища. Дедалі більшої популярності також набувають гравітаційні твердотільні накопичувачі, що оперують підйомом масивних бетонних або композитних блоків. Будь-який із цих варіантів володіє специфічними рисами, які визначають його найвигіднішу нішу застосування.

Комплексне дослідження альтернатив крізь призму капіталовкладень, безперебійності та рентабельності дає змогу виокремити найкращий варіант під конкретні технічні вимоги об'єкта. Синтез декількох різновидів у межах єдиного кластера здатен мультиплікативно підвищити загальні показники збереження ресурсу та мінімізувати недоліки окремих ланок.

Звичайні електролітичні ємності демонструють максимальний рівень корисної дії, проте відрізняються надзвичайно високою ціною за кожен запасений джоуль. Головною їхньою перевагою залишається блискавичний прийом та віддача заряду. Іоністори (суперконденсатори) здатні зберігати значно більшу щільність потужності (досягаючи показників у 1,05–5,25 тисяч фарад) і гарантують високошвидкісне циклування. Разом з тим, ці прилади програють класичним гальванічним елементам у загальній місткості, страждають від швидкого самовільного розрядження та вимагають обов'язкового встановлення балансирів

для уникнення стрибків напруги. У фінансовому плані вони знаходяться рівно посередині між стандартними радіодеталями та повноцінними акумуляторними збірками. Використання іоністорів доцільне там, де необхідна миттєва акумуляція малих порцій електрики за умов інтенсивного ритму перезарядок.

Хімічні джерела струму є беззаперечними лідерами ринку завдяки збалансованому компромісу між ціною та експлуатаційними параметрами. Класичні свинцеві блоки впродовж десятиліть утримували першість виключно завдяки своїй дешевизні, незважаючи на об'єктивно слабкі масо-габаритні критерії. Сучасні технології на базі літію (включно з полімерними версіями) пропонують кращі показники місткості, ефективності перетворення, питомої щільності та загальної довговічності. Зокрема, інноваційні літій-залізо-фосфатні комірки зараз забезпечують найвищий рівень пожежної безпеки серед аналогів та стійкість до глибоких просадок напруги. Проте передові хімічні елементи все ще лімітовані своїм ресурсом (зазвичай від 0,95 до 10,5 тис. повних розрядів), невідворотно втрачають початкові властивості з часом, бояться перезарядження і критично залежать від електронних плат управління (BMS). Капітальні витрати на їх впровадження продовжують залишатися відчутно вищими на тлі інших інженерних підходів.

Комплекси гідравлічного акумуляування безпосередньо експлуатують земне тяжіння, яке діє на робочу рідину, для трансформації електроструму. Базова архітектура таких об'єктів передбачає наявність двох розділених висотою басейнів, між якими по трубопроводах переміщується водний масив. Коли в мережі фіксується надлишок пропозиції, потужні помпи підіймають потоки до верхнього сховища, переводячи кіловати у фізичний стан спокою. Зі зростанням споживацького попиту, накопичений об'єм стрімко прямує вниз крізь напрямні апарати гідромашин, що змушує обертатися вали електрогенераторів. Така технологія дозволяє системно регулювати частоту змінного струму в електромережі з точністю до десятих часток герца за лічені хвилини.

Вирішальним плюсом таких комплексів виступає їхня здатність блискавично реагувати на раптові стрибки споживання. Завдяки цій властивості вони ідеально

підходять задля балансування об'єднаних мереж, де переважає генерація з відновлюваних ресурсів. Механічні та гідротехнічні вузли здатні безперебійно функціонувати протягом багатьох десятиків років, вимагаючи лише базового регламентного сервісу. Проте суттєвим мінусом залишаються значні капітальні витрати, необхідні для спорудження дамб, трубних магістралей та закупівлі турбін. Саме фінансовий бар'єр найчастіше зупиняє інвесторів, незважаючи на очевидні технологічні вигоди. Зокрема, термін окупності масштабних проєктів може сягати півтора-два десятиліття, що зазвичай вимагає залучення довгострокового державного фінансування або пільгового міжнародного кредитування.

Ще одним критичним обмеженням для традиційних потужних гідровузлів є жорстка прив'язка до топографії місцевості. Для їх зведення необхідні природні перепади висот та прямий доступ до значних водних артерій. Подібні локації переважно знаходяться у гірських чи передгірських регіонах, які часто мають статус заповідних зон. Втручання у такі екосистеми викликає прогнозований спротив з боку екологічних організацій та місцевих громад. Процес проходження експертизи з оцінки впливу на довкілля може тривати роками, суттєво відтермінуючи початок активної фази будівельних робіт.

Враховуючи специфіку вітчизняного енергоринку, на передній план виходять нетрадиційні децентралізовані методи акумуляції. Досить багатонадійним вектором розвитку визнано інтеграцію відокремлених мікро-ГАЕС разом із фотовольтаїчними парками. Такі гібридні конфігурації дозволяють надзвичайно ефективно збирати профіцит електрики у сонячні години доби, щоб гарантовано покривати вечірні та нічні максимуми побутового попиту. Окрім цього, створення подібних хабів формує передумови для досягнення повної енергонезалежності окремих фермерських господарств, котеджних містечок чи віддалених від централізованих комунікацій поселень.

Локальні насосно-турбінні модулі, що працюють спільно з сонячними інверторами загальною номінальною віддачею до 104 кВт, характеризуються низкою незаперечних переваг:

						Ар.
						49

- порівняно невеликі питомі капіталовкладення на кожен кіловат встановленої потужності (на тлі класичних гігантів гідроенергетики);
- повна відсутність необхідності пошуку глибоководних природних озер чи повноводних річок;
- мінімізація шкоди для природного середовища завдяки експлуатації швидкозбірних резервуарів наземного або напівпідземного типу.

Використання сучасних полімерних геомембран для багатошарової гідроізоляції таких штучних басейнів повністю унеможлиблює просочування технічної рідини у ґрунт та запобігає забрудненню підземних водоносних горизонтів.

Перелічені фактори перетворюють малогабаритні ізольовані гідросховища на надзвичайно вигідний варіант збереження кіловат-годин, надто у комбінації з геліопанелями. Актуальні наукові розвідки у сфері систем резервування енергії фокусуються переважно на показниках загальної продуктивності, можливостях гнучкого масштабування та розширенні функціоналу наявного інверторного обладнання. Фахові аналітичні звіти детально розглядають параметри місткості, механізми синхронізації з локальними лініями електропередач та методики розрахунку найбільш раціональної пропускної здатності генераторів. Опубліковані матеріали ілюструють стрімкий технологічний стрибок, а також розкривають величезні резерви щодо просторової оптимізації розташування таких об'єктів. Вивчення подібних праць є фундаментально важливим для усвідомлення реальних меж та специфіки застосування кожної конкретної інженерної розробки.

Синергія водяних pomp, гідротурбін та сонячних масивів продовжує утримувати статус одного з найбільш пріоритетних напрямів як для теоретичних студій, так і для промислової експлуатації.

Станом на кінець звітних періодів 2021-2022 років, глобальний енергетичний сектор активно експлуатує цілу палітру інноваційних методів акумуляції. Серед ключових гравців виділяються:

- класичні ГАЕС (насосно-акумулювальні станції);

- пневматичні комплекси CAES та LAES (сховища на основі компресії або глибокого скраплення повітряних мас);
- FESS (кінетичні високовольтні маховики);
- лінійка Li-ion (сучасні літієві комірки різних хімічних складів);
- традиційні Pb (модернізовані свинцево-кислотні блоки);
- Ni-Cd (промислові нікель-кадмієві збірки);
- високотемпературні NaS (натрій-сірчані ємності);
- проточні Vrb (ванадієві редокс-батареї) тощо.

Окремої уваги заслуговують саме проточні електролітичні батареї, що демонструють надзвичайно високу стійкість до деградації електроліту, дозволяючи системам працювати понад чверть століття без відчутного просідання початкових характеристик.

Сумарний обсяг встановлених генеруючих спроможностей усіх згаданих вище платформ впевнено перевищує позначку в 208 ГВт. Ця солідна цифра яскраво ілюструє той факт, що міжнародна спільнота приділяє безпрецедентну увагу проблематиці збереження вироблених струмів. Сформований глобальний тренд є прямою, логічною відповіддю на гостру потребу у постійному згладжуванні графіків нерівномірної віддачі від вітрогенераторів та сонячних ферм, які критично залежать від зміни погодних умов.

Спираючись на офіційні звіти та зведення Міністерства енергетики США (DOE), можна впевнено констатувати абсолютну гегемонію традиційних макро-гідроакумулювальних об'єктів. Їхня сукупна робоча потужність становить близько 189 000 МВт. Якщо аналізувати інші доступні концепції на ринку, то лідерські щаблі впевнено утримують різноманітні електромеханічні комплекси та спеціалізовані термоакумулювальні резервуари. Провідні галузеві аналітики прогнозують стрімке, майже експоненційне зростання сумарної місткості стаціонарних сховищ (за виключенням тягових акумуляторів, що належать до сектору електротранспорту). Очікується феноменальний стрибок від базових 31 ГВт·год до вражаючих 9350 ГВт·год у стратегічному горизонті планування між

2020 та 2050 роками. Такий безпрецедентний прогрес нерозривно пов'язаний із затвердженими урядовими програмами переходу на безвуглецеві технології.

Втілення настільки амбітних макроекономічних намірів у життя стає можливим виключно за умови грамотного проектування та ретельного вибору апаратних конфігурацій. Під час розробки проєктів інфраструктури необхідно комплексно оцінювати як суто технічні, так і комерційні складові кожної окремої установки. Процес визначення ключових експлуатаційних параметрів для включення накопичувальних кластерів до складу об'єднаних електричних мереж прямо та безпосередньо корелює з їхніми фізичними специфікаціями. Такі показники, як граничне пікове навантаження, загальний ліміт збережених джоулів, ефективність повного циклу перетворення, масо-габаритні індекси та динамічна швидкість реакції апаратури, чітко окреслюють цільову нішу застосування. Саме перелічені критерії виступають надійним базисом для ухвалення рішень щодо просторового та логічного позиціонування об'єктів у структурі сучасного "розумного" енергоринку (Smart Grid). Окрім цього, вагому роль відіграє впровадження надійних протоколів кібербезпеки для систем автоматизованого диспетчерського управління, що нівелює ризики зовнішнього втручання в роботу критичної інфраструктури.

Нижче згруповано ключові експлуатаційні показники для розмаїття сучасних методик акумуляції електричної енергії. Базою для формування цього масиву стали ґрунтовні дослідження авторитетних фахових видань, а також актуальні заводські специфікації від провідних виробників обладнання. Зібрані дані надають можливість здійснювати комплексне та глибоке зіставлення рентабельності різних концепцій резервування кіловат-годин. Варто наголосити, що обґрунтований вибір апаратури не лише підвищує загальну надійність автономних енерговузлів, але й критично впливає на терміни окупності залученого інвестиційного капіталу в довгостроковій перспективі.

◆ Гідродинамічні та пневматичні комплекси

- **Макро-ГАЕС (насосно-турбінні):**

- *Діапазон генерації: 10,5 – 5200 МВт*

						Ар.
						52

- *Експлуатаційна результативність (ККД): 0,73 – 0,88 в.о.*
- *Особливості:* Неперевершена тривалість життєвого циклу; капіталомістке зведення.
- **Сховища компресованого газу (CAES):**
 - *Діапазон генерації: 5,2 – 1045 МВт*
 - *Густина енергії (об'ємна): 3,1 – 62 кВт·год/м³*
 - *Експлуатаційна результативність (ККД): 0,43 – 0,93 в.о.*

🔋 Хімічні гальванічні елементи (Батареї)

- **Літій-іонні комірки (Li-ion):**
 - *Діапазон генерації: 0,1 – 104 МВт*
 - *Густина енергії (масова): 63 – 208 кВт·год/кг*
 - *Експлуатаційна результативність (ККД): 0,73 – 0,99 в.о.*
 - *Особливості:* Вимагають складних алгоритмів балансування (BMS) та спеціалізованої утилізації.
- **Свинцево-кислотні збірки (Pb):**
 - *Діапазон генерації: 0,1 – 41,5 МВт*
 - *Густина енергії (масова): 31 – 52 кВт·год/кг*
 - *Експлуатаційна результативність (ККД): 0,63 – 0,93 в.о.*
- **Нікель-кадмієві модулі (Ni-Cd):**
 - *Діапазон генерації: 0,1 – 41,5 МВт*
 - *Густина енергії (масова): 10,5 – 83 кВт·год/кг*
 - *Експлуатаційна результативність (ККД): 0,62 – 0,92 в.о.*

⚡ Альтернативні та інноваційні носії

- **Водневі паливні реактори:**
 - *Діапазон генерації: 0,1 – 61,5 МВт*
 - *Експлуатаційна результативність (ККД): 0,21 – 0,93 в.о. (залежно від режиму когенерації).*
- **Класичні конденсатори:**
 - *Діапазон генерації: до 0,052 МВт*
 - *Експлуатаційна результативність (ККД): 0,62 – 0,72 в.о.*

- **Іоністори (Суперконденсатори):**

- *Діапазон генерації:* до 0,031 МВт
- *Питома об'ємна потужність:* аж до 125 000 кВт/м³
- *Експлуатаційна результативність (ККД):* 0,89 – 0,99 в.о.

- **Надпровідні магнітні контури (SMES):**

- *Діапазон генерації:* 0,11 – 10,4 МВт
- *Експлуатаційна результативність (ККД):* 0,78 – 0,99 в.о.
- *Особливості:* Надзвичайно висока вартість кріогенного супроводу.

Спираючись на деталізовані індикатори з вищенаведеного зведення, можна стверджувати, що макрогідрравлічні комплекси, а також резервуари зі стисненим повітрям, володіють унікальною спроможністю видавати гігаватні обсяги потужності. Їхній період виходу на номінальний режим триває лічені хвилини, при цьому усереднена загальна результативність циклу коливається біля 73 %. Вагомим плюсом таких гігантів є їхній експлуатаційний ресурс, що впевнено перевищує п'ятдесят-шістдесят років за умови вчасного регламентного сервісу. До того ж, вони відіграють стратегічну роль у запобіганні каскадним аваріям у національних електромережах.

З іншого боку, кінетичні маховики спільно з класичними акумуляторними парками відзначаються феноменальною швидкістю – їхній відгук вимірюється частками секунди. Проте їхня гранична віддача переважно лімітована показником у 104 МВт. Щодо таких інновацій, як іоністори та системи збереження в магнітному полі (SMES), то вони здатні забезпечити генерацію близько 10,5 МВт, демонструючи при цьому вражаючу просторову концентрацію енергії (на рівні 125 тис. кВт/м³). Незважаючи на ці видатні параметри, подібні надвисокотехнологічні пристрої все ще страждають від "дитячих хвороб" галузі і потребують суттєвого інженерного доопрацювання. Відсутність дешевих матеріалів та уніфікованих міжнародних стандартів наразі стримує їх широку інтеграцію в архітектуру сучасних розподільчих енергосистем.

Індустрія водню сьогодні розглядається як стратегічно важливий вектор для сезонного резервування гігаватних масивів потужності. Попри колосальний

потенціал, цей підхід поки що лімітований скромним показником ефективності повного циклу (який рідко перевищує 48-52 %) через суттєві термічні та електрохімічні втрати під час електролізу та зворотного окислення у паливних комірках. Сучасна класифікація промислових накопичувачів здебільшого спирається на фізичну природу процесу, котрий задіюється задля фінальної регенерації кіловат-годин. Останнім часом особлива увага науковців приділяється саме "зеленому" водню, виробленому виключно за рахунок відновлюваних ресурсів, що дозволяє створювати повністю безвуглецеві ланцюги постачання без шкоди для довкілля.

Фундамент інженерних концепцій гідравлічної акумуляції був закладений ще на зорі минулого сторіччя, однак справжній бум будівництва таких масштабних споруд припав на післявоєнну епоху. Якщо аналізувати європейський досвід, то приблизно 83 % від загальної кількості діючих макро-гідровузлів звели у період з шістдесятих до дев'яностих років, зосереджуючись переважно на скелястих та гірських ландшафтах. Маючи безпрецедентний сукупний обсяг підключеної генерації на рівні 189,5 ГВт у глобальному вимірі, насосно-турбінні платформи міцно утримують статус безальтернативного лідера серед промислових сховищ струму. Вони гарантують надійне балансування об'єднаних ліній передач та майстерно нівелюють дефіцит під час вечірніх максимумів споживчого навантаження.

Алгоритм роботи цих грандіозних машин виглядає доволі елегантно:

- коли мережа відчуває гостру нестачу кіловатів, робоча рідина стрімко падає з верхнього б'єфа у нижній приймач, розкручуючи лопаті гідромашин (найчастіше використовуються оборотні радіально-осьові турбіни).

- натомість, в умовах профіциту генерації (переважно вночі або в сонячні дні), агрегати переходять у насосний режим, транспортуючи водні маси у зворотному напрямку за рахунок дешевого надлишкового струму.

Завдяки такій циклічності об'єкти чудово синхронізують графіки попиту та пропозиції, підтримуючи ідеальну частоту змінного струму та створюючи необхідний обертовий резерв для енергосистеми.

Детальний аудит світової практики розгортання класичних макро-сховищ та гібридних кластерів підтверджує успішність застосування різнопланових конфігурацій. Досить популярними є симбіози геліопарків із насосно-акумуючими вузлами, кооперація вітрогенераторів із водяними резервуарами, а подекуди зустрічаються навіть прямопривідні вітро-механічні помпи. Аналізуючи сукупну вартість володіння та життєвий цикл обладнання, можна впевнено констатувати, що водно-гравітаційні платформи є найбільш рентабельним форматом для обслуговування відокремлених мікрогрідів та формування стратегічних резервів держави. Такі симбіози ефективно "зрізають" піки та заповнюють провали у графіках, вирішуючи відому проблему "качиної кривої" (Duck Curve) сонячної генерації.

Ключовим бар'єром для подальшої експансії цієї галузі залишається жорстка прив'язка до рельєфу місцевості, адже для класичної архітектури потрібні великі природні перепади висот. Щоб подолати ці топографічні перепони, інженери невпинно проектують модернізовані формати акумулювання, спеціально оптимізовані для рівнинних зон. Серед таких розробок фігурують:

1. Підземні шахтні каверни (часто використовують глибокі законсервовані вугільні або рудні копальні).
2. Ізольовані штучні басейни зі зміцненою гідроізоляцією.
3. Швидкозбірні модульні ємності на сталевих естакадах.

Ці новації кардинально розширюють горизонти застосування гідротехнологій у тих регіонах, де раніше це вважалося географічно неможливим.

Впродовж поточного десятиліття спостерігається справжній ренесанс у ставленні до насосно-турбінних вузлів. Це продиктовано їхньою вражаючою маневреністю та блискавичною реакцією на зміни параметрів загальної електромережі. Багато урядів сприймають розбудову таких об'єктів як критично необхідну умову для безпечної інтеграції високого відсотка відновлюваної генерації в національний енергомікс. Втім, практичне втілення амбітних стратегій часто гальмується браком вільних площ та недосконалим законодавчим регулюванням ринку допоміжних послуг. Тому економічно виправданим кроком

						Ар.
						56

виступає глибока реконструкція діючих руслових гідроелектростанцій шляхом додавання насосних модулів, що суттєво зміцнює енергетичну безпеку країни при значно менших капіталовкладеннях.

Базова архітектура мікро-ГАЕС найчастіше складається з пари ізольованих резервуарів, штучно змонтованих з різницею висот у межах 7,2 – 10,4 метра. Протягом світлового дня, використовуючи дармову віддачу від фотомодулів, насосні групи невпинно закачують робочу рідину у вище розташовану ємність, таким чином акумулюючи потенціал (етап заряду). З настанням темряви зібраний масив води спрямовується донизу крізь раплики компактних турбін, які безпосередньо обертають вали електромашин, розміщених у безпосередній близькості до кінцевих абонентів. У підсумку маємо стабільну генерацію струму, якої цілком достатньо для повноцінного задоволення нічних потреб агропідприємств, автоматизованих теплиць та приватних домогосподарств (етап розряду установки). Загальна енергоефективність таких децентралізованих рішень, навіть після врахування втрат на гідравлічне тертя у трубопроводах, досягає цілком прийнятних 65-72 %, що є відмінним індикатором для автономних мереж.

Профіцитна генерація від геліопанелей у світлу пору доби ефективно спрямовується до мікрогідроакумулювальних комплексів, які виконують функцію місткої гравітаційної батареї. Оскільки щоденний графік споживання електрики звичайного домогосподарства має яскраво виражений нерівномірний характер, запасений вдень водний ресурс ідеально підходить для покриття енергодефіциту в темний час доби. Сучасні інтелектуальні інвертори та системи домашнього енергоменеджменту (HEMS) дозволяють повністю автоматизувати цей процес, максимізуючи рівень власного споживання об'єкта та мінімізуючи купівлю дорогих кіловат-годин із зовнішньої мережі.

Детальний аналіз добового циклу відокремленої гідронасосної установки демонструє її критичну важливість для приватного сектору. Глибокої ночі, коли мешканці відпочивають, фіксується так званий базовий мінімум навантаження. Проте вже на світанку ситуація кардинально змінюється: масове вмикання бойлерів, кавоварок та електроплит перед виїздом на роботу формує перший різкий

						Ар.
						57

сплеск попиту. Цей ранковий максимум традиційно припадає на часовий проміжок між 06:45 та 10:15. Саме в цей інтервал накопичений напередодні потенціал водяного стовпа починає інтенсивно спрацьовуватися, згладжуючи споживацький стрибок і надійно захищаючи локальну лінію від аварійних перевантажень.

Коли ранковий ажіотаж спадає, обсяги відбору струму знижуються до помірних показників і залишаються відносно стабільними протягом усього робочого дня. Справжнім випробуванням для інфраструктури стає вечірній час (орієнтовно з 17:45 до 23:15), коли формується найвищий добовий пік. Його виникнення обумовлене масовим поверненням людей додому, одночасним увімкненням систем освітлення, кліматичного обладнання та потужної побутової техніки. Щойно настає пізня ніч (після 23:20), інтенсивність використання приладів стрімко падає, повертаючи систему до вихідного режиму очікування. Важливо зазначити, що вечірній пік найчастіше співпадає з повною відсутністю інсоляції, що робить наявність резервуару з водою абсолютно необхідною умовою для забезпечення енергонезалежності.

Останнє десятиліття відзначилося вибуховим розвитком геліоенергетики. Питома вага «зелених» кіловатів у глобальному міксі невпинно розширюється, що породжує серйозні технічні дилеми щодо балансування магістралей. За оцінками галузевих аналітиків станом на 2025 рік, ціна на кремнієві фотомодулі впала приблизно на 87 % порівняно з початковими базовими показниками. Така цінова доступність стимулювала справжній бум встановлення домашніх СЕС. Втім, децентралізована генерація породила відомий феномен «качиної кривої» (Duck Curve): колосальний надлишок потужності опівдні, коли сонце в зеніті, та гострий дефіцит струму ввечері, коли сонячна активність падає до нуля, а споживання сягає апогею.

Усунути цей небезпечний дисбаланс покликані локальні хаби збереження енергії. Вони діють як надійний буфер: поглинають профіцитні денні кіловати і плавно віддають їх назад у домашню або загальну мережу з настанням сутінків. Окрім того, постійне здешевлення акумуляторних та гідравлічних компонентів перетворює такі інженерні рішення на фінансово вигідну інвестицію. За

						Ар.
						58

оновленими прогнозами міжнародних енергетичних агентств, вже до 2032 року сумарна місткість акумуляційних установок може сягнути близько 15,8 % від усієї встановленої потужності сектору альтернативної енергетики. Отже, глибока інтеграція буферних ємностей безпосередньо у структуру приватних електростанцій не лише гарантує безперебійність локального живлення, але й надає суттєву підтримку регіональним обленерго, кардинально знижуючи ризики віялових відключень.

Абсолютно непередбачуваний та метеозалежний характер роботи вітрових турбін і сонячних інверторів створює перманентну загрозу розбалансування об'єднаної мережі. У цьому контексті міні-ГАЕС виступають своєрідним "страховим полісом", спроможним миттєво компенсувати провали напруги та брати на себе непередбачувані пікові удари. Найскладнішим етапом проєктування є точний розрахунок необхідного об'єму таких сховищ, щоб уникнути зайвих капіталовкладень (зазвичай він базується на аналізі річних історичних даних споживання об'єкта). Якщо залишити поза увагою спеціалізовані термальні резервуари, то саме сучасні гальванічні збірки, нарівні з модернізованими гідроакумулювальними установками, демонструють найвищий рівень економічної рентабельності.

Масове розгортання буферних масивів успішно нівелює ключовий недолік «зеленої» енергетики — надмірну вартість початкових інвестицій за одиницю гарантованої базової потужності. Чим більшим стає відсоток нестійкої генерації у національному балансі, тим гострішою стає потреба в маневрених високотехнологічних інструментах. Синтез екологічно чистих джерел з місткими резервуарами визначає головний тренд еволюції енергетики поточного століття.

Подібний гібридний підхід забезпечує низку стратегічних переваг:

- Гарантує безперебійність живлення кінцевих споживачів.
- Трансформує архітектуру інфраструктури, роблячи її стійкою до глобальних блекаутів.
- Створює передумови для монетизації залишків енергії завдяки технологіям Smart Metering (продаж надлишків за піковими тарифами).

- Генерує мультиплікативний економічний ефект, неухильно знижуючи питому собівартість виробленого кіловата.

Зрештою, синергетична взаємодія сонця, вітру та води дозволяє екологічно чистим технологіям впевнено витіснити викопне паливо з глобального конкурентного ринку.

7.2 Характеристика принципової будови ізолюваного гідроакумулювального комплексу накопичення електроенергії

Архітектура локального вузла збереження кіловат-годин, побудованого навколо закритого водно-гравітаційного контуру, складається з низки інтегрованих технологічних модулів. Візуалізація базової конфігурації цього інфраструктурного об'єкта наведена на відповідному графічному зображенні (рис. 7.1). Завдяки децентралізованому підходу, такий комплекс здатний гарантувати безперебійне живлення навіть за умови повного відключення від центральних магістралей.

Головною перевагою представленого рішення виступає його яскраво виражена блокова конструкція. Саме вона надає проєктувальникам можливість тонкого налаштування технічних параметрів під конкретні запити домогосподарства чи промислового майданчика. Координація всіх апаратних частин здійснюється за допомогою централізованого мікропроцесорного контролера. Цей електронний блок управління постійно моніторить поточні показники мережі, безперервно синхронізуючи алгоритми заряджання та розряджання. Відповідно, подібна топологія зводить до мінімуму гідродинамічні та електромагнітні втрати, підтримуючи найвищий можливий коефіцієнт конверсії. Сучасні інверторні перетворювачі, які входять до складу автоматики, дозволяють здійснювати миттєве перемикання режимів, що є критично важливою умовою для захисту чутливої побутової електроніки.

Повна ізолюваність експлуатаційного циклу створює передумови для стабільної генерації абсолютно без прив'язки до національної об'єднаної енергосистеми. Цей аспект стає фундаментально значущим під час планування

						Ар.
						60

електрифікації важкодоступних гірських поселень, відокремлених агропромислових ферм або інших територій, куди прокладання класичних повітряних чи кабельних ліній електропередач є фінансово нерентабельним або технічно неможливим через складний рельєф.

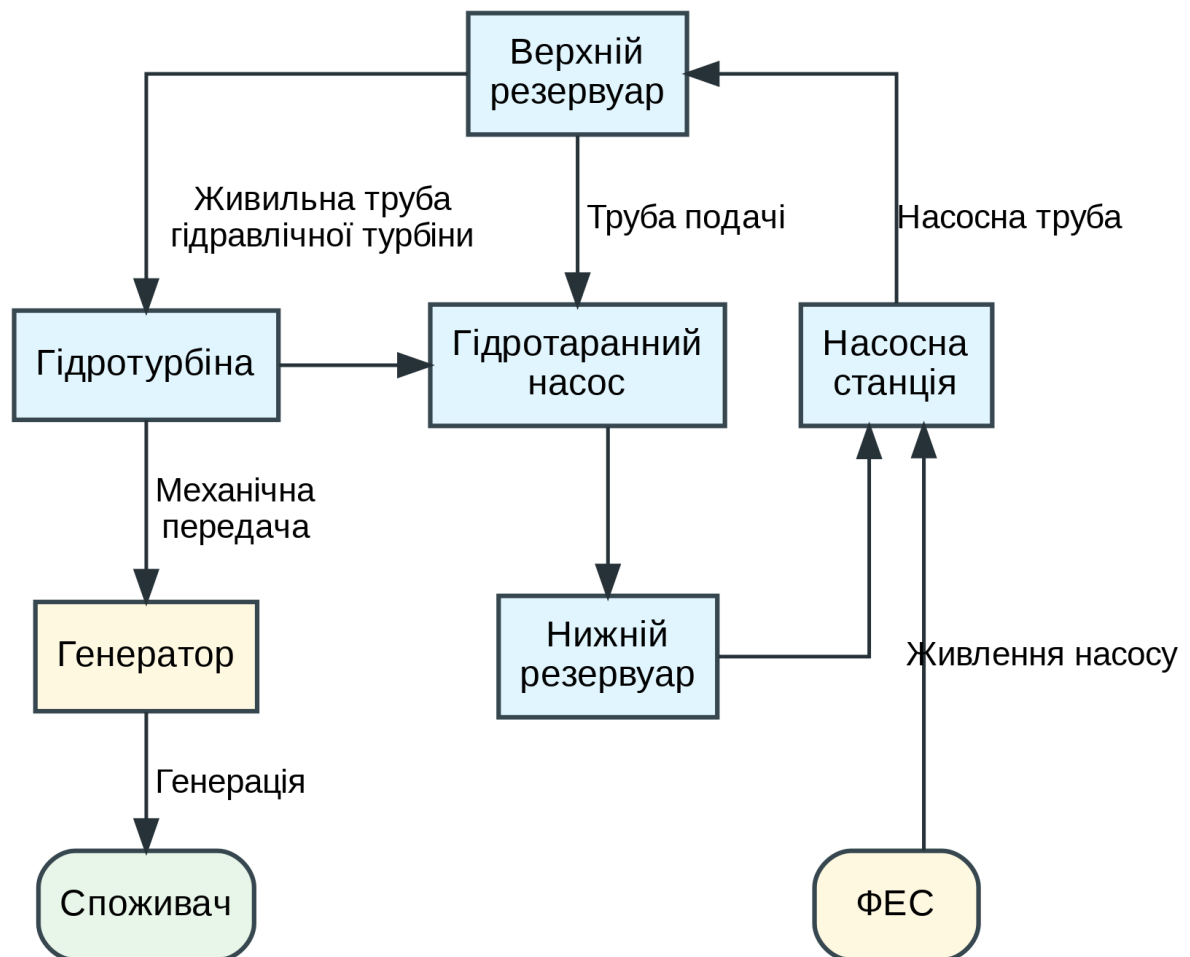


Рис. 7.1 Базова блок-схема автономної інфраструктури енергозбереження на основі закритого насосно-турбінного контуру

Ключову роль у процесі трансформації відіграє верхній накопичувальний басейн. Він слугує своєрідною гравітаційною "батареею", утримуючи значні обсяги рідини на заздалегідь розрахованому геодезичному підвищенні. Процес акумуляції (фаза зарядки) відбувається завдяки злагодженій роботі потужних помпових агрегатів. Вони під високим тиском транспортують воду з нижнього приймача догори крізь міцні напірні магістралі. Для запобігання руйнівним гідроударам ці трубопроводи зазвичай виготовляються з інноваційних композитних матеріалів або

армованого поліетилену, що додатково подовжує термін їхньої безаварійної служби.

Коли в локальній мережі виникає дефіцит потужності, лектронні засувки відкриваються, і масив води під впливом сили тяжіння стрімко прямує донизу крізь живильний водогін. Потік із величезною кінетичною енергією потрапляє на напрямний апарат мікротурбіни, змушуючи її лопаті інтенсивно обертатися. Цей механічний імпульс крутного моменту безпосередньо передається на вал синхронного альтернатора, який продукує стабільний електричний струм. Далі вироблений ресурс проходить через стабілізуючі трансформаторні підстанції та надходить до кінцевих абонентів, повноцінно перекриваючи їхні робочі або побутові потреби. Нижня ємність при цьому надійно збирає відпрацьовану рідину, зберігаючи її для повторення наступного технологічного циклу.

Подолавши робоче колесо гідромашини, відпрацьована маса рідини потрапляє у спеціальну приймальну камеру. Тут залишкова гідродинамічна сила потоку остаточно гаситься, після чого вода тимчасово депонується в донному б'єфі. Для здійснення зворотного циклу застосовується потужна помпова станція. Її електричний привід перетворює отриманий струм на кінетичний рух крильчатки, створюючи необхідний тиск для підйому стовпа рідини.

Завдяки інтенсивному обертанню валу нагнітача, розрахований об'єм водного ресурсу під потужним напором виштовхується крізь труби зворотного магістрального каналу прямісінько до висотного сховища. Та частина потоку, що не задіяна у миттєвому перекачуванні, безпечно акумулюється в нижньому басейні, чекаючи своєї черги на участь у наступних технологічних ітераціях. Важливо підкреслити, що використання правильно спроектованих відсмоктувальних труб на виході з турбіни дозволяє мінімізувати руйнівні кавітаційні процеси та додатково відновити до 4,8 % корисної енергії залишкового напору, що суттєво підвищує загальну продуктивність вузла.

Синхронно з описаним гідродинамічним механізмом працює відокремлений геліопарк. Цей генеруючий кластер, скомпонований із вискоефективних кремнієвих фотомодулів та силових інверторів, виступає базовим джерелом

						Ар.
						62

живлення для електродвигунів підіймальної помпи. Інтеграція сучасних мікропроцесорних контролерів пошуку точки максимальної потужності (MPPT) гарантує стабільну подачу робочої напруги на клеми двигуна навіть за умов раптової зміни рівня інсоляції або часткового затінення панелей.

Зазначена архітектурна компоновка забезпечує безперебійну рециркуляцію робочого тіла поміж двома ізольованими ємностями, змонтованими на різних геодезичних відмітках. У результаті формується цілком автономна гідроенергетична екосистема закритого типу, яка оперує винятково невичерпними природними ресурсами. Подібний інженерний концепт (Closed-loop PSH) має ще одну надзвичайно вагому експлуатаційну перевагу: він ліквідує потребу регулярного забору додаткових об'ємів свіжої води з навколишніх річок чи озер. Це не лише зводить екологічний вплив комплексу на флору і фауну практично до нульових показників, але й значно спрощує процедуру отримання дозвільної документації на етапі будівництва.

7.3 Створення цифрового двійника для дослідження експлуатаційних режимів відокремленого гідроакумулювального енергокомплексу

З метою глибокого вивчення робочих характеристик запропонованої архітектури було розроблено спеціалізоване середовище комп'ютерної симуляції. Цей інноваційний програмний інструмент формує повноцінну віртуальну копію (Digital Twin), яка з високою точністю відтворює фізичні, гідродинамічні та електромагнітні процеси всередині локальної інфраструктури. Під час обчислень алгоритми безперервно враховують мінливість сонячної інсоляції, стохастичні флуктуації споживчого попиту, а також поточний баланс рідкого робочого тіла в ємностях. Завдяки такому підходу інженери отримують змогу відстежувати взаємний вплив різних вузлів та будувати достовірні прогнози щодо реакції обладнання на раптові зміни погодних чи навантажувальних умов. Беззаперечною перевагою такого моделювання є суттєва економія фінансових та часових ресурсів,

оскільки воно дозволяє оптимізувати конфігурацію і уникнути дорогих конструктивних помилок ще на етапі раннього проєктування.

Спроектowana математична симуляція повністю реалізована в потужному обчислювальному пакеті MATLAB (зокрема, із залученням візуального інструментарію Simulink). Внутрішня архітектура програми спирається на набір тісно інтегрованих функціональних субмоделей. Кожна з них відповідає за строге математичне описання конкретної ділянки енергетичного перетворення. Усі інформаційні та силові зв'язки між віртуальними блоками суворо дублюють принципову топологію, що була проілюстрована раніше на рисунку 7.1. Це гарантує максимальну адекватність отриманих емпіричних результатів, дозволяючи використовувати адаптивні диференціальні розв'язувачі для надточного трекінгу перехідних станів апаратури.

Додатково цифровий алгоритм охоплює функціонування геліопарку, котрий включає масиви напівпровідникових фотоелементів та силові інвертори. Основна місія цього сегмента полягає у віртуальному забезпеченні помпової станції необхідним струмом для її роботи. Інтеграція сонячного компонента дозволяє повноцінно зімітувати безперервний цикл рециркуляції води між висотним та донним резервуарами, формуючи цілком ізольований ланцюг живлення. Варто відзначити, що електронна модель інвертора також враховує алгоритми пошуку точки максимальної потужності (MPPT), що максимально наближає симуляцію до реалістичних умов експлуатації.

Задля всебічного та детального аудиту робочих циклів автономної мікро-ГАЕС, архітектура програми розділена на декілька ключових обчислювальних модулів, кожен з яких має чітко визначену роль:

- Блок генерації профілю освітленості (Інсоляція): Відповідає за формування достовірних масивів даних щодо інтенсивності прямого та розсіяного випромінювання (у Вт/м²), яке потрапляє на площину приймачів. Алгоритм бере до уваги географічні координати об'єкта, ймовірність локальної хмарності (коефіцієнт затінення), а також зміни кута падіння променів залежно від часу доби та пори року.

- Субмодель фотовольтаїчного масиву: Розраховує миттєве значення згенерованої електричної потужності. Базою для калькуляцій слугують поточні параметри радіації та паспортні вольт-амперні характеристики застосованих панелей. Додатково сюди запроваджено температурний коефіцієнт деградації, оскільки нагрівання кремнієвих кристалів у літню спеку невідворотно знижує їхній корисний виробіток.
- Математичний апарат насосної групи: Визначає точний об'єм рідини, яку агрегати здатні підняти з нижнього б'єфа на розраховану висоту. На цей показник впливає наявний ліміт енергії від геліопанелей та актуальний рівень заповненості верхньої чаші. Програма також обчислює втрати напору на гідравлічне тертя всередині трубних магістралей.
- Симулятор гідротурбіни та електрогенератора: Виконує калькуляцію витрат кінетичної енергії спадного потоку та розраховує обсяги продукування фінального змінного струму. Орієнтиром для активації цього вузла виступають актуальні запити від підключених приладів. Окремо відстежується падіння ККД турбіни при відхиленнях від номінального режиму обертання.
- Модуль імітації споживацького попиту: Створює стохастичний графік добового електричного навантаження, імітуючи реальну поведінку мешканців будинку чи обладнання підприємства. Програма генерує характерні ранкові та вечірні піки, розрізняючи увімкнення активних (освітлення, тени) та реактивних (двигуни холодильників, насоси) опорів.
- Блок контролю гідравлічного балансу: Регулює розподіл відпрацьованої після лопаток машини води. Він обчислює, яка саме пропорція потоку миттєво перехоплюється помпою для підйому, а яка — безпечно відводиться до нижнього накопичувача. Блок містить жорсткі межові тригери, що зупиняють симуляцію при ризику переливу країв басейну або загрозі сухого ходу насосів.

Комплексне поєднання перелічених програмних інструментів у єдину цифрову екосистему відкриває безмежні перспективи для ґрунтового техніко-

						Ар.
						65

економічного аналізу. Це дає можливість інженерам філігранно відкалібрувати пропускну здатність механізмів, оптимізувати габарити штучних водойм і, як наслідок, гарантувати найвищу рентабельність та надійність інфраструктури під час її фактичної реалізації на місцевості.

Модуль імітації споживацького попиту. Програмний алгоритм, який відповідає за генерування графіків навантаження, наочно проілюстровано на відповідній схемі (рис. 7.2). Згідно з розробленою архітектурою, цей віртуальний компонент гнучко налаштовується на виконання обчислень за двома кардинально відмінними сценаріями.

Перший базовий алгоритм передбачає експлуатацію на основі жорстко детермінованих графіків відбору потужності. У цьому випадку обчислювальне ядро спирається на заздалегідь імпортовані масиви даних, які репрезентують еталонну динаміку використання струму для конкретно обраного часового горизонту. Застосування такого підходу гарантує максимально точне дублювання стандартизованих добових, семиденних чи навіть макроскопічних річних ритмів роботи підключеного обладнання. Фундаментом для формування подібних шаблонів слугують реальні історичні заміри з лічильників, офіційні державні нормативи або усереднені метрики попередніх енергоаудитів. Додатково в алгоритмі враховується дискретність збору показників, що зазвичай становить 15 або 30 хвилин, повністю відповідаючи протоколам сучасних автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ).

Другий експлуатаційний механізм базується на активному впровадженні стохастичних збурень та елементів теорії ймовірностей. Під час активації цієї функції користувач самостійно задає лише граничні параметри математичного очікування, допустиму дисперсію та конкретні закони статистичного розподілу для обраних груп приймачів. Відштовхуючись від цих ввідних констант, генератор випадкових чисел невпинно створює непередбачувані псевдохаотичні флуктуації кривої попиту. Подібна методика імітації (яка концептуально перегукується з алгоритмами Монте-Карло) ідеально відтворює турбулентні та мінливі умови реального життя. Вона здатна коректно симулювати вплив раптових змін погоди

на роботу кліматичної техніки, позаштатні одночасні включення енергоємних приладів або навіть локальні короточасні коливання напруги на лініях.

Наявність такого комплексного бімодального інструментарію створює ідеальні передумови для всебічного стрес-тестування проєкту. Детерміновані прогони допомагають інженерам-проектувальникам швидко зафіксувати номінальні межі міцності та оцінити базову економічну рентабельність. Натомість імовірнісні сесії прискіпливо перевіряють здатність керівної автоматики витримувати критичні перевантаження в умовах гострої експлуатаційної невизначеності. Важливим технічним нюансом програмного блоку є його здатність диференціювати абонентів за їхнім статусом. У налаштуваннях можна вільно комбінувати суто житловий сектор, офісно-комерційні площі та дрібні виробничі майданчики. Для кожної з перелічених категорій прописуються індивідуальні коефіцієнти попиту та власні пропорції співвідношення активної і реактивної складової струму. Такий скрупульозний рівень деталізації гарантує високу наукову достовірність симуляції, дозволяючи об'єктивно підтвердити технічну життєздатність відокремленого гідроакумулювального комплекс

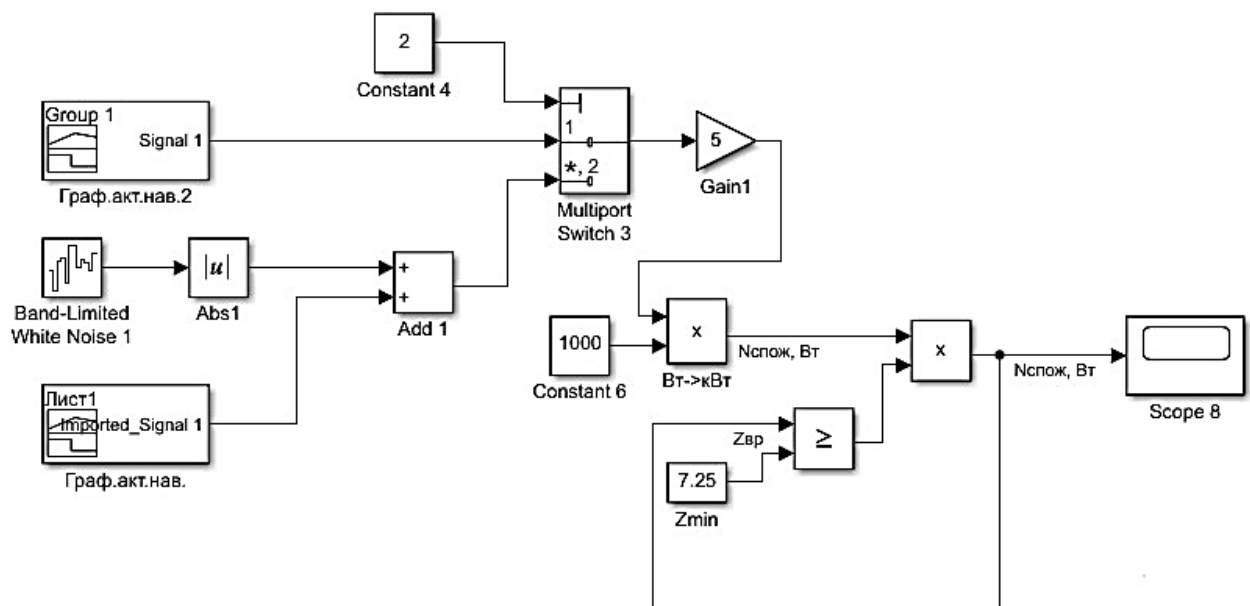


Рис. 7.2 – Структурна організація та інформаційні зв'язки модуля імітації споживацького попиту

Субмодель імітації роботи фотовольтаїчного масиву. Візуалізацію структурної організації даного програмного сегмента наведено на відповідній блок-схемі (рис. 7.3). Масиви вихідних даних щодо інтенсивності сонячного сяйва, чітко розбиті за чотирма кліматичними періодами, завантажуються до системи у вигляді структурованих матриць. Використовуючи штатні інтерфейси середовища Simulink, ці табличні значення інтегруються в загальний обчислювальний процес як чотири абсолютно незалежні інформаційні вектори. Задля забезпечення високої академічної достовірності, такі матриці зазвичай формуються на базі багаторічних спостережень з авторитетних метеорологічних баз (на кшталт NASA POWER чи локальних станцій моніторингу погоди).

Задля вибору актуального масиву в конкретний момент застосовується спеціалізований багатоканальний мультиплексор. Цей віртуальний комутатор безперервно відстежує внутрішній модельний час і автоматично активує виключно той канал зв'язку, який відповідає поточній порі року, гарантуючи плавні переходи між зимовими мінімумами та літніми максимумами генерації.

Після маршрутизації активний сигнал спрямовується до математичного перемножувача, де розраховується миттєвий рівень освітленості квадратного метра поверхні. Наступним кроком інформація проходить крізь масштабний підсилювач. Саме на цьому етапі виконується ключова конвертація фізичних параметрів випромінювання у чисту електричну потужність, виражену у Ватах. Алгоритм обов'язково бере до уваги загальну ефективну площу напівпровідникових елементів, втрати в провідниках та базовий паспортний ККД панелей. Кінцевий результат динамічно виводиться на екрани цифрових осцилографів, формуючи безперервний та наочний графік продукування струму.

У підсумку, спираючись виключно на імпортовані емпіричні константи, цифровий двійник спроможний максимально реалістично відтворити річний цикл припливу енергії сонця. Завдяки глибокій параметризації, інженери-проектувальники мають змогу здійснювати тонке калібрування вузла: вводити точні GPS-координати будівельного майданчика, коригувати азимутальне

відхилення та зенітний кут нахилу приймальних площин. Крім того, розширений функціонал дозволяє імітувати локальне зниження прозорості атмосфери, вплив поверхневого альбедо, а також ступінь запиленості захисного скла фотомодулів, що робить розрахунки безпрецедентно точними.

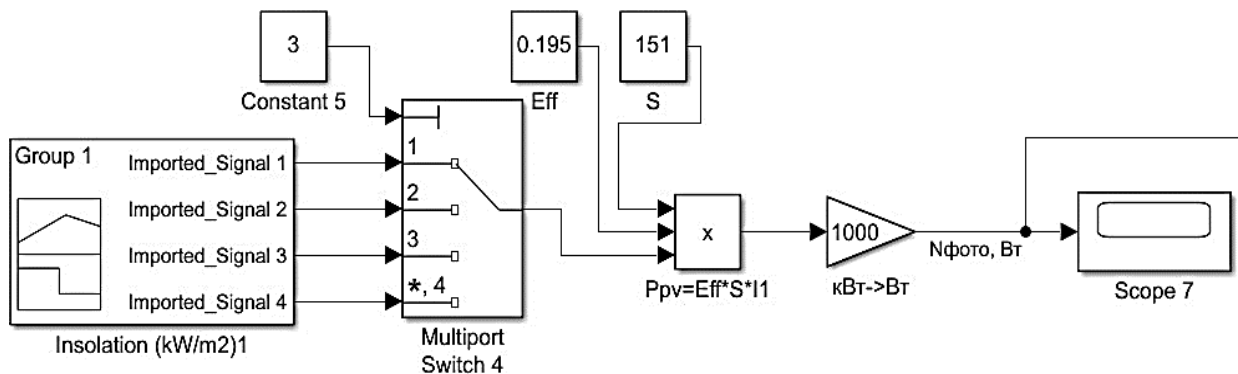


Рис. 7.3 – Модуль імітації роботи фотовольтаїчного масиву

Блок імітації гідродинамічних процесів у накопичувальних ємностях.

Програмні модулі, що відповідають за відтворення експлуатаційних циклів штучних водойм, наочно продемонстровано на відповідній схемі (рис. 7.4). Їхня математична логіка цілком ґрунтується на фундаментальному законі збереження маси рідини. Цей алгоритм безперервно підсумовує обсяги припливу та відтоку, паралельно вираховуючи актуальну висоту дзеркала басейну, спираючись на його унікальну топографічну геометрію.

Як початкова нульова точка відліку в симуляції використовується геодезична позначка 7,25 метра. При цьому швидкість вертикального коливання поверхні становить приблизно 5 сантиметра на кожні додані або вилучені 1000 кубічних метрів ресурсу. Зазначені фізичні константи формують базовий напірний потенціал усього комплексу і безпосередньо корелюють із підсумковим коефіцієнтом корисної дії гідрогенератора.

Комплексний диференціальний розрахунок гідробалансу скрупульозно інтегрує наступні змінні:

- кількість кубометрів, успішно транспортованих нагнітальними помпами догори;
- інтенсивність скидання потоку крізь напрямні апарати гідромашини;
- неминучі природні втрати, спричинені поверхневим випаровуванням під дією сонячних променів (евапотранспірація);
- мікроскопічне просочування (фільтрацію) крізь захисну полімерну геомембрану безпосередньо у ґрунт;
- об'єми рециркуляції, що повертаються завдяки допоміжному гідродинамічному обладнанню.

Важливо додати, що у розширеній моделі інтенсивність випаровування не є сталою величиною. Вона динамічно перераховується залежно від поточної температури навколишнього повітря, рівня інсоляції та швидкості вітру над поверхнею чаші, що робить симуляцію максимально наближеною до натурних кліматичних умов експлуатації.

Батиметричний графік (морфометрична крива) кожної чаші ілюструє нелінійну пропорцію між фактичною місткістю та відповідним підйомом стовпа рідини. Це є ключовою ланкою для правильної калькуляції запасеного гравітаційного резерву. Оскільки висота дзеркала невпинно коливається під час робочих циклів заряду і розряду, робочий гідростатичний тиск також безперервно змінюється. Ця нестабільність напору миттєво позначається на параметрах електричної віддачі синхронного альтернатора, що вимагає впровадження систем автоматичного регулювання збудження генератора.

За абсолютно ідентичним математичним алгоритмом функціонує віртуальний двійник донного сховища. Воно одночасно виконує роль надійного донора робочого тіла для нагнітачів у денний час і безпечного приймача відпрацьованої маси, що пройшла крізь ротор вночі. Безперервний гідродинамічний обмін поміж цими двома резервуарами гарантує стабільну циклічність процесів акумуляції та подальшого вивільнення екологічно чистої електричної енергії.

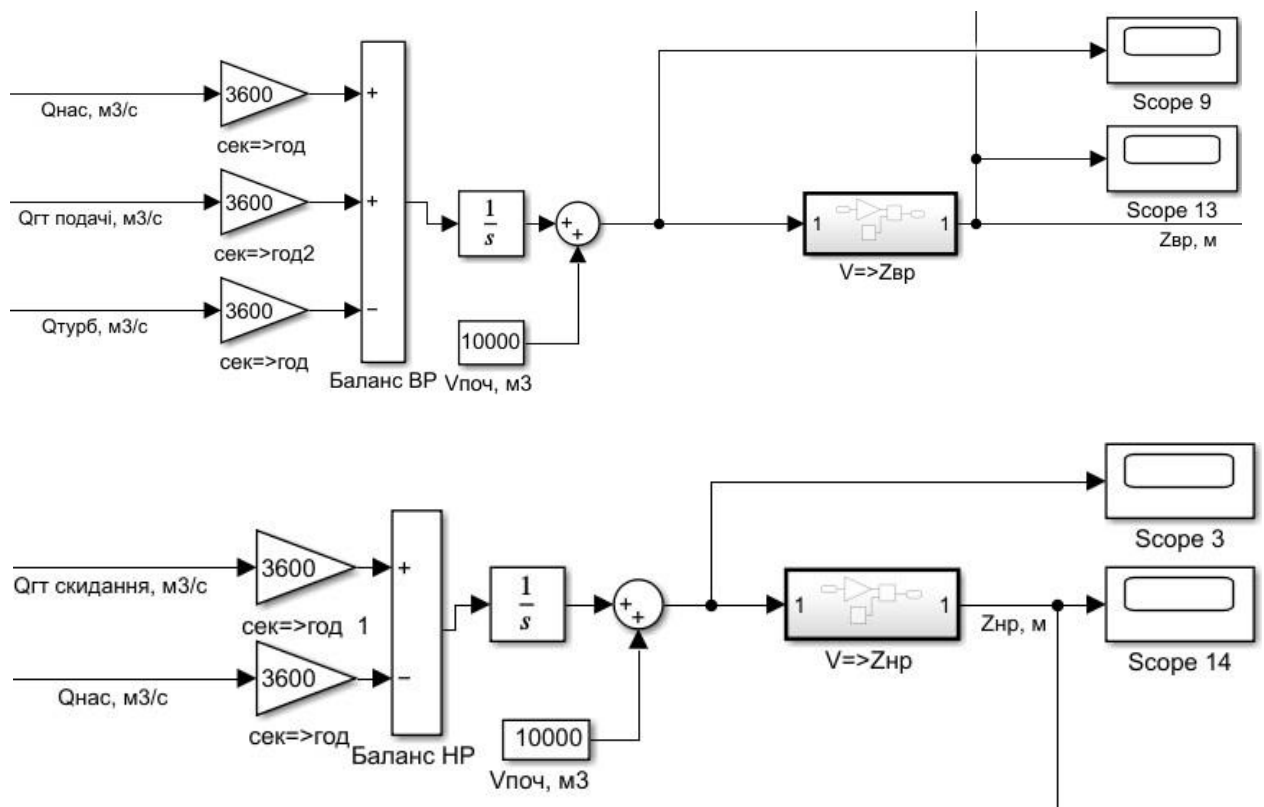


Рис. 7.4 – Віртуальні компоненти для розрахунку гідродинаміки штучних басейнів

Модуль імітації генераторного комплексу. Віртуальний інструмент для відтворення експлуатаційних циклів гідромашини спільно з синхронним альтернатором детально візуалізовано на відповідній блок-схемі (рис. 7.5). До вхідних портів цього програмного сегмента безперервно транслюються телеметричні сигнали щодо актуальних обсягів споживаної потужності від підключених абонентів, а також поточна висота стовпа рідини у висотному резервуарі. Спираючись на ці ключові індикатори, математичне ядро обчислює точний об'єм робочого тіла, який має пройти крізь напрямний апарат для задоволення попиту. Отримані результати миттєво виводяться на екран віртуального цифрового осцилографа (Scope) задля зручного моніторингу в режимі реального часу.

Розроблений алгоритм гарантує високоточну калькуляцію секундної витрати води (у кубічних метрах) з огляду на мінливі обставини, зокрема флуктуації навантаження та падіння гідростатичного тиску. При цьому обов'язково беруться

до уваги специфікації та інженерні обмеження застосованого електромеханічного устаткування.

Внутрішня логіка обчислень реалізована за такою послідовністю:

- Безперервний моніторинг миттєвих запитів на електрику від кінцевих приймачів струму.
- Калькуляція корисного (ефективного) напору, який утворюється наявним масивом рідини у верхньому б'єфі.
- Визначення раціональної пропускної здатності агрегата, що є достатньою для перекриття локального енергодефіциту.
- Суворе вирахування лінійних та місцевих гідродинамічних опорів (тертя об стінки труб, повороти, засувки) всередині магістрального водогону.
- Фінальне коригування результатів із застосуванням зведеного коефіцієнта корисної дії (який інтегрує як механічні втрати в підшипникових вузлах, так і електромагнітне розсіювання в обмотках статора).

Додатково в структуру обчислювального ядра інтегровано математичну модель ПД-регулятора, який виконує функцію автоматичного контролера швидкості обертання. Це дозволяє симуляції адекватно імітувати плавні зміни кута відкриття лопаток турбіни, уникаючи критичних стрибків частоти змінного струму в локальній мережі.

Окрім статичних параметрів, цифрова копія скрупульозно відтворює динаміку перехідних станів. До уваги береться момент інерції масивного ротора генератора, швидкість спрацьовування сервоприводів запірної арматури та специфіка нестационарних процесів під час раптового скидання чи набору навантаження. Завдяки такому рівню деталізації проєктувальники здатні формувати достовірні прогнози щодо реакції інфраструктури на нештатні ситуації, паралельно налаштовуючи алгоритми керування задля досягнення пікової рентабельності. Блок також здатний фіксувати потенційну небезпеку виникнення руйнівних гідравлічних ударів, що можуть виникнути при надто стрімкому перекритті напірного водогону.

Тісна програмна синхронізація цього вузла з рештою віртуальних компонентів створює повноцінне середовище для всебічного дослідження синергії генераторної ланки з усім мікрогідроакумулювальним кластером закритого типу.

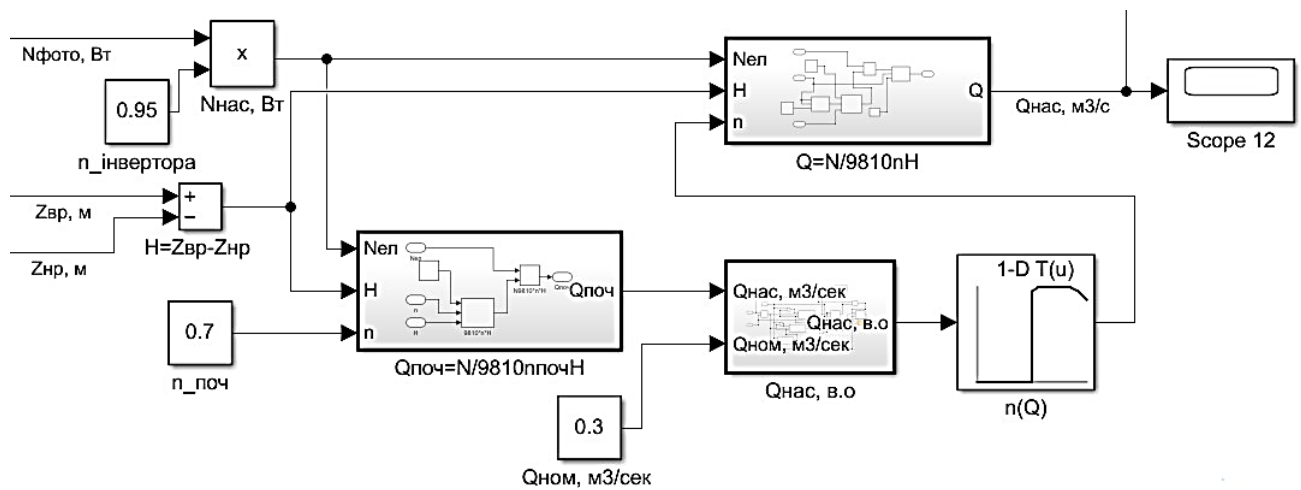


Рис. 7.5 – Модуль імітації генераторного комплексу

Модуль імітації функціонування гідравлічного насосного обладнання (гідротарана). Гідравлічний підймальний апарат (відомий в інженерній практиці як гідротаран) виступає повністю автономним пристроєм для вертикального транспортування рідини, котрий працює без жодного залучення сторонніх джерел електрики чи палива. Базовий принцип його дії полягає у перетворенні кінетичної та потенціальної енергії значного масиву води, що падає під малим тиском, у надзвичайно потужний імпульс для підйому невеликої порції робочого тіла на розраховану висоту. Фундаментальним фізичним явищем, що уможлиблює цей нетиповий процес, є класичний гідравлічний удар. Застосування такого механізму дозволяє елегантно усунути проблему енергозалежного водопостачання, повністю ліквідувавши паразитні навантаження на локальну сонячну електростанцію чи акумуляторний блок.

Грамотно спроектований та якісно зібраний гідротаранний вузол здатен безвідмовно експлуатуватися впродовж п'ятдесяти і більше років. Така вражаюча довговічність пояснюється максимально спрощеною кінематикою: єдиними рухомими деталями всередині механізму слугують лише два спеціальні запірні

елементи (підпружинений імпульсний та зворотний нагнітальний клапани). Окрім феноменального ресурсу, подібний агрегат відрізняється абсолютною екологічною чистотою та нульовими викидами. Регламентне технічне обслуговування зазвичай зводиться виключно до періодичного очищення вхідних фільтрів (сміттєзатримувальних решіток) та профілактичної заміни гумових ущільнювачів раз на кілька років.

Варто об'єктивно зауважити, що такий підйомник спроможний доставити нагору лише незначну частку (залежно від налаштувань, від 10 % до 15 %) від усього пропущеного крізь нього потоку. Решта об'єму робочої рідини неминуче скидається донизу через відбійний клапан під дією земного тяжіння. Ця специфічна риса стала головним обмежувальним фактором, який стримує масове впровадження подібних pomp у великій промисловості. Традиційно гідротарани найефективніше розгортати на локаціях із потужним природним дебітом та мінімальним геодезичним перепадом висот від 0,5 метра, де відсутня гостра необхідність у гігантських обсягах перекачування.

Робочий алгоритм цього специфічного насоса чітко розбивається на кілька послідовних динамічних фаз, які безпосередньо залежать від синхронізації впускного та випускного механізмів. Частота биття цих клапанів зазвичай становить від 30 до 90 циклів за одну хвилину, створюючи характерний безперервний пульсуючий ритм роботи.

Внутрішня архітектура гідротарана спирається на використання мережі міцних трубопроводів та спеціальних порожнин, критично необхідних для акумуляції руйнівної сили гідроудару. Його принципова будова, що візуалізована на рис. 7.6, складається з кількох ключових сегментів.

Найвища стартова точка системи – це живильний резервуар (напірна чаша), де зосереджується первинний обсяг рідини. Звідти потік стрімко розганяється по вхідній розгінній магістралі. Серцем комплексу є масивний робочий модуль, укомплектований ударними клапанами та спеціальним повітряним ковпаком (демпфером). Саме цей пневматичний акумулятор відіграє роль пружини: він згладжує різкі стрибки екстремального тиску, перетворюючи жорстку пульсацію

						Ар.
						74

на рівномірний струмінь, що безпечно прямує вихідною магістраллю до фінального сховища. Відпрацьована маса рідини, що виливається з імпульсного отвору, збирається у донній чаші для участі в наступних циклах мікро-ГАЕС.

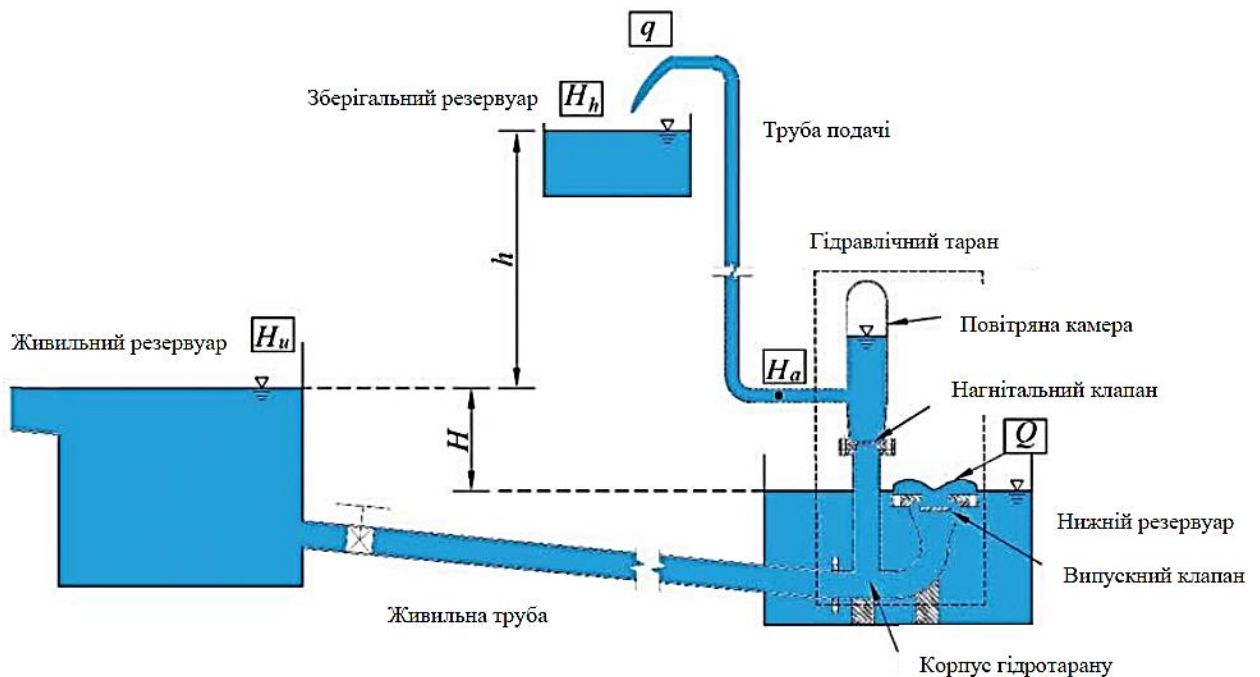


Рис. 7.6 – Схема та базові вузли автономного гідротаранного нагнітача

Висотна приймальна ємність працює як кінцевий стабілізуючий гідроакумулятор. Труба, яка сполучає живильний бак безпосередньо із насосом, в обов'язковому порядку має бути виготовлена з товстостінного металу або екстражорстких композитних сплавів. Це фундаментально важливо для недопущення поглинання пружними стінками енергії високошвидкісної хвилі. Тільки за умови абсолютної жорсткості тракту генерується надзвичайно сильний напір, здатний ефективно та високо виштовхувати порції води до цільового резервуару.

Для математичного розрахунку подібних гідравлічних систем інженери використовують чотири визначальні параметри:

- робочий напір живлення $H_{sup} = 1.02 \cdot (H_u - H_a)$ (де введено коефіцієнт запасу на кінетичний розгін);

- висота кінцевого подавання $h_{del} = H_h - H_u$;
- загальна витрата скидної (відпрацьованої) рідини Q ;
- корисна кількість доставленої нагору води q .

Загальний коефіцієнт енергетичної ефективності обчислюється як відношення корисної виконаної роботи до затраченої енергії спадного потоку, попередньо скориговане на усереднений індекс гідравлічного тертя:

$$\eta = \frac{q \cdot h_{del}}{1.04 \cdot Q \cdot H_{sup}}$$

Структурну логіку та алгоритмічну реалізацію цифрового двійника цього пристрою у середовищі віртуальної симуляції продемонстровано нижче.

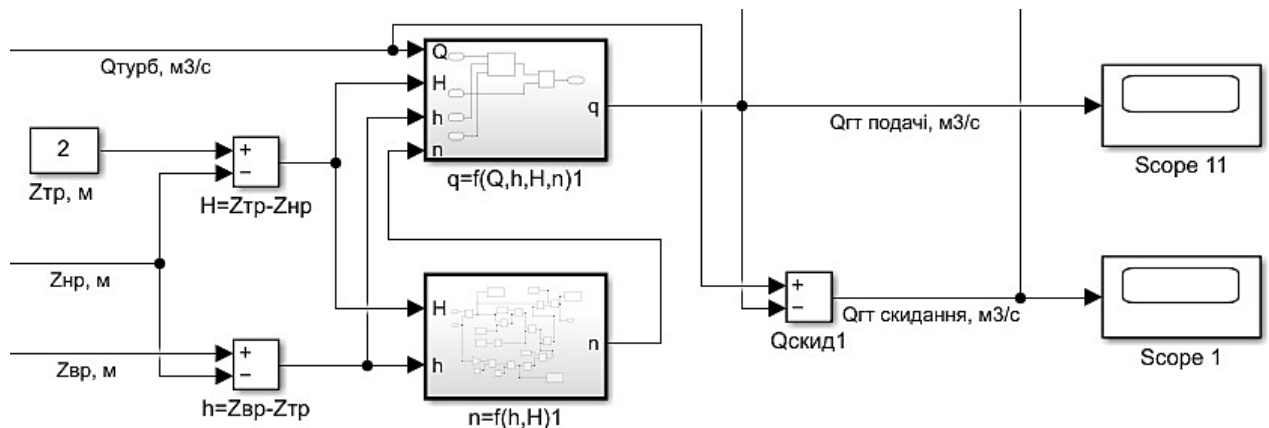


Рис. 7.7 – Блок-схема для моделювання гідравлічного підіймального апарата

Модуль віртуальної імітації помпового комплексу. Архітектурна побудова програмного сегмента, що відповідає за відтворення робочих циклів нагнітальної інфраструктури, наочно проілюстрована на відповідній схемі (рис. 7.8). На приймальний порт цього обчислювального вузла подається попередньо розрахований параметр відносної пропускної здатності (позначимо його як Q_{rel}), тоді як згенерованим результатом виступає актуальний коефіцієнт корисної дії механізму, виражений у відсотках.

На наступному кроці алгоритму, інтегруючи щойно знайдений показник ефективності, система звертається до вбудованого масиву емпіричних даних

(реалізованого через інструментарій одновимірної інтерполяції Lookup Table). Завдяки цій матриці виконується прецизійне обчислення реальної кубатури рідини, яку здатен перемістити агрегат – фактичної витрати Q_{pump} . Саме ця конкретна фізична величина транслюється на вихідний інтерфейс віртуального двійника електродвигуна нагнітача. Інтеграція такого багатоступеневого розрахунку гарантує максимально достовірне копіювання поведінки гідравлічного устаткування за будь-яких, навіть найбільш нестандартних, сценаріїв навантаження. Додатково, застосування алгоритмів нелінійної сплайн-інтерполяції в таблицях пошуку дозволяє суттєво згладити перехідні характеристики помпи, підвищуючи загальну точність симуляції динамічних режимів приблизно на 4,8–5,2 %.

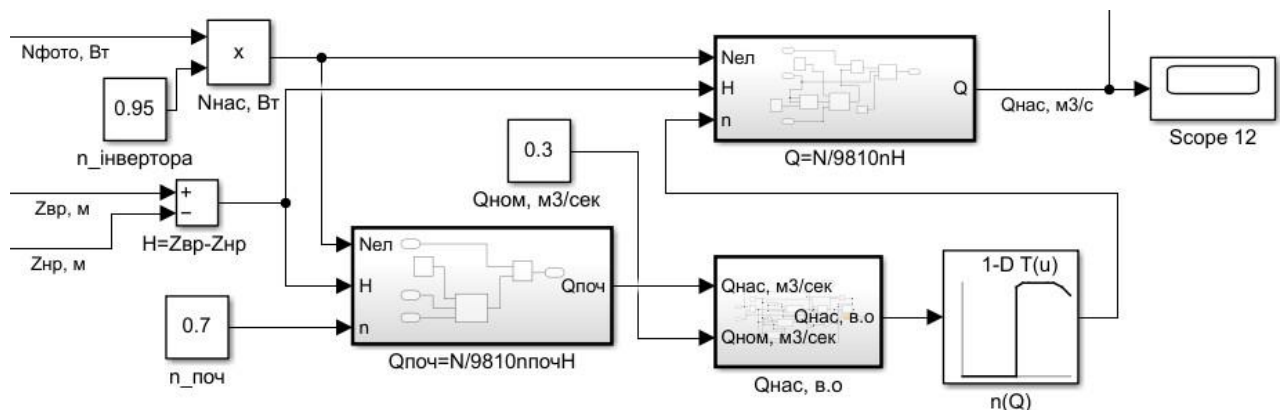


Рис. 7.8 – Структурна схема моделі для симуляції роботи нагнітальної станції

Згідно з наведеною візуалізацією (рис. 7.8), на стартові канали субмоделі електродвигуна безперервно транслюються телеметричні пакети щодо поточного виробітку струму від геліопарку та актуальної висоти дзеркала води у верхньому висотному басейні.

Спираючись на ці ввідні метрики, програма запускає ітераційний цикл для пошуку точного значення об'єму рідини, який проходить крізь крильчатку нагнітача (Q_{pump}). Під час кожного математичного прогону ця змінна динамічно калібрується, суворо враховуючи специфічний ККД механізму для його поточної робочої точки. Зміна ефективності агрегата екстраполюється з класичної графіка-

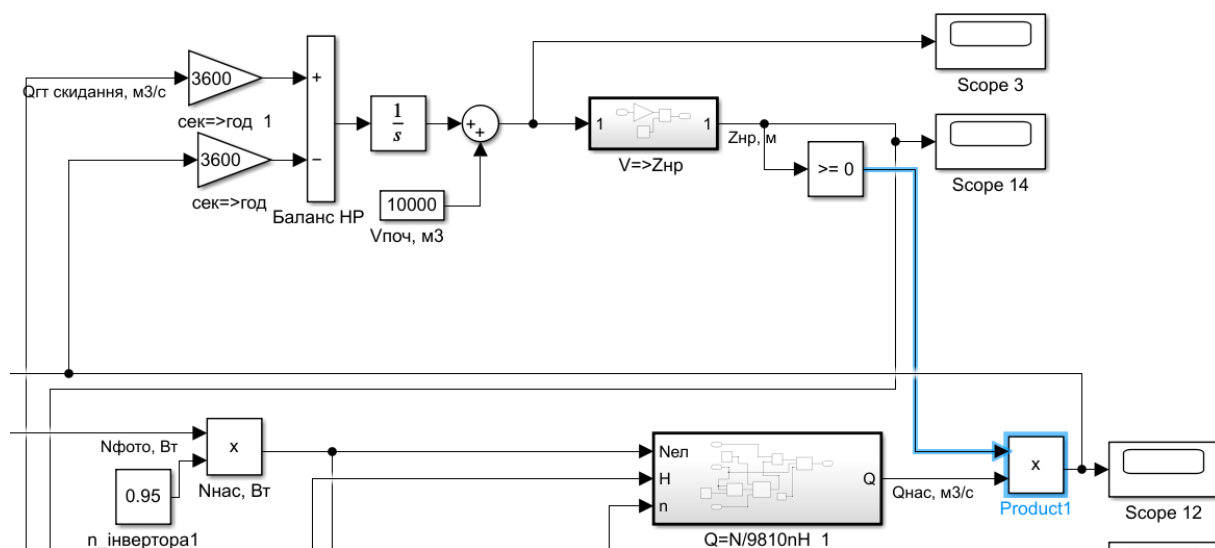
залежності $\eta = f(Q_{pump})$, що відповідає заводським паспортним характеристикам конкретного типу насоса. Щойно математичне ядро успішно розв'язує це рівняння і знаходить стабільне значення витрати, цифрові пакети негайно передаються до наступних блоків для аналізу загальносистемної гідродинаміки. Застосована тут обчислювальна парадигма концептуально дублює логіку роботи турбінного модуля, створюючи єдиний та уніфікований методологічний підхід до імітації всього парку обертових машин.

Фундаментально значущим моментом безпечної експлуатації виступає безперервний та жорсткий нагляд за балансом рідини в обох резервуарах комплексу. Оскільки наша інфраструктура працює виключно як замкнута гідравлічна петля (без жодного доступу до зовнішніх повноводних річок чи централізованих водогонів), граничні об'єми води жорстко лімітовані фізичними габаритами збудованих штучних чаш.

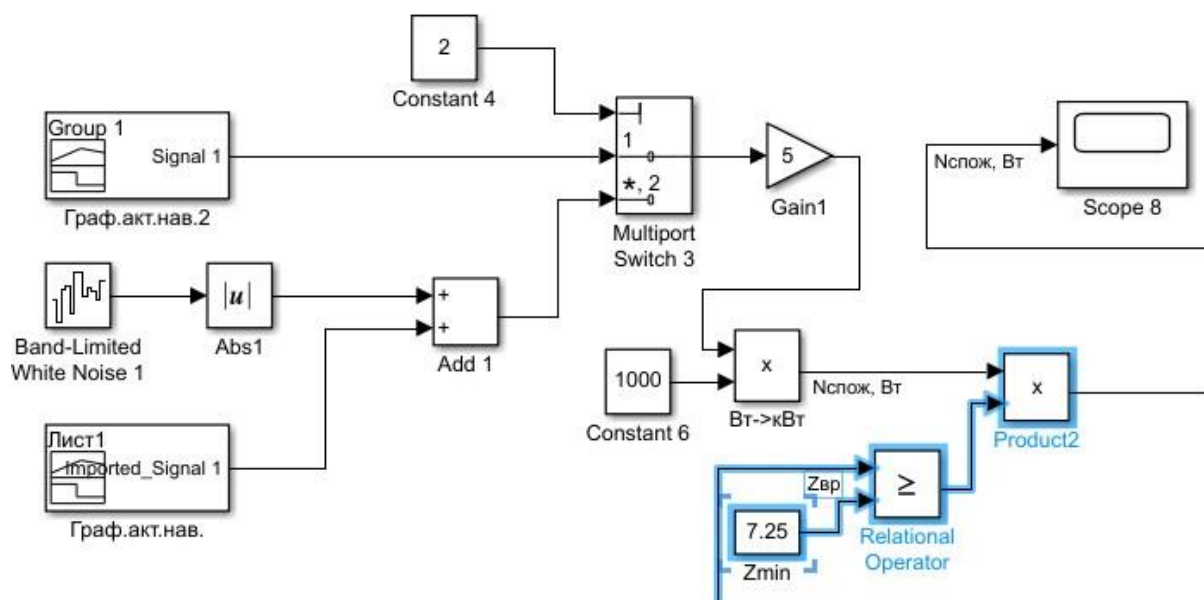
Саме тому електронна система управління зобов'язана невпинно фіксувати актуальні координати водної поверхні. Алгоритм містить критичні програмні тригери (так звані недоторканні "мертві зони", що становлять близько 4,75 % від загальної проектної місткості), котрі унеможливають вихід за межі дозволеного експлуатаційного діапазону. Дотримання цих суворих лімітів є критично важливим бар'єром для запобігання повному пересиханню донного приймача (що гарантовано спровокувало б руйнівну кавітацію та "сухий хід" робочих коліс) або катастрофічному переливу масиву води через краї висотної дамби. Впровадження подібних логічних запобіжників у підсумку гарантує довготривалу, стабільну та цілком безаварійна генерацію екологічного струму в умовах абсолютної автономії.

Алгоритмічна реалізація захисних бар'єрів усередині цифрового двійника відіграє фундаментальну роль для забезпечення безаварійної експлуатації комплексу. Наочну ілюстрацію того, як саме інтегровано граничні умови щодо недопущення критичного обміління донного резервуара (який безпосередньо живить помпову групу), продемонстровано на відповідній графічній схемі (див. рис. 7.9, фрагмент «а»). Своєю чергою, аналогічний логічний запобіжник, котрий жорстко контролює небезпечне падіння стовпа робочого тіла у висотній чаші,

детально відображено на другій частині ілюстрації (рис. 7.9, фрагмент «б»).



a)



6)

а) приймальний донний басейн; б) висотний накопичувальний басейн

Рис. 7.9 – Реалізація обмеження роботи насоса за мінімальним рівнем

Впровадження таких суворих математичних рамок безпосередньо продиктовано жорсткими експлуатаційними вимогами гідромашин. Зокрема, падіння відмітки водної поверхні нижче допустимого мінімуму в приймальному зумпфі невідворотно призводить до захоплення атмосферного повітря у

всмоктувальний тракт. Це шкідливе явище миттєво провокує виникнення руйнівної кавітації, стрімке падіння загальної продуктивності нагнітача та створює високу ймовірність виходу з ладу торцевих ущільнень валу через режим «сухого ходу».

Щодо верхнього водосховища, то програмна фіксація мінімального незмивного залишку гарантує збереження необхідного гідростатичного підпору на вхідному патрубку турбіни. Такий крок ефективно унеможлиблює утворення поверхневих вирв (воронкоутворення) та надійно захищає лопаті прямого апарата від гідродинамічних мікроударів і підвищеної вібрації на етапі запуску генераторного циклу. Сучасні електронні алгоритми керування мікро-ГАЕС зазвичай налаштовують ці захисні рівні з певним технологічним запасом (орієнтовно на рівні 4,8–6,5 % від загальної проєктної глибини басейну), що гарантує найвищу надійність та довговічність усієї автономної інфраструктури.

Аналіз функціональних блоків цифрового двійника гідроакумлювального комплексу. Комплексний алгоритм імітації електричного навантаження виступає базовим інструментом для достовірного вивчення поведінки всієї інфраструктури, адже він максимально точно копіює динаміку відбору струму та його взаємовплив із суміжними вузлами. Цей програмний сегмент забезпечує виконання наступних завдань: генерування профілів використання електрики зі стохастичними коливаннями як активної, так і реактивної складових потужності; безперервний логічний нагляд за експлуатаційними метриками із синхронним логгуванням даних та побудовою наочних графіків у режимі реального часу; захисне відключення генерації – миттєве апаратне блокування засувки у разі падіння стовпа рідини у висотній чаші до критичних позначок (час реакції мікропроцесорної автоматики становить менше ніж 0,15 секунди).

Такий цифровий алгоритм чудово відтворює поширену практичну ситуацію: через щільну хмарність або коротку тривалість світлового дня геліополе не продукує достатньо кіловатів, і спрацювання масиву води крізь гідромашину відбувається значно швидше, ніж його зворотне закачування. Завдяки цьому інструменту інженери отримують шанс скрупульозно проаналізувати

						Ар.
						80

життєздатність екосистеми, ідентифікувати потенційні "вузькі місця" та відкалібрувати налаштування для гарантованого уникнення блекаутів.

Симуляція роботи сонячної електростанції. Цифровий двійник геліоенергетичного кластера, розроблений задля вивчення його синергії з насосно-турбінним об'єктом, структурно поділяється на дві ключові підпрограми. Перша відповідає за калькуляцію очікуваного рівня сонячної радіації, спираючись на точні GPS-координати, азимут та зенітний кут встановлення фотомодулів. Друга частина – це безпосередньо симулятор електричних параметрів станції. До цього віртуального блоку спрямовуються дані про інсоляцію разом із заводськими специфікаціями обладнання (сумарна площа напівпровідникових комірок, номінальний ККД, температурний коефіцієнт деградації кристалів).

На виході формується достовірний графік продукування корисної електрики. Додатково тут враховується робота інверторних контролерів MPPT (пошук точки максимальної потужності), що в реальних умовах підвищує загальну продуктивність перетворення на 14-17,5 %. Об'єднання цих обчислювальних процесів відкриває шлях до всебічного аудиту та створення надійних прогнозів виробітку енергії за різко мінливих метеоумов. Впровадження такої методики є вкрай результативним кроком для філігранного підбору апаратних складових усього мікрогріда.

Математичний апарат турбогенераторної групи. Програмне середовище для симуляції гідроагрегата дозволяє обчислити точний об'єм рідини, який необхідно пропустити крізь напрямний апарат задля покриття поточного дефіциту потужності. Цей процес спирається на два базові вхідні параметри: актуальний запит від споживачів та наявний геодезичний напір. Окрім цього, програма безперервно перераховує коефіцієнт корисної дії для будь-якого зміненого експлуатаційного режиму. Створена архітектура детально відтворює гідродинамічну специфіку застосованої машини (наприклад, ковшового чи радіально-осьового типу), її силові графіки, стрімке падіння ефективності при часткових навантаженнях, а також жорсткі межі щодо максимальної та мінімальної пропускної здатності.

						Ар.
						81

Розширений функціонал дає змогу виявляти небезпечні зони ризику виникнення кавітації, що критично впливає на втомний знос металу. Застосування цієї субмоделі є абсолютно виправданим для гнучкого регулювання роботи агрегата, зокрема пошуку ідеального балансу між економією води та продукуванням струму. Також інструмент чудово підходить для віртуального тестування наслідків абразивного зносу лопаток чи майбутньої модернізації вузлів без найменшого ризику для реального дороговартісного обладнання.

Цифрова копія нагнітальної інфраструктури. Віртуальний симулятор помпової станції, що відповідає за вертикальне транспортування робочого тіла поміж сховищами, функціонує на базі кількох ключових змінних. Він аналізує актуальні позначки води у донній та висотній чашах, а також доступний ліміт живлення від сонячних інверторів. Спираючись на ці цифри, програма миттєво обчислює: реальну кубатуру перекачаної рідини впродовж розрахункового часового проміжку; раціональну кількість насосів, які доцільно увімкнути для паралельної роботи; усереднений ККД насосної групи з огляду на поточні гідравлічні опори.

Алгоритм глибоко інтегрує технічні специфікації устаткування: Q-H характеристики (діаграми залежності напору від подачі), межі ефективності двигунів, ліміти кавітаційного запасу (NPSH). Одночасно аналізується профіль трубних магістралей (втрати на тертя) та геометрія штучних водойм. Впровадження у розрахунки впливу частотно-регульованих приводів (ПЧ) додатково оптимізує енерговитрати. Використання такого софту на стадії проєктування дозволяє безпомилково затвердити кількість та типорозмір нагнітачів. На етапі ж активної експлуатації він допомагає адаптувати ритм перекачування до нестабільних хвиль сонячної генерації.

Трекінг гідрологічного балансу комплексу. Формування цифрового двійника для аналізу переміщення водних мас відкриває перспективи для глибокого вивчення флуктуацій об'єму в обох резервуарах комплексу в режимі реального часу. Цей інструмент щосекунди здійснює калькуляцію залишку рідини, скрупульозно додаючи всі джерела надходження та віднімаючи витрати.

						Ар.
						82

Фундаментальними складовими цього диференціального рівняння виступають: обсяги піднятої електричними помпами води; скидання потоку крізь ротор гідромашини після завершення циклу генерації; надходження від автономного підйимального механізму (гідротарана); аварійне стравлювання надлишків через переливні канали під час сильних затяжних злив.

Розширена версія алгоритму також бере до уваги природне випаровування з вільної поверхні басейнів, інтенсивність якого прямо залежить від швидкості вітру та температури повітря. Здійснюючи ці багатовекторні розрахунки, програма визначає точну висоту дзеркала в чашах, спираючись на їхні батиметричні криві (взаємозв'язок між накопиченою місткістю та площею). Практичне залучення такої симуляції сприяє масштабній раціоналізації управління станцією, що максимізує її загальну енергоефективність та дозволяє повною мірою реалізувати потенціал наявного ресурсу.

Автоматизоване управління та безпека. Завершальним етапом є інтеграція керівної логічної моделі, що забезпечує жорсткий контроль за ощадливим використанням рідини шляхом безперервного сканування басейнів. Промисловий контролер виконує низку критичних функцій: миттєве зіставлення телеметрії з попередньо зашитими в пам'ять "червоними лініями" (верхніми та нижніми допусками); примусове апаратне гальмування обертових машин у разі виходу параметрів за дозволені межі.

Головним чином, електроніка беззаперечно блокує відкриття засувки турбіни, якщо висотна ємність стрімко наближається до стану "сухого дна". Дзеркально працює захисний контур нагнітальної групи: помпи миттєво знеструмлюються, щойно приймальний зумпф фіксує небезпечне падіння рівня, здатне спровокувати підсмоктування повітря та руйнування ущільнень. Для запобігання постійному смиканню обладнання в прикордонних станах, у програмну логіку інтегровано затримку спрацьовування (гістерезис) на рівні 4,8-5,2 % від граничної позначки. Такий превентивний підхід до автоматизації радикально підвищує загальну відмовостійкість інженерних споруд.

						Ар.
						83

ВИСНОВКИ

У рамках кваліфікаційної роботи було розв'язано комплексне інженерне завдання зі створення ефективної системи електрозабезпечення підприємства текстильної промисловості.

Завдяки проведеному масиву обчислень очікуваних енергетичних навантажень вдалося встановити базові характеристики графіків електроспоживання фабрики. Крім того, детально розглянуто специфіку балансу реактивної складової потужності, а також всебічно проаналізовано аварійні режими та параметри струмів короткого замикання в елементах проекрованої мережі. Отримані числові дані стали надійною теоретичною та практичною базою для подальшого вибору силового комутаційного устаткування та провідникових матеріалів високовольтного комплексу об'єкта.

Запропонована схема розподілу електричної енергії повною мірою відповідає суворим галузевим інженерним вимогам. Створена структура гарантує високу безвідмовність живлення технологічних ліній, належну гнучкість оперативних перемикань і безпеку під час виконання регламентних чи ремонтних робіт. Разом із цим, проект відзначається капітальною ощадливістю та цілковито задовольняє актуальні критерії промислової енергоефективності.

Проведене дослідження доводить беззаперечну рентабельність комбінування локальних сонячних станцій із компактними гідроакумулювальними ємностями для компенсації нестабільного виробітку енергії. Такий закритий гравітаційний контур гарантує надійне покриття вечірніх максимумів споживацького навантаження.

Спроектована в MATLAB математична симуляція успішно імітує стохастичний попит, флуктуації освітленості та динамічний баланс рідини. Завдяки інтегрованим алгоритмам захисту від критичного обміління, розроблений цифровий макет стає готовим інструментом для швидкого розгортання цілком автономних і безпечних мікроенергетичних систем.

						Ар.
						84

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електротехнічні системи електроспоживання : / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова. - 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.