

Центральноукраїнський національний технічний університет

Центр заочної та дистанційної освіти

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:

**«Розробка системи електропостачання
промислового об'єкта хімічного профілю»**

Виконав здобувач вищої освіти
ІІІ курсу, групи ЕЕ-23мбз,
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Богдан ХАРЧЕНКО
«__-__» _____ 2026 р.

Керівник роботи
доцент, канд. техн. наук
_____ Валентин СОЛДАТЕНКО
«__-__» _____ 2026 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

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

Харченка Богдана Віталійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання промислового об'єкта хімічного профілю

Design of the power supply system for a chemical industrial enterprise

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 проектування системи електропостачання промислового об'єкта хімічного профілю. 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 _____

Богдан ХАРЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 84 с.; 23 рис.; 20 табл.; 5 джерел

Харченко Б. В. Розробка системи електропостачання промислового об'єкта хімічного профілю. – 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 Розробка системи електропостачання промислового об'єкта хімічного профілю.

Виконано дослідження специфіки роботи підприємства з випуску хімічних реагентів, з'ясовано архітектуру електроспоживання, побудовано добові графіки використання потужності. Обчислено показники потужностей для виробничих агрегатів і джерел світла в магістралях напругою до і понад 1000 В.

Знаходження параметрів потоків реактивної потужності дало змогу максимально раціонально підібрати конденсаторні установки. Це гарантує відчутне скорочення технологічних втрат енергії, збільшення загального коефіцієнта потужності та надійну стабілізацію напруги на розподільчих шинах.

Обрано оптимальну кількість і номінали знижувальних трансформаторів. Враховано критерії резервування, економічні межі завантаженості та стандарти безвідмовності. Знайдені величини аварійних струмів для ключових вузлів мережі дозволило провести вибір високовольного обладнання, що задовольняє вимогам електродинамічної та термічної витривалості.

Розглянуто та проаналізовано роботу фотоелектричної системи та питання пошуку точки відбору максимальної потужності.

Ключові слова: електричні навантаження, мережа живлення, режими реактивної потужності, сонячна фотоелектростанція

ABSTRACT

Qualification work: 84 p.; 23 Fig.; 20 tables; 5 sources

Kharchenko B. Design of the power supply system for a chemical industrial 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 a chemical industrial enterprise.

A study of the specifics of the operation of the chemical reagents production enterprise was carried out, the architecture of electricity consumption was clarified, daily power usage schedules were constructed. Power indicators for production units and light sources in mains with voltages up to and above 1000 V were calculated.

Finding the parameters of reactive power flows made it possible to select capacitor units as rationally as possible. This guarantees a significant reduction in technological energy losses, an increase in the overall power factor, and reliable voltage stabilization on the distribution buses.

The optimal number and ratings of step-down transformers were selected. The redundancy criteria, economic load limits and failure-free standards were taken into account. The values of emergency currents found for key network nodes allowed the selection of high-voltage equipment that meets the requirements of electrodynamic and thermal endurance. The operation of the photovoltaic system and the issue of finding the maximum power selection point are considered and analyzed.

Keywords: electrical loads, power grid, reactive power modes, solar photovoltaic power plant

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОБЧИСЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБ'ЄКТА ...	8
1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ.....	9
1.2 Розрахунок освітлювальних електричних навантажень	10
1.3 Електричні навантаження в силових мережах понад 1 кВ.....	11
1.4 Графіки електричних навантажень підприємства хімічного профілю	17
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ХІМІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	22
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	25
3.1 Схема зовнішнього електропостачання хімічного підприємства.....	26
3.2 Конфігурація внутрішньої мережі живлення хімічного підприємства.....	30
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ХІМІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	32
4.1 Визначення балансів реактивної потужності хімічного підприємства.....	33
4.2 Вибір кількості, потужності і місця встановлення пристроїв компенсування на підстанціях хімічного підприємства	34
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ І ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ХІМІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА	38
РОЗДІЛ 6. ПІДРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ОБРАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	41
6.1 Визначення струмів коротких замкнень в системі.....	42
6.2 Обрання кабельних ліній напругою 10 кВ	52
6.3 Обрання високовольтних електричних апаратів	54
6.4 Обрання потужності і схем живлення трансформаторів власних потреб	55
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	56
7.1 Роль та стратегічні перспективи розвитку фотоелектричних систем у структурі сучасного енергоринку	56
7.2 Архітектурна будова та базова апаратна конфігурація ізольованих геліоенергетичних комплексів	58
7.3 Математичні методи та алгоритми відстеження локального максимуму потужності фотоелектричних систем.....	62
7.4 Комп'ютерне моделювання мікропроцесорної системи МРРТ на базі алгоритму покрокового екстремального регулювання	69
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ				
Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Харченко Б.В.			Розробка системи електропостачання промислового об'єкта хімічного профілю Design of the power supply system for a chemical industrial enterprise	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перев.		Солдатенко В.П.					6	84	
						ЦНТУ гр. ЕЕ-23мбз			
Н. контр.		Солдатенко В.П.							
Затвер.		Плешков П.Г.							

ВСТУП

Дане бакалаврське дослідження спрямоване на створення схеми живлення підприємства з випуску хімпродуктів. Запропоноване рішення задовольняє актуальні інженерні стандарти, забезпечує безперебійну подачу струму, ефективне споживання потужностей і максимальний ступінь експлуатаційної захищеності. Дослідження включає детальне аргументування конфігурації електричної мережі та підбір ключових апаратів.

Сфера хімії виступає фундаментом вітчизняного господарства. Вона генерує різноманітні матеріали, вкрай необхідні для аграрного сектору, медичної галузі, енергетичного комплексу, повсякденного вжитку та суміжних індустрій. Робота таких об'єктів безпосередньо впливає на інноваційну стабільність країни, прогрес високотехнологічних виробництв і позиції товарів на локальних ринках. Специфіка подібних заводів полягає у максимальній автоматизації ліній, наявності багатоетапних хімічних реакцій та застосуванні вогнебезпечних речовин. Тому вони потребують стабільної, якісної та гарантованої подачі електроенергії.

Мережа живлення відіграє вирішальну роль у структурі подібних фабрик. Електрика слугує базовим ресурсом для роботи виробничих агрегатів, комплексів моніторингу, установок кондиціонування, освітлювальних приладів, охоронної сигналізації та решти допоміжних комунікацій. Збої під час передачі напруги здатні викликати припинення випуску товарів, величезні грошові збитки, виникнення небезпечних інцидентів або навіть непоправну шкоду для довкілля.

Зважаючи на сказане вище, розробка схем енергозабезпечення хімзаводів мусить спиратися на принципи безвідмовності, раціонального енергоспоживання, фінансової доцільності, а також суворого дотримання чинних регламентів і норм захисту від катастроф. Найбільший акцент варто робити на правильному визначенні конфігурації ліній, пропускної здатності трансформаторів, блоків автоматики та засобів дублювання. Саме вони гарантуватимуть стабільне функціонування об'єкта за будь-яких непередбачуваних обставин.

						Ар.
						7

РОЗДІЛ 1

ОБЧИСЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБ'ЄКТА

Важливим кроком під час розробки конфігурації енергозабезпечення заводу виступає знаходження потужностей струмоприймачів. Ці дані слугують базою, щоб надалі правильно підібрати й аргументувати номенклатуру електротехнічних пристроїв, сформувавши топологію мережі, визначити площу перерізу струмопровідних жил, а також проаналізувати експлуатаційні стани системи.

Ця частина роботи присвячена знаходженню обсягів електроспоживання для приймачів хімічного об'єкта. Детально аналізуються потреби в потужності силових установок та світлотехнічних приладів на рівні напруги до 1000 В. Сюди належать приводні механізми виробничих ліній, комплекси локального й загального підсвічування простору, включно з рештою низьковольтних апаратів.

Додатково здійснюється обчислення споживаної потужності в установках понад 1000 В. Ця ланка гарантує постачання струму до високовольтних двигунів і знижувальних підстанцій, одночасно виконуючи завдання транзиту електроенергії територією промислового майданчика.

Під час виконання обчислень беруться до уваги типи споживаної енергії (активна, реактивна чи повна), специфіка функціонування струмоприймачів (довготривалий, нетривалий або повторно-короткочасний цикли). Також застосовуються відповідні розрахункові коефіцієнти: використання, попиту, суміщення максимумів та наявності резерву.

Знайдені показники потужностей застосовуються з метою формування добових діаграм енергоспоживання. Вони відіграють ключову роль в оцінці змінних графіків навантаження, що дозволяє в майбутньому раціоналізувати витрати електрики на заводі.

Підсумкові цифри цього етапу стануть підґрунтям для наступних частин дипломного проєкту. На їх основі відбуватиметься комплектація силових пунктів, конструювання мережі живлення та знаходження параметрів струмів короткого замикання.

						Ар.
						8

1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ

Здійснимо знаходження споживаної потужності низьковольтними струмоприймачами (напруга до 1 кВ), які розташовані всередині Корпусу підйомних установок синтезу №1.

$$m = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{48,07}{4,55} = 10,6$$

$$P_{зм} = \Sigma P_H \cdot K_B = 2783 \cdot 0,6 = 1669,8 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot tg\varphi = 1669,8 \cdot 0,75 = 1252,35 \text{ квар}$$

$$n_{ef} = \frac{2 \cdot \Sigma P_H}{P_{max}} = \frac{2 \cdot 2783}{48,07} = 115,7 \approx 116$$

Отриманий показник перевищує фактичну чисельність приймачів струму. Тому фіксуємо $n_{ef} = 97$, оскільки це значення дорівнює реальній кількості підключених апаратів.

Згідно з даними джерела [1], розрахунковий коефіцієнт $K_p = 1,08$.

Отже, підсумкове енергоспоживання для Корпусу підйомних установок синтезу №1 становитиме:

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 1669,8 \cdot 1,08 = 1803,38 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 1252,35 \text{ квар}$$

Підсумки решти проведених обчислень систематизовано у табл. 1.1.

						Ар.
						9

Таблиця 1.1. Силкові електричні 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	Корпус підйомних установок синтезу №1	97	4,6	48	2783	10,6	0,60	0,80	0,75	1669,8	1252,35	97	1,08	1803,38	1252,35	2193,32
2	Естакада розвантаження калійної солі	21	1,5	19	334	12,3	0,30	0,70	1,02	100,19	102,21	21	1,40	140,3	102,21	173,59
3	Корпус підйомних установок синтезу №2	27	11	213	2328	19,1	0,75	0,80	0,75	1745,7	1309,28	22	1,10	1914,07	1309,28	2319,02
4	Головний виробничий корпус	98	12	248	2834	20,8	0,60	0,80	0,75	1700,2	1275,12	23	1,18	1999,69	1275,12	2371,64
5	Естакада прийому технічної солі	22	7,6	19	116,4	2,5	0,50	0,80	0,75	58,19	43,64	22	1,24	71,98	43,64	84,18
6	Вентиляційна станція газоочистки	48	5,3	197	2925	37,5	0,60	0,80	0,75	1754,8	1316,11	30	1,15	2020,39	1316,11	2411,24
7	Ремонтно-механічний цех	29	1,8	71	1417	38,9	0,60	0,80	0,75	850,08	637,56	29	1,15	981,25	637,56	1170,19
8	Станція пожежогасіння та насосна	32	5,8	33	607,2	5,7	0,75	0,80	0,75	455,4	341,55	32	1,08	490,85	341,55	597,99
9	Корпус прийому хімічної сировини №1	35	2,5	23	379,5	9	0,60	0,70	1,02	227,7	232,3	33	1,14	260,35	232,3	348,92
10	Адміністративно-побутовий корпус	37	0,8	27	440,2	36	0,70	0,80	0,75	308,15	231,11	32	1,10	339,58	231,11	410,76
11	Естакада транспортування реагентів	23	1,9	23	253	12,2	0,55	0,70	1,02	139,15	141,96	22	1,21	168,12	141,96	220,04
12	Лабораторія фізико-хімічного контролю	21	3,8	16	177,1	4,1	0,35	0,70	1,02	61,99	63,24	21	1,35	83,8	63,24	104,98
13	Цех ремонту електроустановок	48	5,8	100	516,1	17,1	0,75	0,80	0,75	387,09	290,31	10	1,15	446,59	319,35	549,02
14	Зварювально-заготівельна дільниця	104	4,9	103	2075	21,2	0,30	0,62	1,28	622,38	793,82	40	1,28	794,96	793,82	1123,44
15	Відділення дегідратації	75	2,5	35	1113	14	0,50	0,70	1,02	556,6	567,84	63	1,13	629,34	567,84	847,65
16	Цех термічної сушки продуктів	27	7,6	33	212,5	4,4	0,20	0,65	1,17	42,5	49,69	13	1,71	72,84	49,69	88,18
17	Відділення помолу реактивів	12	5,4	41	212,5	7,7	0,60	0,85	0,62	127,51	79,03	10	1,29	164,24	86,93	185,82
18	Транспортний цех та гараж	12	2,5	25	96,14	10	0,30	0,65	1,17	28,84	33,72	8	1,71	49,42	37,09	61,78
19	Галерея транспортування шламу на дегідратацію	23	4,2	18	257,1	4,2	0,50	0,70	1,02	128,52	131,12	23	1,23	158,22	131,12	205,49
20	Склад допоміжних матеріалів	12	2,7	7,6	55,66	2,8	0,50	0,70	1,02	27,83	28,4	12	1,34	37,24	28,4	46,84
21	Конвеєрна естакада №7	12	5,1	25	75,9	5	0,50	0,80	0,75	37,95	28,46	6	1,52	57,75	31,3	65,69
22	Склад базових хімікатів	21	2,7	5,6	55,66	2	0,75	0,80	0,75	41,75	31,31	21	1,10	45,88	31,31	55,55
	Всього по заводу	836	0,8	248	19262	327	0,58	0,78	0,81	11072	8980,13	155	1,06	11791,9	8980,13	14822,02

1.2 Розрахунок освітлювальних електричних навантажень

Зразок обчислення споживаної потужності світлотехнічними приладами всередині Корпусу підйомних установок синтезу №1 продемонстровано далі.

						Ap.
						10

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.		$n_{\text{сф}}$	$K_{\text{р}}$	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, ТП-3															
Корпус підйомних установок синтезу №1															
силове:	97	4,55	48,07	2783	10,6	0,60	0,80	0,75	1669,8	1252,35	97	1,08	1800,63	1252,35	2193,32
освітлювальне:									50,66				57,75	27,95	
Всього:									1720,46	1252,35			1858,39	1280,3	2256,72
Корпус підйомних установок синтезу №2															
силове:	27	11,13	212,5	2327,6	19,1	0,75	0,80	0,75	1745,7	1309,28	22	1,10	1914,07	1309,28	2319,02
освітлювальне:									23,78				17,12	8,29	
Всього:									1769,48	1309,28			1931,19	1317,56	2337,83
Станція пожежогасіння та насосна															
силове:	32	5,82	33,4	607,2	5,7	0,75	0,80	0,75	455,4	341,55	32	1,08	490,85	341,55	597,99
освітлювальне:									5,74				4,13	1,99	
Всього:									461,14	341,55			494,98	343,54	602,51
Всього по ТП-1, ТП-2, ТП-3:															
силове:	156	4,55	212,5	5717,8	46,7	0,68	0,80	0,75	3870,9	2903,18	54	1,08	4194,61	2903,18	5101,29
освітлювальне:									80,18				79,01	38,23	
БК 0,4 кВ									-3124,04				-3124,04		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-1...ТП-3:									3951,08	-220,87			4273,62	-182,64	4277,51
Втрати в трансформаторах:													48,02	250,74	
Кількість трансформаторів: 6															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,7$															
Всього на шинах 10 кВ ТП-1...ТП-3:													4321,63	68,11	4322,17
ТП-4, ТП-5, ТП-6															
Естакада розвантаження калійної солі															
силове:	21	1,52	18,72	333,96	12,3	0,30	0,70	1,02	100,19	102,21	21	1,40	140,3	102,21	173,59
освітлювальне:									21,25				24,23	11,73	
Всього:									121,44	102,21			164,53	113,94	200,13
Головний виробничий корпус															
силове:	98	11,94	247,9	2833,6	20,8	0,60	0,80	0,75	1700,16	1275,12	23	1,18	1999,69	1275,12	2371,64

Продовження табл. 1.3

освітлювальне:									11,54				13,16	6,37	
Всього:									1711,7	1275,12			2012,85	1281,49	2386,16
Естакада прийому технічної солі															
силове:	22	7,59	18,72	116,38	2,5	0,50	0,80	0,75	58,19	43,64	22	1,24	71,98	43,64	84,18
освітлювальне:									7,29				5,24	2,54	
Всього:									65,48	43,64			77,23	46,18	89,98
Вентиляційна станція газоочистки															
силове:	48	5,26	197,3	2924,68	37,5	0,60	0,80	0,75	1754,81	1316,11	30	1,15	2020,39	1316,11	2411,24
освітлювальне:									13,97				15,92	7,7	
Всього:									1768,77	1316,11			2036,31	1323,81	2428,79
Всього по ТП-4, ТП-5, ТП-6:															
силове:	189	1,52	247,9	6208,62	163,3	0,58	0,80	0,76	3613,35	2737,08	50	1,12	4045,33	2737,08	4884,29
освітлювальне:									54,04				58,54	28,34	
БК 0,4 кВ									-2393,38				-2393,38		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-4...ТП-6:									3667,39	343,7			4103,87	372,03	4120,7
Втрати в трансформаторах													45,64	238,81	
Кількість трансформаторів: 6															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,68															
Всього на шинах 10 кВ ТП-4...ТП-6:													4149,51	610,84	4194,23
ТП-7, ТП-8															
Ремонтно-механічний цех															
силове:	29	1,82	70,84	1416,8	38,9	0,60	0,80	0,75	850,08	637,56	29	1,15	981,25	637,56	1170,19
освітлювальне:									17,71				20,19	9,78	
Всього:									867,79	637,56			1001,43	647,34	1192,44
Корпус прийому хімічної сировини №1															
силове:	35	2,53	22,77	379,5	9,0	0,60	0,70	1,02	227,7	232,3	33	1,14	260,35	232,3	348,92
освітлювальне:									6,13				6,99	3,38	
Всього:									233,83	232,3			267,34	235,68	356,4
Лабораторія фізико-хімічного контролю															
силове:	21	3,8	15,69	177,1	4,1	0,35	0,70	1,02	61,99	63,24	21	1,35	83,8	63,24	104,98
освітлювальне:									15,18				15,48	7,5	
Всього:									77,17	63,24			99,29	70,74	121,91

Продовження табл. 1.3

Цех ремонту електроустаткування															
силове:	48	5,82	99,68	516,12	17,1	0,75	0,80	0,75	387,09	290,31	10	1,15	446,59	319,35	549,02
освітлювальне:									7,13				5,14	2,49	
Всього:									394,22	290,31			451,73	321,84	554,65
Зварювально-заготівельна дільниця															
силове:	104	4,86	103,2	2074,6	21,2	0,30	0,62	1,28	622,38	793,82	40	1,28	794,96	793,82	1123,44
освітлювальне:									7,2				8,21	3,98	
Всього:									629,58	793,82			803,16	797,8	1132,06
Всього по ТП-7, ТП-8:															
силове:	237	1,82	103,2	4564,12	56,7	0,47	0,73	0,94	2149,24	2017,24	88	1,12	2399,89	2017,24	3135,07
освітлювальне:									53,35				56,01	27,12	
БК 0,4 кВ									-961,4				-961,4		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-7...ТП-8:									2202,59	1055,84			2455,9	1082,96	2684,08
Втрати в трансформаторах													29,49	154,55	
Кількість трансформаторів: 4															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,66															
Всього на шинах 10 кВ ТП-7...ТП-8:													2485,39	1237,51	2776,44
ТП-9, ТП-10															
Адміністративно-побутовий корпус															
силове:	37	0,76	27,32	440,22	36,0	0,70	0,80	0,75	308,15	231,11	32	1,10	339,58	231,11	410,76
освітлювальне:									43,9				42,14	20,39	
Всього:									352,05	231,11			381,72	251,5	457,12
Естакада транспортування реагентів															
силове:	23	1,87	22,77	253	12,2	0,55	0,70	1,02	139,15	141,96	22	1,21	168,12	141,96	220,04
освітлювальне:									7,94				9,06	4,38	
Всього:									147,09	141,96			177,18	146,35	229,81
Відділення дегідrataції															
силове:	75	2,53	35,42	1113,2	14	0,5	0,7	1,02	556,6	567,84	63	1,13	629,34	567,84	847,65
освітлювальне:									6,36				7,25	3,51	
Всього:									562,96	567,84			636,59	571,35	855,39
Цех термічної сушки продуктів															
силове:	27	7,59	33,4	212,52	4,4	0,2	0,65	1,17	42,5	49,69	13	1,71	72,84	49,69	88,18
освітлювальне:									9,41				9,6	4,65	
Всього:									51,92	49,69			82,45	54,33	98,74

Продовження табл. 1.3

Відділення помолу реактивів															
силове:	12	5,36	41,49	212,52	7,7	0,6	0,85	0,62	127,51	79,03	10	1,29	164,24	86,93	185,82
освітлювальне:									4,5				4,59	2,23	
Всього:									132,02	79,03			168,83	89,16	190,92
Транспортний цех та гараж															
силове:	12	2,53	25,3	96,14	10	0,3	0,65	1,17	28,84	33,72	8	1,71	49,42	37,09	61,78
освітлювальне:									1,92				2,16	3,73	
Всього:									30,76	33,72			51,57	40,82	65,77
Галерея транспортування шламу на дегідратацию															
силове:	23	4,2	17,71	257,05	4,2	0,50	0,70	1,02	128,52	131,12	23	1,23	158,22	131,12	205,49
освітлювальне:									13,48				12,94	6,26	
Всього:									142	131,12			171,16	137,39	219,48
Склад допоміжних матеріалів															
силове:	12	2,73	7,59	55,66	2,8	0,50	0,70	1,02	27,83	28,4	12	1,34	37,24	28,4	46,84
освітлювальне:									20,58				19,76	9,56	
Всього:									48,41	28,4			57,01	37,96	68,49
Конвеєрна естакада №7															
силове:	12	5,06	25,3	75,9	5,0	0,50	0,80	0,75	37,95	28,46	6	1,52	57,75	31,3	65,69
освітлювальне:									4,71				3,39	1,64	
Всього:									42,66	28,46			61,15	32,94	69,45
Склад базових хімікатів															
силове:	21	2,73	5,57	55,66	2,0	0,75	0,80	0,75	41,75	31,31	21	1,10	45,88	31,31	55,55
освітлювальне:									2,23				2,54	1,22	
Всього:									43,97	31,31			48,42	32,54	58,34
Буферний термінал зберігання															
освітлювальне:									20,85				15,01	7,27	
Всього:									20,85	0			15,01	7,27	16,68
Промислова площадка заводу															
освітлювальне:									41,49				46,47	80,48	
Всього:									41,49	0			46,47	80,48	92,94
Всього по ТП-9, ТП-10:															
силове:	254	0,76	41,49	2771,87	54,7	0,52	0,74	0,92	1438,81	1322,64	134	1,08	1556,53	1322,64	2042,59

Продовження табл. 1.3

освітлювальне:									177,37				174,91	145,33	
БК 0,4 кВ									-420,99				-420,99		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП-9...ТП-10:									1616,18	901,65			1731,44	1046,98	2023,38
Втрати в трансформаторах:													22,27	116,67	
Кількість трансформаторів: 3															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,67$															
Всього на шинах 10 кВ ТП-9...ТП-10:													1753,72	1163,66	2104,67
Загальні обчислення по підприємству															
силове:	836	0,76	247,9	19262,4	326,7	0,57	0,98	0,19	11072,29	2080,32	155	1,06	11791,94	2080,32	11974,03
освітлювальне:									364,95				368,48	239,02	
Всього:									11437,24	2080,32			12160,42	2319,34	12379,62
Потужність КП 0,4 кВ:									-6899,82				-6899,82		
Втрати в трансформаторах:													145,42	760,78	
Всього по підприємству (низьковольтна частина):													12305,84	3080,12	12685,46
Споживачі високої напруги															
СД-1, СД-2	2	759	759	1518		0,65	0,84	0,64	986,7	632,19			986,7	-632,19	1171,86
Всього високовольтного навантаження:													986,7	-632,19	1171,86
Повне енергоспоживання заводу (10 кВ):													13292,54	2447,94	13516,07
Установки компенсації 10 кВ:													-910,8		
Кінцеве споживання 10 кВ з КП:													13292,54	1537,14	13381,12
$\text{tg}\varphi=0,116$															

Таблиця 1.5. Результати розрахунків доб. графіків

№	Зим.дні						Літн. дні					
	Роб. дні			Вих.і дні			Роб. дні			Вих.і дні		
	$P_{\text{дб}}$ кВт	$Q_{\text{дб}}$ квар	$S_{\text{дб}}$ кВА	$P_{\text{дб}}$ кВт	$Q_{\text{дб}}$ квар	$S_{\text{дб}}$ кВА	$P_{\text{дб}}$ кВт	$Q_{\text{дб}}$ квар	$S_{\text{дб}}$ кВА	$P_{\text{дб}}$ кВт	$Q_{\text{дб}}$ квар	$S_{\text{дб}}$ кВА
1	9304	1467	9419	3190	813	3292	7909	1247	8007	2711	692	2798
2	8507	1196	8591	3190	813	3292	7230	1017	7301	2711	692	2798
3	5981	1004	6065	3190	813	3292	5084	855	5155	2711	692	2798
4	6512	1148	6612	3190	813	3292	5536	976	5621	2711	692	2798
5	5583	1037	5678	3190	813	3292	4746	881	4827	2711	692	2798
6	6380	989	6456	3190	813	3292	5423	840	5488	2711	692	2798
7	5716	1053	5812	3190	813	3292	4858	895	4940	2711	692	2798
8	11431	1323	11507	3190	813	3292	9716	1125	9781	2711	692	2798
9	11165	1516	11267	2659	702	2750	9490	1288	9577	2260	596	2337
10	13292	1292	13355	2659	702	2750	11297	1099	11350	2260	596	2337
11	10633	1372	10721	2659	702	2750	9039	1166	9114	2260	596	2337
12	9570	1323	9661	2659	702	2750	8134	1125	8211	2260	596	2337
13	10633	1516	10741	2659	702	2750	9039	1288	9130	2260	596	2337
14	11829	1563	11932	2659	702	2750	10055	1328	10142	2260	596	2337
15	13292	1500	13376	2659	702	2750	11297	1275	11369	2260	596	2337
16	11297	1452	11390	2659	702	2750	9604	1233	9683	2260	596	2337
17	8241	1292	8342	2659	702	2750	7004	1099	7090	2260	596	2337
18	9570	1276	9655	2659	702	2750	8134	1084	8206	2260	596	2337
19	10766	1292	10843	3190	813	3292	9151	1099	9217	2711	692	2798
20	10234	1323	10319	3190	813	3292	8699	1125	8771	2711	692	2798
21	10501	1292	10580	3190	813	3292	8925	1099	8992	2711	692	2798
22	9835	1292	9920	3190	813	3292	8360	1099	8432	2711	692	2798
23	10633	1403	10725	3190	813	3292	9039	1193	9117	2711	692	2798
24	10633	1292	10711	3190	813	3292	9039	1099	9106	2711	692	2798

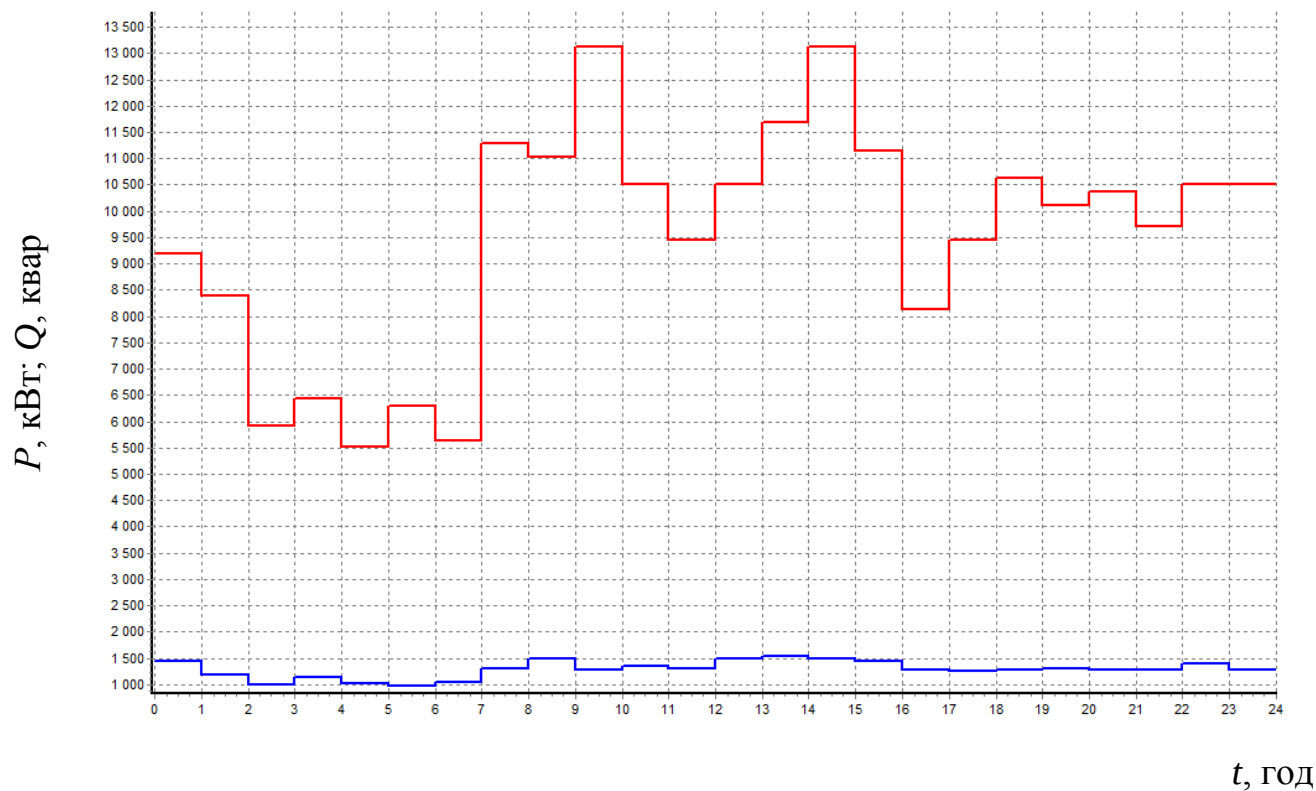


Рис. 1.1. Добові графіки (взимку, дні робочі)

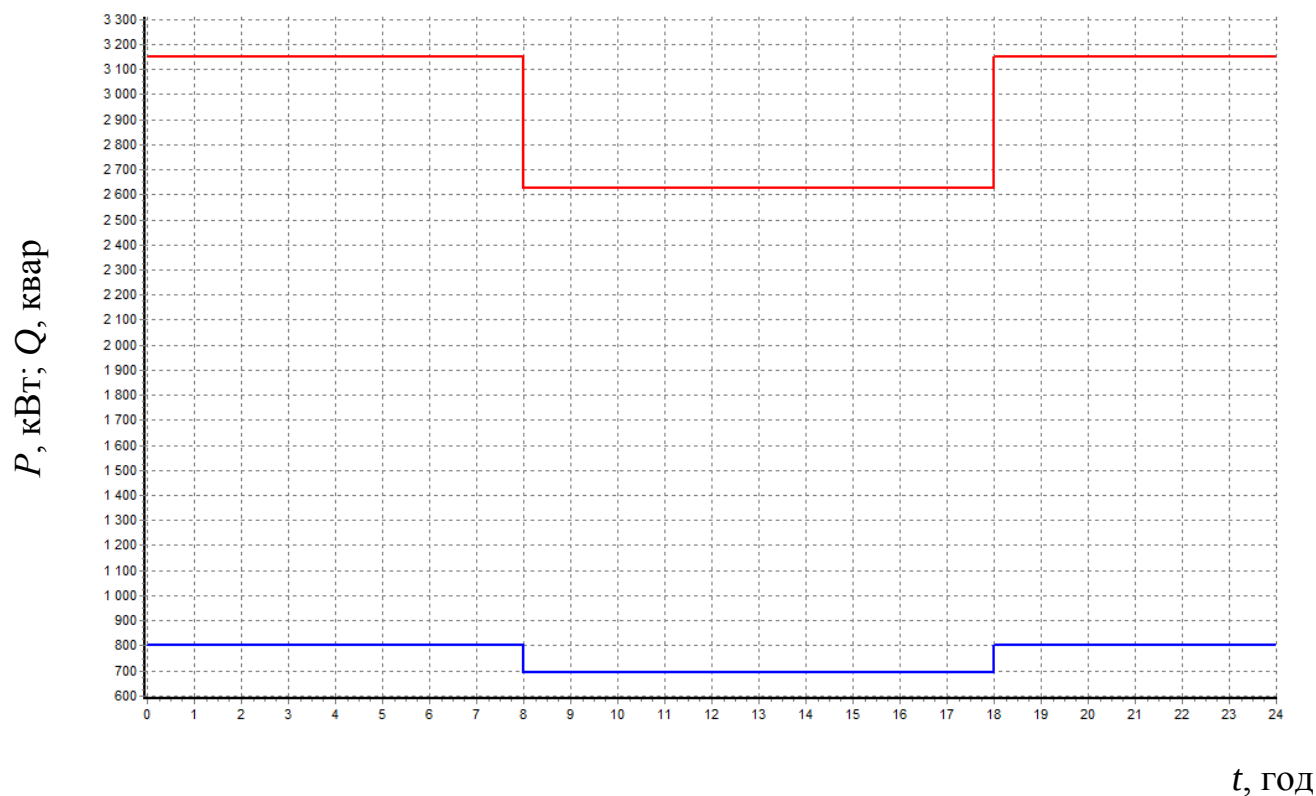


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (взимку, дні вихідні)

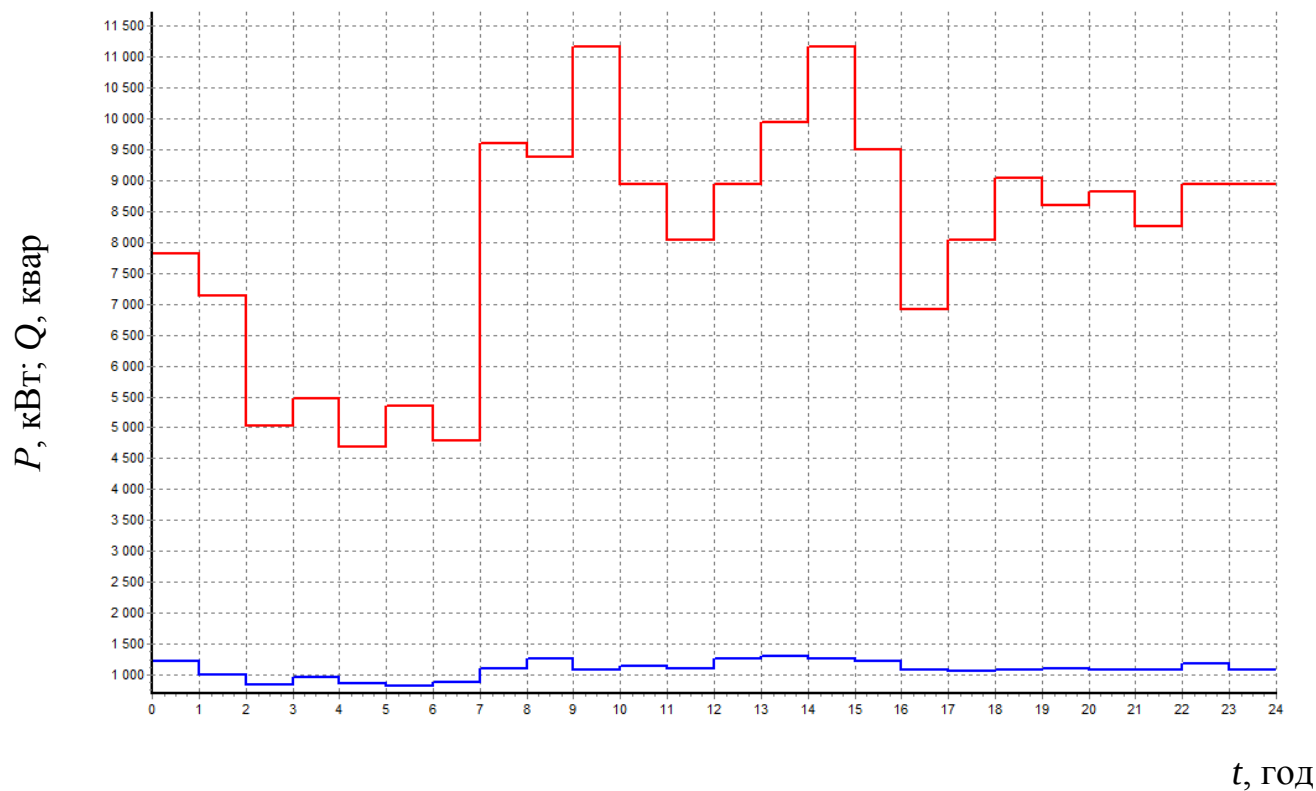


Рис. 1.3. Добові графіки (влітку, дні робочі)

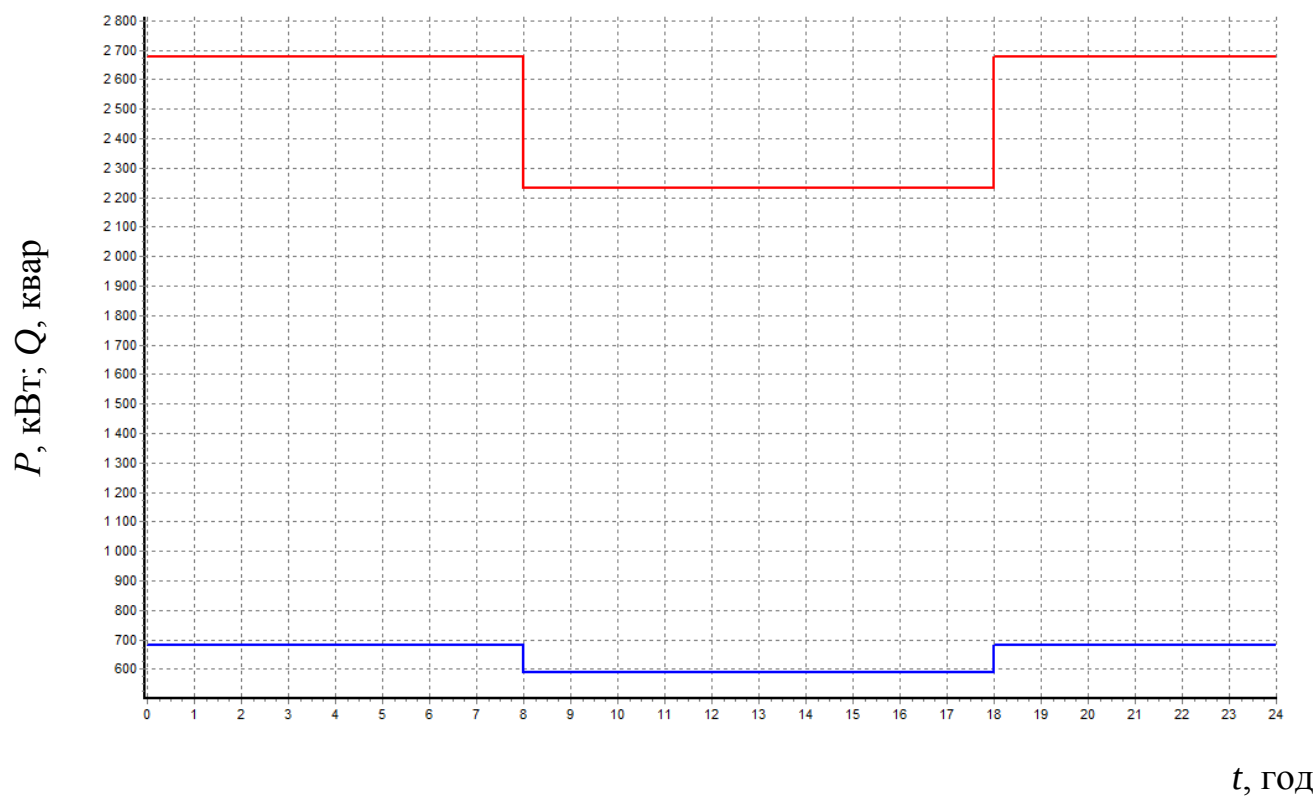


Рис. 1.4 Добові графіки (влітку, дні вихідні)

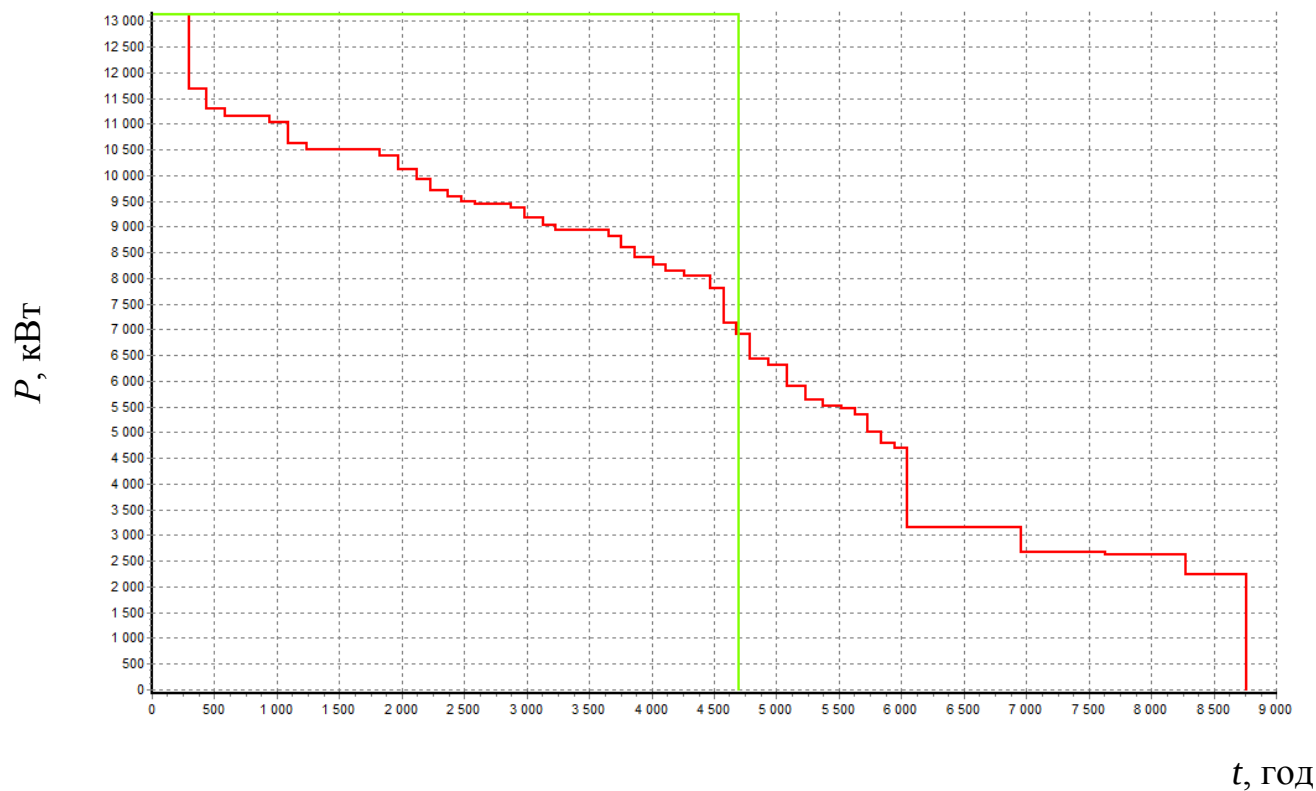


Рис. 1.5. Річний графік потужності (активна P) за тривалістю

Таблиця 1.6. Результати розрах. параметрів графіків

№	Назва параметру	Знач.	Од. вим.
1	$S_{\text{розр}}$	13387	МВА
2	$W_{\text{з.р.}}$	34036308	кВт·год
3	$V_{\text{з.р.}}$	4588362	квар·год
4	$W_{\text{з.в.}}$	4631489	кВт·год
5	$V_{\text{з.в.}}$	1195945	квар·год
6	$W_{\text{л.р.}}$	20664917	кВт·год
7	$V_{\text{л.р.}}$	2785919	квар·год
8	$W_{\text{л.в.}}$	2906863	кВт·год
9	$V_{\text{л.в.}}$	750967	квар·год
10	$W_{\text{річн.}}$	62239578	кВт·год
11	$V_{\text{річн.}}$	9321193	квар·год
12	$T_{\text{м}}$	4760	год
13	$\tau_{\text{м}}$	3131	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ХІМІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Картограма енергоспоживання є візуальною моделлю, яка ілюструє територіальний розподіл потужностей у межах промислового об'єкта. Вона дає змогу наочно проаналізувати концентрацію струмоприймачів у розрізі різних цехів та інфраструктурних об'єктів. Завдяки цьому можна визначити раціональні вузли підключення, знайти найвигідніші місця для встановлення трансформаторів і сформувати оптимізовану схему живлення.

Створення такої моделі спирається на результати обчислень, що були проведені на попередньому етапі роботи. На генеральний план території наносяться всі ключові елементи електротехнічної інфраструктури: виробничі установки, щитові кімнати, розподільні пристрої, знижувальні станції та магістральні кабельні лінії. Для кожної одиниці обладнання зазначається її розрахункова споживана потужність (у кВт), її тип (активна, реактивна або повна), а також робоча напруга.

Переваги використання картограми наступні:

- аналіз рівномірності споживання енергії майданчиком;
- обґрунтування локацій для монтажу трансформаторів з метою скорочення довжини кабелів та зменшення втрат струму;
- полегшення процесу планування трас для електромереж;
- аргументація щодо секціонування мережі та створення ліній резервного живлення.

Особливий фокус спрямовується на локації з високою концентрацією потужностей. Наприклад, це можуть бути хімічні реактори, станції компресорів, насосні групи тощо. Для таких зон доцільно проектувати індивідуальні підстанції або додаткові вводи, щоб гарантувати безперебійність технологічних процесів.

Отже, просторове моделювання навантажень виступає фундаментальною базою для економічного та технічного підтвердження структури

						Ар.
						22

енергозабезпечення, підбору обладнання та прокладання комунікацій. Це безпосередньо формує підсумкову ефективність та безпеку всього електротехнічного комплексу заводу.

Розрахунок параметрів картограми для Корпусу підйомних установок синтезу №1 виконується так:

$$P_P = P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}} = 1801,52 + 57,78 = 1859,3 \text{ кВт}$$

$$R = \sqrt{\frac{P_P}{m \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{1859,3}{0,7 \cdot 3,14}} = 29,08 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}} \cdot 360}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{57,78 \cdot 360}{1801,52 + 57,78} = 11,19^\circ$$

Обчислення для решти виробничих підрозділів зведено до табл. 2.1.

Координати центру електричних навантажень визначаються за формулами:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot X_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{4004261,15}{14089,63} = 284,2 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot Y_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{1849555,65}{14089,63} = 131,27 \text{ м}$$

Враховуючи вимоги зручності обслуговування та специфіку генерального плану, передбачається зміщення головного розподільного пункту в напрямку зовнішнього джерела енергії.

						Ар.
						23

Таблиця 2.1. Результати обчислення параметрів картограми

№ п/п	Найменування	$P_{P.силь}$ кВт	$P_{P.осв}$ кВт	$P_{P, кВт}$	m	$R, мм$	a	$x, м$	$y, м$	$P \cdot x,$ кВт · м	$P \cdot y,$ кВт · м
1	Корпус підйомних установок синтезу №1	1801,52	57,78	1859,30	0,7	29,08	11,19	208	80	386735,31	148744,35
2	Естакада розвантаження калійної солі	140,37	24,24	164,61	0,7	8,65	53,01	466	116	76709,31	19095,02
3	Корпус підйомних установок синтезу №2	1915,01	17,13	1932,14	0,7	29,64	3,19	257	73	496560,91	141046,48
4	Головний виробничий корпус	2000,68	13,16	2013,84	0,7	30,26	2,35	341	75	686720,21	151038,17
5	Естакада прийому технічної солі	72,02	5,24	77,26	0,7	5,93	24,44	414	37	31987,24	2858,76
6	Вентиляційна станція газоочистки	2021,39	15,93	2037,31	0,7	30,44	2,81	412	89	839372,54	181320,77
7	Ремонтно-механічний цех	981,73	20,2	1001,93	0,7	21,34	7,26	432	177	432833,54	177341,52
8	Станція пожежогасіння та насосна										
	- 0,38 кВ	491,09	4,13	495,22	0,7	15,01	3,00	213	152	105482,69	75274,03
	- СД 10 кВ	987,19	0	987,19	0,7	21,19	0,00	201	147	198424,69	145116,56
9	Корпус прийому хімічної сировини №1	260,48	7	267,47	0,7	11,03	9,42	351	230	93882,72	61518,59
10	Адміністративно-побутовий корпус	339,74	42,16	381,90	0,7	13,18	39,74	117	362	44682,87	138249,56
11	Естакада транспортування реагентів	168,21	9,06	177,27	0,7	8,98	18,40	117	248	20740,41	43962,59
12	Лабораторія фізико-хімічного контролю	83,85	15,49	99,34	0,7	6,72	56,14	311	168	30893,61	16688,51
13	Цех ремонту електроустаткування	446,81	5,14	451,95	0,7	14,34	4,10	354	178	159990,17	80447,03
14	Зварювально-заготівельна дільниця	795,35	8,21	803,56	0,7	19,12	3,68	354	157	284460,42	126159,00
15	Відділення дегідратації	629,65	7,25	636,90	0,7	17,02	4,10	51	274	32482,05	174511,42
16	Цех термічної сушки продуктів	72,88	9,61	82,49	0,7	6,12	41,93	56	248	4619,35	20457,12
17	Відділення помолу реактивів	164,32	4,6	168,92	0,7	8,76	9,80	70	188	11824,08	31756,09
18	Транспортний цех та гараж	49,44	2,16	51,60	0,7	4,84	15,05	218	339	11248,15	17491,38
19	Галерея транспортування шламу на дегідр	158,29	12,95	171,24	0,7	8,82	27,22	119	269	20378,05	46064,67
20	Склад допоміжних матеріалів	37,26	19,77	57,03	0,7	5,09	124,81	118	216	6730,03	12319,37
21	Конвеєрна естакада №7	57,78	3,39	61,18	0,7	5,27	19,96	55	220	3364,64	13458,56
22	Склад базових хімікатів	45,91	2,54	48,45	0,7	4,69	18,88	180	239	8720,66	11579,10
23	Буферний термінал зберігання	0	15,02	15,02	0,7	2,61	360,00	231	241	3468,55	3618,71
24	Промислова площадка заводу	0	46,49	46,49	0,7	4,60	360,00	257	203	11948,96	9438,28
	Загалом по підприємству	13720,96	368,66	14089,63						4004261,15	1849555,65

РОЗДІЛ 3
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ
СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА ХІМІЧНОЇ
ПРОМИСЛОВОСТІ

Визначення конфігурації електричної мережі виступає ключовим кроком під час розробки енергетичної інфраструктури об'єкта. На цій стадії формується глобальна архітектура живлення, затверджується чисельність і номінальна пропускна здатність знижувальних пунктів, обираються методи дублювання потужностей, маркування та довжина комунікацій, а також закладаються показники безвідмовності та раціональності роботи всього комплексу.

Для заводів хімічного профілю, що характеризуються цілодобовими виробничими лініями, масовим застосуванням приводних агрегатів, комплексів підсвічування, повітрообміну, терморегуляції та інтелектуальних систем керування, критично необхідно організувати гарантоване та стійке енергозабезпечення. Навіть короточасні зникнення напруги чи її перепади здатні викликати збої в реакціях, брак товарів, зупинку машин і значні економічні збитки.

У цій частині роботи здійснено техніко-економічне порівняння можливих конфігурацій живлення хімзаводу. Аналіз базується на таких фундаментальних показниках: ступінь безперебійності, оптимізація споживання енергії, здатність до розширення та оновлення, інженерна доцільність, а також сумарні інвестиційні й поточні фінансові витрати. Шляхом зіставлення декількох альтернатив визначається найбільш раціональна структура, що ідеально підходить для умов конкретного промислового майданчика.

Завдання цього розділу – надати аргументоване обґрунтування інженерного задуму, який не тільки виконає запити підприємства щодо параметрів струму, але й дасть можливість мінімізувати фінансові вкладення в зведення та подальше обслуговування енергооб'єктів заводу.

						Ар.
						25

3.1 Схема зовнішнього електропостачання хімічного підприємства

Підключення об'єкта може бути здійснено від базової підстанції 110/10 кВ, що розташована на віддаленні 16,89 км. Проаналізуємо два можливі випадки:

перший – транзит потужності кабельною трасою 10 кВ (див. рис. 3.1 а);

другий – передача енергії повітряним шляхом 110 кВ (див. рис. 3.1 б).

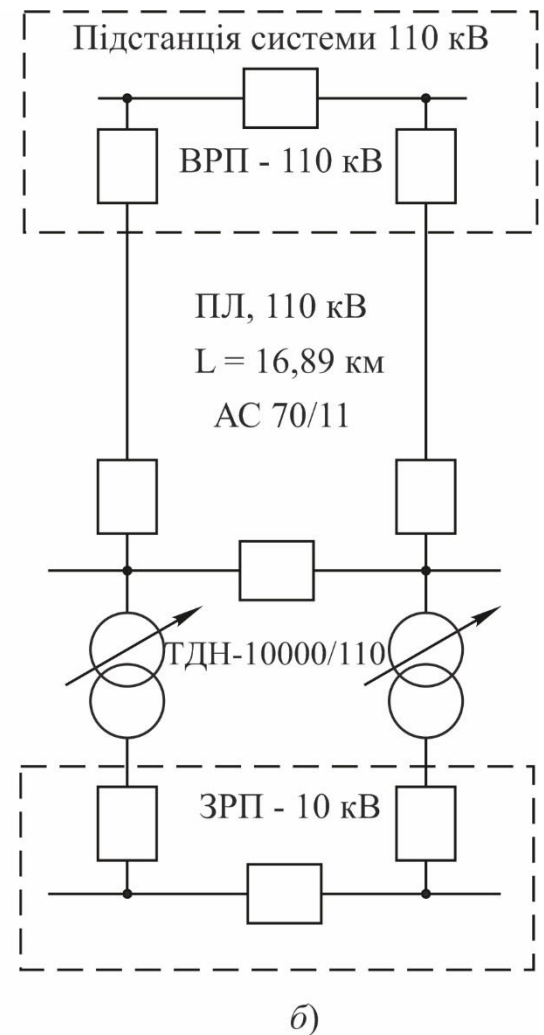
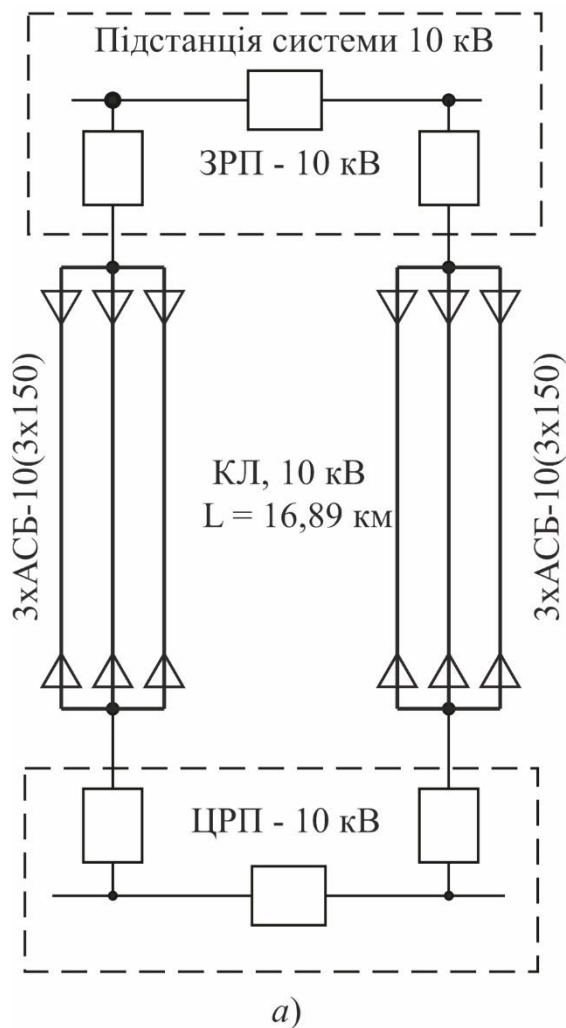


Рис. 3.1. Схеми електропостачання від підстанції системи для порівняння

Виконаємо аналіз першого випадку, а саме прокладання каб. ліній 10 кВ):

Визначення робочого струму для кабельної траси (значення $S_{\text{розр}}$ береться з урахуванням компенсації):

$$I = \frac{S_{\text{розр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{13387}{\sqrt{3} \cdot 10} = 772,9 \text{ А}$$

Для підземного прокладання приймаємо струмопроводи АСБ-10(3х150). У земляній споруді траншеї розміщуватиметься шість таких ліній (формуючи по три кабелі на кожен напрямок живлення).

Виконаємо контроль параметрів лінії по допустимому робочому і аварійному струму:

$$I_p = 128,5 \text{ А} \leq K_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}} = 0,81 \cdot 246 = 199,26 \text{ А}$$

$$I_{\text{ав,р}} = 2 \cdot 128,5 = 257 \text{ А} \leq K_{\text{ап}} \cdot I'_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 0,92 \cdot 246 = 282,9 \text{ А}$$

Характеристики кабелів для обраної траси повністю відповідають нормативним вимогам.

Наступним кроком знайдемо коефіцієнти завантаженості, обсяги втраченої потужності та електроенергії, а також фінансові витрати на їх покриття.

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{128,5}{246} = 0,522$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{1\text{км}} \cdot l \cdot K_3^2 = 20 \cdot 101,34 \cdot 0,2725 = 552,3 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\Sigma} \cdot \tau_{\text{м}} = 552,3 \cdot 3122,8 = 1724722,44 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$C_{\text{в}} = \Delta W_{\text{л}} \cdot C_0 \cdot 0,001 = 1724722,44 \cdot 8,95 \cdot 0,001 = 15436,27 \text{ тис. грн.}$$

						Ар.
						27

Розрахунок капітеловкладань по варіанту живлення 10 кВ виконано, а результати введені у вигляді табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Розрахунок капітальних вкладень

№ вар.	Назва елемента схеми	Од. вим.	Кількість	Вартість, тис. грн.	Всього, тис. грн.
1	КЛ 10 кВ	км	101,34	89,2	9039,53
2	Траншея	км	16,89	14,45	244,06
3	Шафи КРП серії КУ-10	шт.	2	10,8	21,6
Всього					9305,19

Розрахунок витрат на експлуатацію та амортизацію приведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Розрахунок поточних витрат

№ вар.	Назва елемента схеми	К _j , тис.грн.	Р _{aj} , %	С _{aj} , тис.грн.	Р _{ej} , %	С _{ej} , тис.грн.	С _j , тис.грн.
1	КЛ 10 кВ	9039,53	5	451,98	5	451,98	903,96
2	Траншея	244,06	5	12,2	5	12,2	24,4
3	Шафи КРП серії КУ-10	21,6	15	3,24	5	1,08	4,32
Всього							932,68

Обчислення фінансових збитків, спричинених раптовим припиненням подачі струму, продемонстровано далі.

$$\sum \lambda_i = 0,004 + 4,05 = 4,054 \text{ 1/рік}$$

$$T_b = \frac{\sum \lambda_i T_{bi}}{\sum \lambda_i} = \frac{0,004 \cdot 0,00045 + 4,05 \cdot 0,003675}{4,054} = 0,0036718 \text{ рік}$$

$$K_{\pi} = 1,2 \cdot K_{\pi \text{MAX}} = 1,2 \cdot 0,002 = 0,0024$$

$$K_a = \lambda \cdot T_b = 4,054 \cdot 0,0036718 = 0,014885$$

						Ар.
						28

$$K_{\text{ап}} = 0,5 \cdot \lambda \cdot K_{\text{п}}^2 = 0,5 \cdot 4,054 \cdot 0,00000576 = 0,00001168$$

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2K_{\text{ап}} = 0,014885^2 + 2 \cdot 0,00001168 = 0,00024492$$

$$T_a^{(2)} = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,00024492 \cdot 8760 = 2,1455 \text{ год}$$

$$Y = Y_0 \cdot P_{\text{ср}} \cdot T_a^{(2)} = 26,61 \cdot 7,29 \cdot 2,1455 = 416,30 \text{ тис. грн.}$$

Сумарні приведені видатки для цієї конфігурації енергозабезпечення (з урахуванням попередньо знайдених капітальних інвестицій та поточних витрат) дорівнюватимуть:

$$Z_1 = E_{\text{н}} \cdot K_1 + C_1 + C_{\text{втр.1}} + Y_1 =$$

$$= 0,12 \cdot 9305,19 + 932,68 + 15436,27 + 416,30 = 17901,87 \text{ тис. грн./рік}$$

Аналогічним способом було здійснено прорахунок для системи з номінальною напругою 110 кВ (альтернативний варіант).

Зрівняння підсумкових витратних показників наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Складові зведених витрат реалізації схем зовн. електропостачання

Показники	Варіант 1 (кабельна лінія 10 кВ)	Варіант 2 (повітряна лінія 110 кВ)
Капітальні вкладення, тис. грн.	9305,19	14437,95
Поточні витрати, тис. грн.	932,68	2463,39
Вартість втрат електроенергії, тис. грн.	15436,27	4688,77
Фінансовий збиток, тис. грн.	416,3	6,4
Зведені витрати, тис. грн./рік	17901,87	8891,11

З отриманих результатів випливає, що другий варіант (повітряна лінія 110 кВ) характеризується меншими зведеними фінансовими витратами, тому до впровадження приймається саме він

3.2 Конфігурація внутрішньої мережі живлення хімічного підприємства

Архітектура внутрішньозаводських електричних мереж виступає фундаментальною складовою енергетичного комплексу. Вона задає алгоритм передачі потужності від головних понижувальних вузлів безпосередньо до струмоприймачів. Професійний підхід до формування цієї структури гарантує безпечну, безперебійну та економічно вигідну діяльність об'єкта. Це надзвичайно актуально для сфери хімічного синтезу, оскільки тут існують жорсткі стандарти щодо стабільності подачі напруги.

Індустрія виробництва хімікатів відрізняється масовим застосуванням агрегатів із цілодобовим циклом функціонування. Крім того, на територіях таких заводів розташовано чимало ділянок із високим ризиком загоряння чи детонації. Зважаючи на ці обставини, першочерговим завданням стає організація максимального ступеня безвідмовності живлення, створення надійних резервних ліній та формування зрозумілої топології комунікацій. Це дозволить швидко проводити ремонтні маніпуляції та здійснювати ефективний моніторинг.

Під час проєктування внутрішньомайданчикової мережі обов'язково беруться до уваги наступні фактори:

специфіка та номінальна пропускна здатність навантажень (виробничі машини, світлотехніка, системи кондиціонування повітря, супутні механізми);

- територіальне розташування корпусів і допоміжних будівель на генеральному плані;
- класифікація струмоприймачів за рівнем безперебійності відповідно до норм ПУЕ;
- потреба у дублюванні джерел енергії для найбільш критичних технологічних ланок;

						Ар.
						30

- сумарна довжина та просторова топологія підземних чи надземних трас;
- регламенти щодо релейного захисту та блоків автоматичного керування.

Беручи до уваги технологічну специфіку аналізованого комплексу, у цьому дипломному проєкті застосовано радіальну конфігурацію розподілу енергії.

Базовими вузлами сформованої топології є розподільні пункти з рівнем напруги 10 кВ, знижувальні трансформатори до 0,4 кВ, а також магістралі низького вольтажу, котрі підведені прямо до робочих механізмів. Передача струму до критично важливих приймачів 1-ї категорії реалізується через дві відокремлені лінії. Вони обов'язково оснащуються комплексами автоматичного введення резерву (АВР).

Глобальна архітектура спроектована з метою мінімізації протяжності прокладених кабелів та зниження обсягів втраченої потужності. Вона гарантує зручний доступ персоналу до апаратів під час сервісних робіт, одночасно підвищуючи загальний рівень живучості комплексу під час нештатних аварійних інцидентів.

Як наслідок, розроблена внутрішньозаводська структура живлення цілком задовольняє актуальні інженерні стандарти. Вона забезпечує необхідний рівень безпеки, безвідмовності та раціонального енергоспоживання для успішної роботи об'єкта хімічної індустрії.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ХІМІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Грамотне регулювання потоків реактивної енергії виступає ключовим завданням під час розробки та подальшого обслуговування електричних мереж. Це особливо актуально для енергоємних об'єктів, таких як заводи хімічної індустрії. Наявність надлишку або територіального дисбалансу таких струмів провокує падіння загального коефіцієнта потужності. Крім того, це викликає зайве перевантаження силових магістралей і знижувальних пунктів, збільшує обсяги втраченої електрики, зменшує рівень напруги на клеммах струмоприймачів, що може повністю дестабілізувати нормальну роботу технологічних комплексів.

З огляду на зазначене, щоб гарантувати максимальну надійність та ефективність енергозабезпечення, слід обов'язково провести ретельний аналіз графіків споживання реактивних струмів. Також вимагається технічно-економічне підтвердження доцільності встановлення конкретних компенсувальних установок та вибір оптимальних точок їхнього монтажу. Застосування засобів компенсації дає змогу довести коефіцієнт потужності до регламентованих значень, розвантажити трансформаторне обладнання, оптимізувати якість напруги та суттєво скоротити фінансові витрати на поточну експлуатацію.

У цій частині дипломного проєкту здійснюється оцінювання балансу реактивної енергії для електричного господарства заводу. Процес враховує загальну архітектуру комунікацій, характер підключених приймачів, чисельність і пропускну здатність наявних підстанцій. Базуючись на детальному дослідженні потреб окремих груп апаратів, формується аргументоване рішення щодо найкращого співвідношення між кількістю цехових трансформаторів та блоків компенсації низького й високого вольтажу. Окремий акцент робиться на визначенні алгоритмів керування цими апаратами. Розглядаються варіанти стаціонарного підключення або автоматичного регулювання, спираючись на специфіку навантаження та динаміку добових коливань струмів.

						Ар.
						32

4.1 Визначення балансів реактивної потужності хімічного підприємства

Обчислення показників балансування реактивної енергії, виконані на основі методики [1], продемонстровано далі.

$$\Sigma P_{\text{HTП}} = P_{\text{H}} = 13038 \text{ кВт}$$

$$\Sigma Q_{\text{HTП}} = Q_{\text{H}} = 9216 \text{ кВАр}$$

$$\Sigma \Delta P_{\text{ТТП}} = \Delta P_{\text{Т}} = 137 \text{ кВт}$$

$$\Sigma \Delta Q_{\text{ТТП}} = \Delta Q_{\text{Т}} = 720 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМСД}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} = 756 \cdot 0,4 = 302 \text{ кВАр}$$

$$P_{\text{СД}} = N \cdot P_{\text{НОМСД}} \cdot K_{\text{ВИК}} = 2 \cdot 756 \cdot 0,65 = 983 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{СД}} = n \cdot \frac{P_{\text{НОМСД}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}}}{\eta} = 2 \cdot \frac{756 \cdot 0,4}{0,96} = 630 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{СДmax}} = n \cdot \frac{\alpha_{\text{M}} \cdot P_{\text{НОМСД}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}}}{\eta} = 2 \cdot \frac{1,21 \cdot 756 \cdot 0,4}{0,96} = 762 \text{ кВАр}$$

$$P_{\text{p}} = P_{\text{H}} + \Delta P_{\text{Т}} + P_{\text{В}} + P_{\text{СД}} = 13038 + 137 + 0 + 983 = 14158 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{p}} = Q_{\text{H}} + \Delta Q_{\text{Т}} + Q_{\text{В}} - Q_{\text{СД}} = 9216 + 720 + 0 - 630 = 9306 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{e}} = P_{\text{p}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{c}} = 14158 \cdot 0,12 = 1699 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{КП}} = Q_{\text{p}} - Q_{\text{e}} = 9306 - 1699 = 7607 \text{ кВАр}$$

						Ар.
						33

Для забезпечення стабільної подачі струму необхідно змонтувати таку мінімальну кількість понижувальних апаратів:

$$N_0 = \frac{P_H}{\beta \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{13038}{0,7 \cdot 1000} = 18,63 \approx 19 \text{ шт.}$$

Перший розрахунковий сценарій: $N = 19$ од.

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{\text{НОМ}})^2 - P_H^2} = \sqrt{(19 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 13038^2} = 2623 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{КН}} = Q_H - Q_1 = 9216 - 2623 = 6593 \text{ кВАр}$$

$$Q_{\text{КВ}} = Q_p - Q_{\text{КН}} - Q_e = 9306 - 6593 - 1699 = 1014 \text{ кВАр}$$

Аналогічною методикою проводимо знаходження значень для сценаріїв із 19+1 та 19+2 трансформаторами. Підсумки оцінювання балансів реактивних струмів зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Результати обчислення балансів реактивної потужності об'єкта

Варіант компенсації	Q_1 , кВАр	$Q_{\text{КН}}$, кВАр	$Q_{\text{КВ}}$, кВАр
19 трансформаторів	2623	6593	1014
20 трансформаторів	5092	4124	3483
21 трансформаторів	6806	2410	5197

4.2 Вибір кількості, потужності і місця встановлення пристроїв компенсування на підстанціях хімічного підприємства

Обґрунтування застосування установок компенсації систематизовані далі у табл. 4.2-4.4. відповідно до числа трансформаторів згідно попередніх обчислень.

						Ар.
						34

Розглянемо початковий сценарій балансування реактивних струмів, котрий передбачає встановлення найменшої допустимої кількості понижувальних підстанцій. Виконаємо обчислення обсягів втраченої енергії всередині компонентів мережі, після чого знайдемо сумарні приведені фінансові видатки:

Вартість придбання компенсуючого обладнання:

$$\Delta P_{\text{КН}} = P_{\text{Пит.КН}} \cdot Q_{\text{КН}} = 0,0045 \cdot 6886 = 30,99 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{КВ}} = P_{\text{Пит.КВ}} \cdot Q_{\text{КВ}} = 0,003 \cdot 909 = 2,73 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{ТП}} = \frac{13070^2 + 3100^2}{10^2} \cdot 0,05 \cdot 0,001 = 90,22 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{СД}} = 763,81 \cdot \left(\frac{303 \cdot 2}{763,81 \cdot 2} \right)^2 + 763,81 \cdot \left(\frac{303 \cdot 2}{763,81 \cdot 2} \right)^2 = 9,38 \text{ кВт}$$

Витрати на встановлення пристроїв компенсації

$$\begin{aligned} K_{\text{КН}} &= \sum K_{\text{КН}i} \cdot N_i \\ &= 3 \cdot 2,98 + 8 \cdot 3,55 + 6 \cdot 3,73 + 1 \cdot 4,28 + 4 \cdot 4,84 + 6 \cdot 5,59 + 6 \cdot 7,43 \\ &= 161,41 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

$$K_{\text{КВ}} = \sum K_{\text{КВ}i} \cdot N_i = 2 \cdot 12,205 = 24,41 \text{ тис. грн.}$$

Капітальні інвестиції на монтаж ТП:

$$\begin{aligned} K_{\text{ТП}} &= \sum K_{\text{ТП}(1)} \cdot N_{\text{ТП}(1)} + \sum K_{\text{ТП}(2)} \cdot N_{\text{ТП}(2)} = 9 \cdot 6500,87 + 1 \cdot 3287,55 \\ &= 61795,38 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

						Ар.
						36

Сумарні приведені видатки:

$$З = 0,12 \cdot (161,41 + 24,41 + 61795,38) + 7,21 \cdot 3092 \\ \cdot (30,99 + 2,73 + 90,22 + 9,38) \cdot 10^{-3} = 10409,88 \text{ тис. грн.}$$

Підсумкові показники для решти сценаріїв регулювання реактивної енергії систематизовано всередині таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Розрахунок зведених витрат для різних варіантів КП

№ вар.	Q _{кн} , кВАр	ΔP _{кн} , кВт	Q _{кв} , кВАр	ΔP _{кв} , кВт	N _{тр} , шт.	Р _{екв} , Ом	S _{пр} , кВА	ΔP _{тп} , кВт	К _{кн} , тис. грн.	К _{кв} , тис. грн.	К _{ктп} , тис. грн.	З, тис. грн.
1	6886	30,99	909	2,73	19	0,05	13433	90,22	161,41	24,41	61795,38	10410
2	4905	22,07	2727	8,18	20	0,04	14140	79,18	132,3	51,56	65082,89	10481
3	2658	11,96	5000	15	21	0,04	14847	87,3	68,89	78,44	68370,44	10979

Зважаючи на отримані цифри, затверджуємо до впровадження перший сценарій. Він вимагає монтажу дев'ятнадцяти трансформаторних агрегатів, що є найменшим необхідним числом.

РОЗДІЛ 5

ВИБІР КІЛЬКОСТІ І ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ХІМІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Понижувальні апарати виконують фундаментальну місію всередині енергетичної структури індустріального об'єкта. Їхнє головне завдання полягає у трансформації високовольної напруги магістралей до параметрів, придатних для нормального функціонування струмоприймачів. Заводи з випуску хімікатів відрізняються масивними й цілодобовими обсягами електроспоживання. Тому безпомилковий підбір чисельності та номіналів силового обладнання виступає критичним аспектом для гарантування безперебійності, раціональності витрат та загальної рентабельності мережі.

Монтаж зайвих одиниць техніки викликає необґрунтоване збільшення початкових фінансових вкладень. Крім того, це спричиняє падіння реального коефіцієнта використання машин, погіршуючи їхні робочі параметри. З іншого боку, нестача агрегатів чи вибір замалої пропускної здатності провокує систематичні перевантаження, термічне пошкодження ізоляції, просідання напруги на клемах. Іноді такі прорахунки стають причиною раптового знеструмлення цілих технологічних ліній.

Дана частина роботи присвячена обчисленню оптимальної пропускної здатності підстанцій. Процес спирається на сукупні показники споживаної енергії, беручи до уваги розрахункові індекси попиту, суміщення максимумів, наявність дублюючих ліній та специфіку протікання реакцій на майданчику. Досліджуються альтернативні конфігурації понижувальних пунктів, котрі містять один, два чи більше блоків. Також вивчаються алгоритми введення резерву й перерозподілу струмів під час раптової поломки будь-якого апарата.

Головна ціль поточного етапу полягає у технічному аргументуванні номенклатури та номіналів знижувальних пристроїв. Ухвалені рішення мусять гарантувати стабільну подачу електрики до всіх підключених машин, зберігаючи при цьому найменший рівень інвестиційних та поточних фінансових видатків.

						Ар.
						38

Продемонструємо алгоритм підбору апаратів для головної знижувальної підстанції.

$$S_{p.t.} = \frac{13,33 \cdot 0,8}{1,4 \cdot (2 - 1)} = 7,62 \text{ МВА}$$

Приймаємо до встановлення марку ТДН 10000/110 із такими заводськими характеристиками: втрати неробочого ходу дорівнюють 13,5 кВт, втрати короткого замикання становлять 70 кВт, напруга к.з. складає 8%.

Завантаженість агрегату ГЗП під час штатного функціонування становить:

$$K_3 = \frac{13,33}{2 \cdot 10} = 0,67$$

Перевірочні розрахунки підтверджують правильність прийнятого рішення.

Далі необхідно обрати пристрої для цехових понижувальних пунктів. Планується застосування комплектних вузлів із одним або двома пристроями типу ТМ-1000/10/0,4.

Визначення параметрів робочого блоку для ТП-1:

$$K_{зав} = \frac{S_{розр}}{n \cdot S_{ном}} = \frac{1420,20}{2 \cdot 1000} = 0,71$$

$$S_{ном} \geq \frac{S_{розр}}{K_1} = \frac{1420,20}{1,08} = 1315,00 \text{ кВА}$$

$$S_{ном} \geq \frac{S_{розр}}{K_2} = \frac{1420,20}{1,4} = 1014,43 \text{ кВА}$$

Для інших же підстанцій проводяться аналогічні розрахунки які зведені до табл. 5.1.

						Ар.
						39

Таблиця 5.1. Результати розрахунків по вибору цехових трансформаторів

№	К-сть тр.	$S_{\text{розр}}, \text{кВА}$	$K_{\text{зав}}$	$\frac{S_{\text{ном}}}{S_{\text{розр}}/K_1} >$	$S_{\text{ном}} > S_{\text{розр}}/K_2$
ТП-1	2	1420,20	0,71	1315,00	1014,43
ТП-2	2	1420,20	0,71	1315,00	1014,43
ТП-3	2	1420,20	0,71	1315,00	1014,43
ТП-4	2	1368,14	0,68	1266,80	977,24
ТП-5	2	1368,14	0,68	1266,80	977,24
ТП-6	2	1368,14	0,68	1266,80	977,24
ТП-7	2	1336,74	0,67	1237,72	954,81
ТП-8	2	1336,74	0,67	1237,72	954,81
ТП-9	2	1343,59	0,67	1244,06	959,71
ТП-10	1	671,79	0,67	622,03	479,85

РОЗДІЛ 6

ПІДРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ОБРАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Фундаментальним кроком під час розробки архітектури електромереж виступає дослідження аварійних станів, зумовлених короткими замиканнями. Це дослідження дає змогу гарантувати загальну електричну безпеку, здійснити обґрунтований підбір силових апаратів і коректно налаштувати алгоритми роботи автоматики. Для комунікацій індустріальних об'єктів (особливо у сфері хімії), де механізми функціонують під жорстким експлуатаційним тиском, струми таких аварій здатні набувати величезних значень. Це формує серйозну загрозу як для працездатності машин, так і для здоров'я працівників та стабільності всього випуску продукції.

Знаходження величин струмів короткого замикання вимагається задля:

- підтвердження здатності елементів мережі витримувати механічні (електродинамічні) та теплові удари;
- грамотної комплектації розподільних пристроїв (силових вимикачів, апаратів розриву кола, вимірювальних трансформаторів, струмовідвідних шинопроводів тощо);
- завдання правильних уставок для блоків релейного захисту;
- підтвердження чіткої послідовності та безвідмовності спрацювання захисних автоматів.

У даній частині роботи буде здійснено знаходження показників трифазного замикання для ключових вузлів мережі. Процедура враховуватиме просторову конфігурацію, характеристики генераторів, параметри знижувальних підстанцій та оновлену довжину транзитних ліній (16,89 км). Спираючись на знайдені цифри, відбудеться підбір високовольтної комутаційної техніки та підземних струмопроводів. Усе затверджене устаткування мусить повністю відповідати критеріям механічної міцності, здатності гарантовано розривати струми к.з. та нормам термічного навантаження.

						Ар.
						41

6.1 Визначення струмів коротких замкнень в системі

Схеми розрахункова та заміщення мережі наведені на рис. 6.1, 6.2.

Значення опорів елементів мережі до шин напругою 110 кВ ГЗП (тчк. К0):

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з.}} = \frac{115^2}{45400} = 0,291 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{0,291}{25} = 0,012 \text{ Ом}$$

$$R_l = r_0 \cdot l = 0,422 \cdot 16,89 = 7,128 \text{ Ом}$$

$$X_l = x_0 \cdot l = 0,444 \cdot 16,89 = 7,499 \text{ Ом}$$

$$X_{K0} = X_c + X_l = 0,291 + 7,499 = 7,79 \text{ Ом}$$

$$R_{K0} = R_c + R_l = 0,012 + 7,128 = 7,14 \text{ Ом}$$

$$Z_{K0} = \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2} = \sqrt{7,14^2 + 7,79^2} = 10,57 \text{ Ом}$$

Визначаємо параметри струму к.з. в т. К0 (надперехідний струм, постійна часу, ударний коефіцієнт, ударний струму):

$$I''_{K0} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K0}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 10,57} = 6,28 \text{ кА}$$

$$T_{a0} = \frac{X_{K0}}{\omega \cdot R_{K0}} = \frac{7,79}{314 \cdot 7,14} = 0,0035 \text{ с}$$

$$k_{yд0} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a0}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0035}} = 1,057$$

$$i_{yд0} = \sqrt{2} \cdot k_{yд0} \cdot I''_{K0} = \sqrt{2} \cdot 1,057 \cdot 6,28 = 9,39 \text{ кА}$$

Еквівалентні значення електричного опору для компонентів магістралі, перераховані на сторону 10 кВ головної понижувальної підстанції (розрахунковий вузол К1), становитимуть:

$$X'_{K0} = X_{K0} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 7,79 \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,065 \text{ Ом}$$

$$R'_{K0} = R_{K0} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 7,14 \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,060 \text{ Ом}$$

$$Z'_{K0} = Z_{K0} \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 10,57 \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,088 \text{ Ом}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} \cdot 10^3 = \frac{70 \cdot 10,5^2}{10000^2} \cdot 10^3 = 0,077 \text{ Ом}$$

$$X_T = \frac{U_{K, \%} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}} \cdot 100} \cdot 10^3 = \frac{8 \cdot 10,5^2}{10000} \cdot 10 = 0,882 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X'_{K0} + X_T = 0,065 + 0,882 = 0,947 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R'_{K0} + R_T = 0,060 + 0,077 = 0,137 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,137^2 + 0,947^2} = 0,957 \text{ Ом}$$

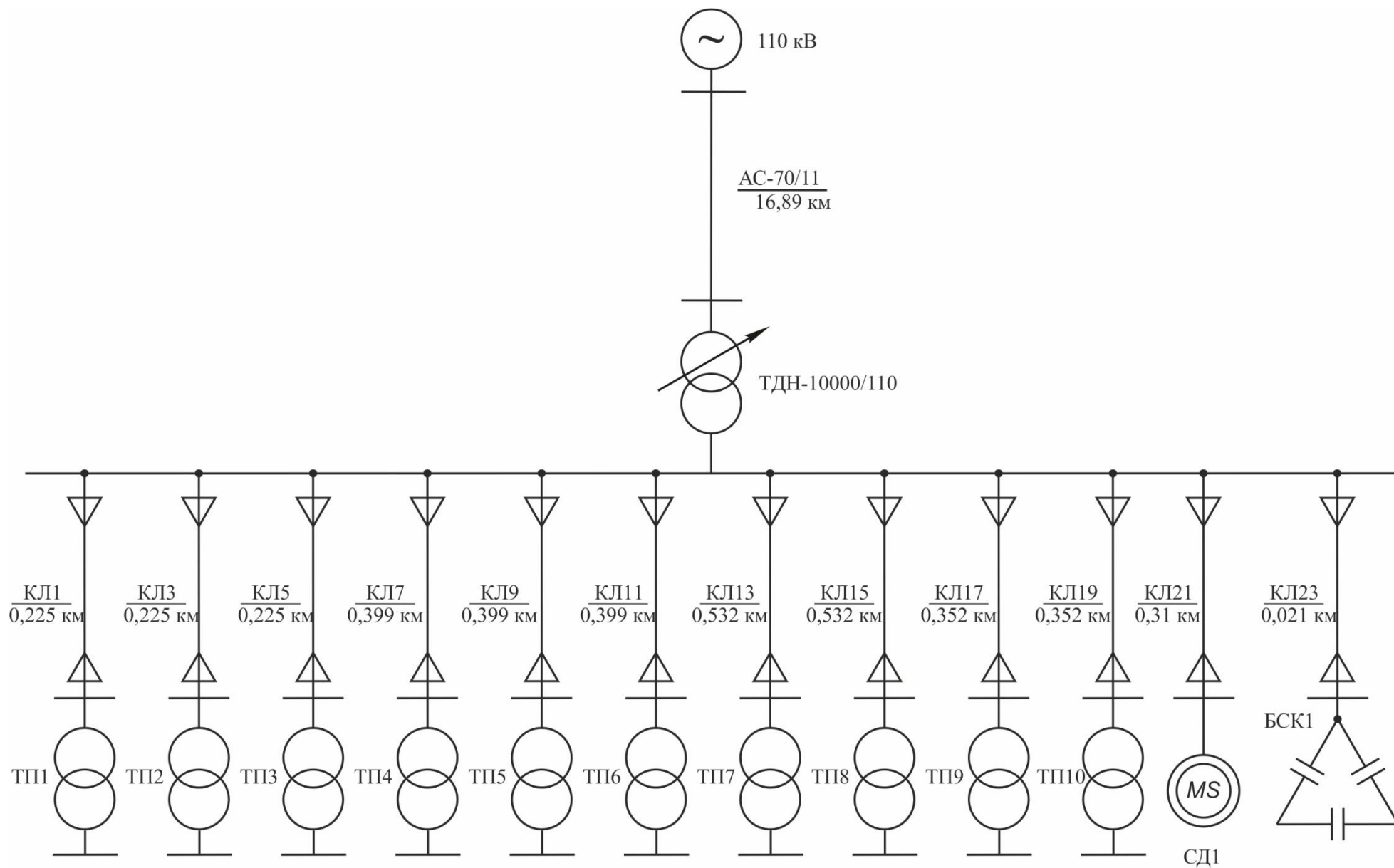


Рис. 6.1. Розрахункова схема

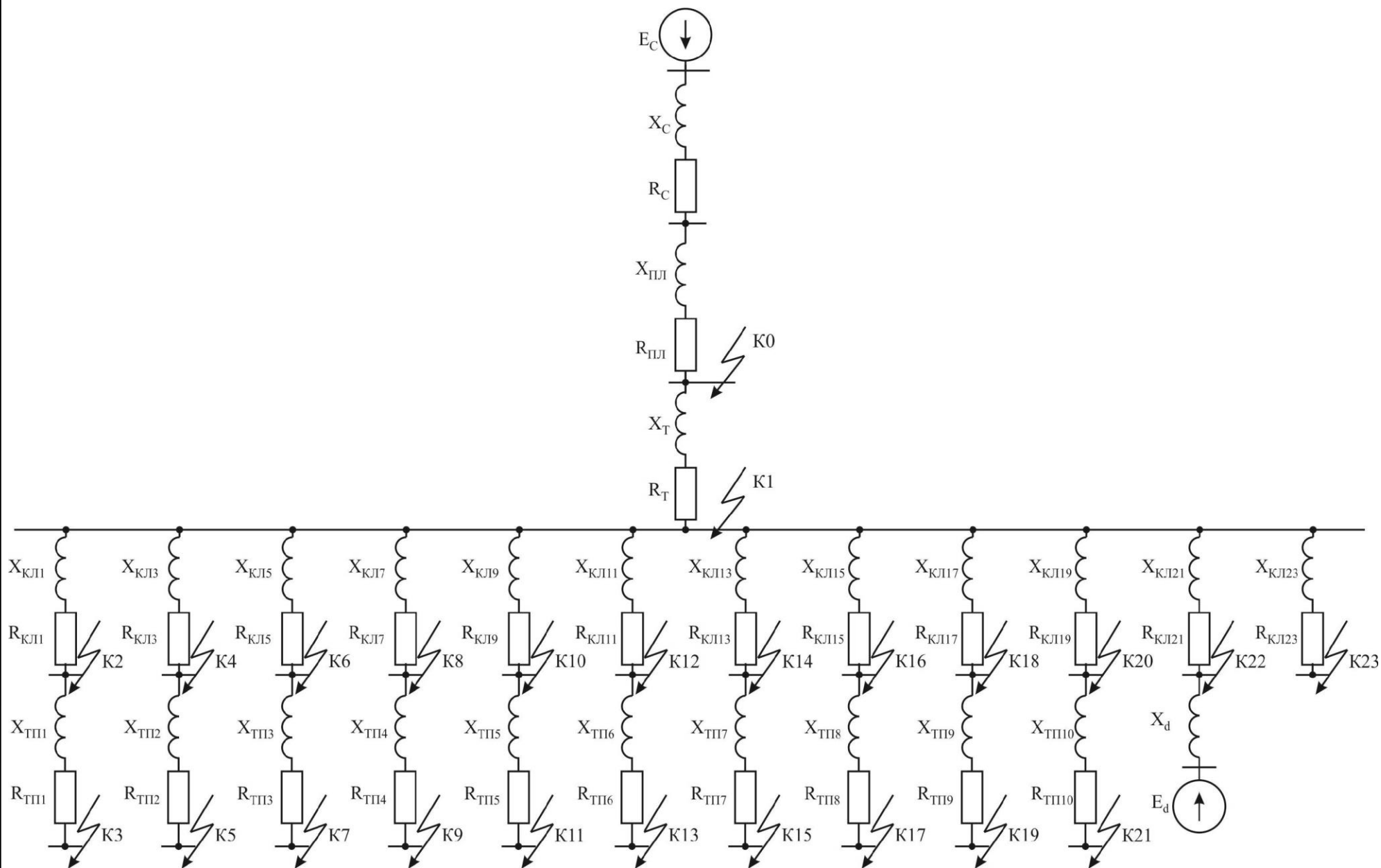


Рис. 6.2. Схема заміщення

Обчислюємо характеристики струму к.з. для вузла К1. Вони формуються як сума двох впливів – струму від зовнішньої енергосистеми та підживлення від працюючого синхронного двигуна високої напруги. Знайдемо параметри складової від зовнішньої мережі:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,957} = 6,33 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{0,947}{314 \cdot 0,137} = 0,022 \text{ с}$$

$$k_{уд1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,022}} = 1,634$$

$$i_{уд1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{уд1} \cdot I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,634 \cdot 6,33 = 14,63 \text{ кА}$$

Тепер знайдемо величини струмів підживлення, що генеруються високовольтними електромоторами в момент аварії. Загальні характеристики короткого замикання для вузла К1 знаходимо шляхом додавання раніше обчисленого струму зовнішньої енергосистеми та впливу від працюючих синхронних машин.

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta} = \frac{0,756}{0,93 \cdot 0,96} = 0,847 \text{ МВА}$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{0,847}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,0466 \text{ кА}$$

$$I''_{K1(cД)} = n_{\text{сД}} \frac{E''}{x''_d} I_{\text{ном}} = 2 \cdot \frac{1,1}{0,2} \cdot 0,0466 = 0,513 \text{ кА}$$

						Ар.
						46

$$T_{aCD} = \frac{X_{CD}}{\omega \cdot R_{CD}} = \frac{15}{314} = 0,0478 \text{ с}$$

$$k_{уд(CD)} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{aCD}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0478}} = 1,811$$

$$i_{уд1(CD)} = \sqrt{2} \cdot k_{уд(CD)} \cdot I''_{K1(CD)} = \sqrt{2} \cdot 1,811 \cdot 0,513 = 1,31 \text{ кА}$$

Підсумковий надперехідний та ударний струм у точці К1 становитиме:

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(CD)} = 6,33 + 0,513 = 6,84 \text{ кА}$$

$$i_{уд1} = i_{уд1(c)} + i_{уд1(CD)} = 14,63 + 1,31 = 15,94 \text{ кА}$$

Здійснимо знаходження необхідних експлуатаційних характеристик, щоб коректно підібрати кабельну магістраль КЛІ.

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{ср.ном}} = \frac{1435,03}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 39,50 \text{ А}$$

$$B_k = I''_{K1}{}^2 (t_{p.з.min} + T_a) = 6,84^2 (0,420 + 0,022) = 20,68 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{20,68 \cdot 10^3} = 48,38 \text{ мм}^2$$

Зупиняємо свій вибір на марці струмопроводу ААШв-10(3х50). Далі виконаємо обчислення величин активного та реактивного опорів для зазначеної кабельної магістралі:

$$R_{кл} = r_0 \cdot l_{кл} = 0,62 \cdot 0,227 = 0,141 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = x_0 \cdot l_{кл} = 0,09 \cdot 0,227 = 0,020 \text{ Ом}$$

						Ар.
						47

Опори інших ліній наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Визначення опорів ліній КЛ

№ КЛ	l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	R , Ом	X , Ом
1, 2	0,227	0,62	0,09	0,141	0,02
3, 4	0,227	0,62	0,09	0,141	0,02
5, 6	0,227	0,62	0,09	0,141	0,02
7, 8	0,403	0,62	0,09	0,25	0,036
9, 10	0,403	0,62	0,09	0,25	0,036
11, 12	0,403	0,62	0,09	0,25	0,036
13, 14	0,537	0,62	0,09	0,333	0,048
15, 16	0,537	0,62	0,09	0,333	0,048
17, 18	0,355	0,62	0,09	0,22	0,032
19	0,355	0,62	0,09	0,22	0,032
20, 21	0,313	0,62	0,09	0,194	0,028
22, 23	0,021	0,62	0,09	0,013	0,002

Знайдемо загальні характеристики електричного опору та струму короткого замикання для розрахункового вузла К2, використовуючи еквівалентну схему заміщення:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кл} = 0,947 + 0,020 = 0,967 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кл} = 0,137 + 0,141 = 0,278 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,278^2 + 0,967^2} = 1,006 \text{ Ом}$$

$$I''_{K2} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,006} = 6,03 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{0,967}{314 \cdot 0,278} = 0,0111 \text{ с}$$

$$k_{yд2} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0111}} = 1,406$$

$$i_{yд2} = \sqrt{2} k_{yд2} I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,406 \cdot 6,03 = 11,99 \text{ кА}$$

Знайдемо величини активної та реактивної складових еквівалентного електричного опору для цехового понижувального агрегату марки ТМ-1000/10. Під час обчислень спираємося на злегка скориговані паспортні характеристики трансформатора ($\Delta P_K = 8,67 \text{ кВт}$, $U_K = 5,54 \%$), щоб зберегти строгу узгодженість із нашими попередніми математичними модифікаціями:

$$R_{тр} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{ср.ном}^2}{S_{ном}^2} \cdot 10^3 = \frac{8,67 \cdot 10,5^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 0,956 \text{ Ом}$$

$$X_{тр} = \frac{U_{K,\%} \cdot U_{ср.ном}^2}{S_{ном}} \cdot 10 = \frac{5,54 \cdot 10,5^2}{1000} \cdot 10 = 6,108 \text{ Ом}$$

Виконаємо обчислення необхідних електротехнічних характеристик для розрахункового вузла КЗ. Цей крок передбачає переведення еквівалентних опорів на сторону низького вольтажу (0,4 кВ), спираючись на затверджені раніше показники магістралі та знижувального апарата:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{тр}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (0,967 + 6,108) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0103 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{тр}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (0,278 + 0,956) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0018 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0018^2 + 0,0103^2} = 0,0105 \text{ Ом}$$

$$I''_{K3} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0105} = 22,00 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0103}{314 \cdot 0,0018} = 0,0182 \text{ с}$$

$$k_{уд3} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0182}} = 1,577$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot k_{уд3} \cdot I''_{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,577 \cdot 22,00 = 49,06 \text{ кА}$$

Розрахунки параметрів струмів короткого замикання для інших вузлів схеми електропостачання, представлені у таблиці 6.2.

						Ар.
						50

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

<i>№ точки к.з.</i>	<i>R, Ом</i>	<i>X, Ом</i>	<i>I_к^{''}, кА</i>	<i>T_а, с</i>	<i>k_{уд}</i>	<i>i_{уд}, кА</i>
0	7,14	7,79	6,28	0,0035	1,056	9,39
1	0,137	0,947	6,84	0,022	1,634	15,94
2	0,278	0,967	6,03	0,0111	1,405	11,98
3	0,0018	0,0103	22,16	0,0183	1,578	49,46
4	0,278	0,9670	6,03	0,0111	1,405	11,98
5	0,0018	0,0103	22,16	0,0183	1,578	49,46
6	0,278	0,967	6,03	0,0111	1,405	11,98
7	0,0018	0,0103	22,16	0,0183	1,578	49,46
8	0,387	0,983	5,74	0,0081	1,29	10,47
9	0,0019	0,0103	22,05	0,0168	1,552	48,39
10	0,387	0,983	5,74	0,0081	1,29	10,47
11	0,0019	0,0103	22,05	0,0168	1,552	48,39
12	0,387	0,983	5,74	0,0081	1,29	10,47
13	0,0019	0,0103	22,05	0,0168	1,552	48,39
14	0,47	0,995	5,51	0,0067	1,227	9,56
15	0,0021	0,0103	21,97	0,0159	1,532	47,6
16	0,47	0,995	5,51	0,0067	1,227	9,56
17	0,0021	0,0103	21,97	0,0159	1,532	47,6
18	0,357	0,979	5,82	0,0087	1,318	10,85
19	0,0019	0,0103	22,08	0,0172	1,559	48,68
20	0,357	0,979	5,82	0,0087	1,318	10,85
21	0,0019	0,0103	22,08	0,0172	1,559	48,68
22	0,331	0,975	5,89	0,0094	1,344	11,19
23	0,15	0,949	6,31	0,0201	1,609	14,36

6.2 Обрання кабельних ліній напругою 10 кВ

Визначення розрахункових експлуатаційних характеристик для магістралі живлення першої трансформаторної підстанції (ТП1):

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1420,20}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 39,50 \text{ A}$$

Зупиняємо свій вибір на прокладанні двох паралельних кабелів марки **2 х ААШв-10(3х50)** та підтверджуємо це відповідними умовами:

$$I_p = 39,50 \text{ A} \leq K_n \cdot I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 105 = 96,6 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав}} = 79,00 \text{ A} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_n \cdot I_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 105 = 131,25 \text{ A}$$

$$B_k = I_{K1}''^2 (t_{\text{р.з.мин}} + T_a) = 6,84^2 (0,420 + 0,022) = 20,68 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{20,68} \cdot 10^3 = 48,38 \text{ мм}^2$$

Розрахунковий мінімум становить 48,38 мм², отже, обраний переріз 50 мм² повністю задовольняє всі інженерні вимоги.

Аналогічним чином проводиться розрахунок і для інших кабельних ліній, а результати зводяться до таблиці 6.3.

В табл. 6.3 наведено результати вибору КЛ.

						Ар.
						52

Таблиця .6.3. Вибір КЛ

<i>№ КЛ</i>	<i>n, шт</i>	<i>S_p, МВА</i>	<i>I_p, А</i>	<i>I_{p.ав.}, А</i>	<i>F_{ек}, мм²</i>	<i>B_к, кА²с</i>	<i>F_{min}, мм²</i>	<i>Марка кабелю</i>	<i>I_{дон}, А</i>	<i>K_n</i>	<i>K_nI_{дон}, А</i>	<i>K_{ан}</i>	<i>K'_n</i>	<i>K_{ан}K'_n I_{дон}, А</i>
1, 2	2	1420,2	39,09	78,18	27,92	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
3, 4	2	1420,2	39,09	78,18	27,92	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
5, 6	2	1420,2	39,09	78,18	27,92	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
7, 8	2	1368,14	37,66	75,32	26,9	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
9, 10	2	1368,14	37,66	75,32	26,9	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
11, 12	2	1368,14	37,66	75,32	26,9	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
13, 14	2	1336,74	36,79	73,58	26,28	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
15, 16	2	1336,74	36,79	73,58	26,28	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
17, 18	2	1343,59	36,98	73,96	26,41	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	1,25	1	131,25
19	1	671,79	36,98	-	26,41	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	1	105	-	-	-
20, 21	2	579	15,94	-	11,39	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	-	-	-
22, 23	2	450	12,39	-	8,85	20,68	48,38	ААШВ-10 (3х50)	105	0,92	96,6	-	-	-

6.3 Обрання високовольтних електричних апаратів

Розрахункові критерії для затвердження головних ввідних вимикачів продемонстровано у табл. 6.4.

Перш ніж переходити до порівняння, знайдемо необхідні часові та теплові характеристики аварійного режиму для високовольтного вузла 110 кВ (точка K0):

$$\tau = t_{p.з.min} + t_{c.в} = 0,02 + 0,022 = 0,042 \text{ с}$$

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} \cdot I''_{K0} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_{a0}}} = 1,41 \cdot 6,28 \cdot e^{-\frac{0,042}{0,0035}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_K = I''_{K0}^2 (t_{c.в.} + t_{p.з.max} + T_{a0}) = 6,28^2 \cdot (0,022 + 1,02 + 0,0035) = 41,23 \text{ кА}^2\text{с}$$

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача 110 кВ

Параметр перевірки	Розрахункова величина мережі	Умова	Паспортне значення вимикача
Номінальна напруга, кВ	$U_{уст} = 110$	$\leq$	$U_{ном} = 145$
Тривалий струм, А	$I_{роб.форс} = 97,94$	$\leq$	$I_{ном} = 3150$
Здатність до відключення:			
- симетричний струм, кА	$I_{пт} = 6,28$	$\leq$	$I_{відкл.ном} = 40$
- аперіодична складова, кА	$i_{a\tau} = 0$	$\leq$	$i_{a.ном} = 19,8$
- повний струм, кА	$\sqrt{2}I_{пт} + i_{a\tau} = 8,85$	$\leq$	$\sqrt{2}I_{відкл.ном}(1 + \beta_H) = 76,14$
Електродин. стійкість:			
- симетричний струм, кА	$I''_{K0} = 6,28$	$\leq$	$I_{дин.ст} = 52$
- ударний струм, кА	$i_{уд0} = 9,39$	$\leq$	$i_{дин.у} = 132,37$
Термічна стійкість, кА ² с	$B_K = 41,23$	$\leq$	$I_{TH}^2 t_{TH} = 1200$

Для встановлення на відкритому розподільчому пристрої 110 кВ зупиняємо свій вибір на надійному елегазовому апараті марки LTB-145D1/B.

6.4 Обрання потужності і схем живлення трансформаторів власних потреб

Принципову конфігурацію підключення знижувальних апаратів, котрі забезпечують енергією внутрішні допоміжні споживачі (власні потреби) підстанції (охолодження, освітлення, автоматику), продемонстровано на рисунку 6.3.

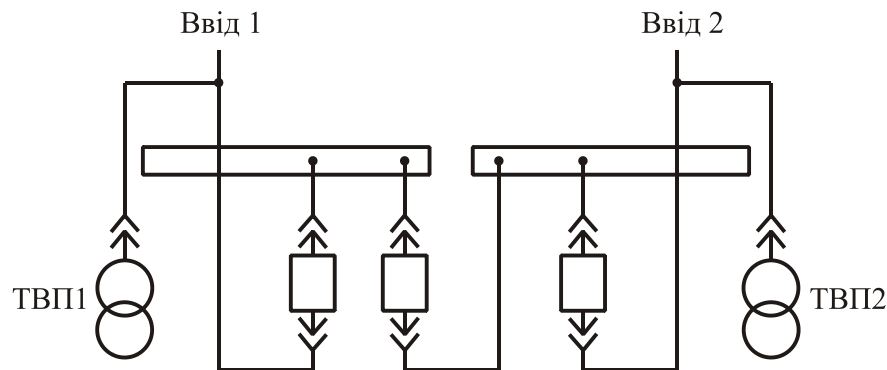


Рис. 6.3. Схема приєднання до мережі ТВП

Загальне розрахункове електричне навантаження для цього допоміжного вузла обчислюється:

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{107,35^2 + 42,34^2} = 115,40 \text{ кВА}$$

$$S_p = K_c \cdot S_{уст} = 0,8 \cdot 115,40 = 92,32 \text{ кВА}$$

Для гарантування безперебійного функціонування критично важливої інфраструктури підстанції приймаємо рішення встановити два паралельні трансформатори марки **ТМ-63/10**. Перевіримо коефіцієнт їхнього фактичного завантаження під час нормального експлуатаційного режиму роботи:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{92,32}{2 \cdot 63} = 0,73$$

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

7.1 Роль та стратегічні перспективи розвитку фотоелектричних систем у структурі сучасного енергоринку

Протягом останнього десятиліття спостерігається інтенсивне масштабування світової індустрії геліоенергетики. Аналітичні дані Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) свідчать про експоненційне зростання інсталюваних потужностей: з 2010 по 2020 рік цей показник збільшився приблизно у вісімнадцять разів, перетнувши рубіж у 728 гігават порівняно з базовими сорока гігаватами. Зазначена динаміка є абсолютною домінантою серед усіх існуючих напрямів освоєння альтернативних ресурсів. Подібний прогрес чітко окреслює статус фотовольтаїки як базового елемента глобального енергопереходу.

Суттєве зниження нормованої вартості електроенергії (LCOE) для сонячних установок дозволило їм успішно конкурувати з викопними видами палива. Синергія вдосконалених виробничих процесів, оптимізації логістики та лояльної нормативної бази стала головним драйвером розширення ринку напівпровідникових генераторів. Вітчизняний енергетичний ландшафт також зазнав суттєвих структурних змін. Менш ніж за п'ять років в Україні відбулося стрімке нарощування відповідної інфраструктури: сумарна генерація об'єктів перевищила обсяг у 8 ГВт наприкінці 2022 року, що дозволило державі закріпити позиції на європейському ринку екологічно чистої електрики.

За експертними оцінками, питома вага енергії Сонця у загальносвітовому балансі електровиробництва стабільно збільшується. У довгостроковій перспективі прогнозується, що сукупна генерація на базі вітрових та сонячних потоків здатна покрити близько сорока відсотків планетарного попиту до 2040 року. Це створить надійне підґрунтя для реалізації глибокої декарбонізації промисловості.

Незважаючи на оптимістичні тренди, масове впровадження джерел струму

						Ар.
						56

напівпровідникових стикається із серйозними інженерними викликами. Ключовими експлуатаційними недоліками є стохастичний характер генерації, який прямо залежить від метеорологічних факторів (рівня інсоляції, температури модулів), а також проблематика балансування пікових потужностей та зберігання великих масивів електричної енергії. Саме тому актуалізується необхідність проведення ґрунтовних досліджень у сфері інтеграції відновлюваних об'єктів до традиційних мереж. Пріоритетними векторами розвитку визнано проєктування "розумних" енергосистем (Smart Grid), підвищення квантової ефективності фотокомірок (із наближенням до теоретичної межі Шоклі-Квайссера), а також модернізацію технологій хімічного акумулювання.

Фізичним базисом роботи геліостанцій виступає явище внутрішнього фотоефекту, що полягає у безпосередньому генеруванні електрорушійної сили всередині напівпровідникових структур під дією поглинутих квантів світла. Індустріальна база сьогодення пропонує широкий спектр поглинаючих матеріалів: від класичного моно- та полікристалічного кремнію до тонкоплівкових структур на основі телуриду кадмію (CdTe), селеніду міді-індію-галію (CIGS) та перспективних перовськітних елементів. Конструктивно базовий генеруючий блок складається із матриці електрично з'єднаних комірок.

З метою отримання необхідних промислових параметрів окремі панелі комутуються у масштабні ланцюги (стрінги). Загальна архітектура обов'язково доповнюється електронними силовими пристроями – насамперед інверторами для перетворення виробленого постійного струму у змінний із заданою частотою. Згідно з експлуатаційним призначенням, станції класифікуються на мережеві (On-grid), які працюють паралельно із загальними лініями електропередач, та ізольовані (Off-grid), що функціонують як самостійні енергетичні островці.

Сьогодні фіксується стабільний ріст попиту саме на децентралізовані мікромережі. Використання локальних генераторів є безальтернативним інженерним варіантом для тих територій, де прокладання магістральних ЛЕП економічно невиправдане або технічно ускладнене. Пріоритетними нішами для інсталяції такого обладнання виступають аграрні підприємства, телекомунікаційні

вузли, об'єкти транспортної інфраструктури та віддалені житлові будинки.

Як наслідок, автономні геліосистеми доводять свою беззаперечну ефективність у ролі надійного джерела живлення. Подальше вдосконалення електронної компонентної бази разом із систематичним здешевленням накопичувачів енергії відкривають широкі перспективи для масового застосування острівних станцій у різних галузях економіки.

7.2. Архітектурна будова та базова апаратна конфігурація ізольованих геліоенергетичних комплексів

Топологія незалежних сонячних станцій (відомих як Off-grid системи) формується шляхом логічного поєднання чотирьох фундаментальних технологічних вузлів. Кожен із них виконує суворо визначену функцію:

Первинне джерело генерації: Масив напівпровідникових фотоперетворювачів (сонячних батарей), який відповідає за пряму трансформацію електромагнітного випромінювання Сонця у постійний електричний струм (DC).

Блок накопичення: Представлений хімічними джерелами струму (сучасними літій-залізо-фосфатними або класичними свинцево-кислотними акумуляторами). Цей сегмент гарантує безперебійне живлення об'єкта під час нічного періоду або за умов щільної хмарності.

Інверторний каскад: Електронне устаткування, завданням якого є високочастотне перетворення згенерованої DC-напруги у стандартизований змінний струм (AC) із чистою синусоїдою, що є критично важливим для коректної роботи більшості побутових приладів та промислового обладнання.

Мікропроцесорний контролер: Керуючий елемент, що безперервно відстежує стан системи, регулює циклічні алгоритми заряду-розряду накопичувачів та запобігає їхній деградації внаслідок глибокого виснаження чи перезаряду.

Фізична комутація переліченого устаткування здійснюється за попередньо розрахованою схемою, жорстко адаптованою під специфічний профіль

						Ар.
						58

споживання. Зазвичай базова конфігурація розширюється за рахунок інтеграції пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗП), балансирів, телеметричних датчиків та комутаційної автоматики. Гарантією стабільної експлуатації такого інфраструктурного об'єкта виступає ґрунтовний інженерний розрахунок. Він обов'язково базується на аналізі пікових потужностей навантаження, середньорічних показників надходження радіації для обраної географічної широти та оцінці ймовірнісних кліматичних ризиків.

У випадках, коли локація характеризується високою мінливістю погодних умов або критичною важливістю безперервного живлення, класична топологія модернізується до рівня гібридної мікромережі. Подібна архітектура передбачає підключення комплементарних джерел: вітрогенераторів для компенсації провалів генерації у зимовий період або паливних установок (дизель-генераторів) як механізму резервного живлення останньої інстанції. Створення таких мультигенераторних комплексів експоненціально підвищує загальний показник енергетичної безпеки та автономності.

Водночас впровадження додаткових генеруючих одиниць радикально ускладнює апаратну частину та логіку керування. Синхронізація різнорідних потоків потужності вимагає застосування високотехнологічних систем енергоменеджменту (EMS – Energy Management Systems). Такі пристрої повинні в режимі реального часу аналізувати глибину розряду батарей (SoC), прогнозувати надходження енергії від вітру чи сонця та автоматично перемикає силові магістралі без відчутних перепадів напруги для кінцевого споживача. Відповідно, проєктування гібридних вузлів висуває надзвичайно суворі вимоги до якості розрахунків перехідних процесів та прецизійного налаштування електронних алгоритмів взаємодії.

На рис. 7.1 наведена принципова схема, що розкриває комплексну архітектуру генеруючого об'єкта, де реалізовано подвійний механізм максимізації енерговидачі. Перший рівень забезпечує електронне відстеження пікових електричних параметрів, тоді як другий відповідає за фізичне просторове орієнтування приймальної площини вслід за переміщенням світила.

						Ар.
						59

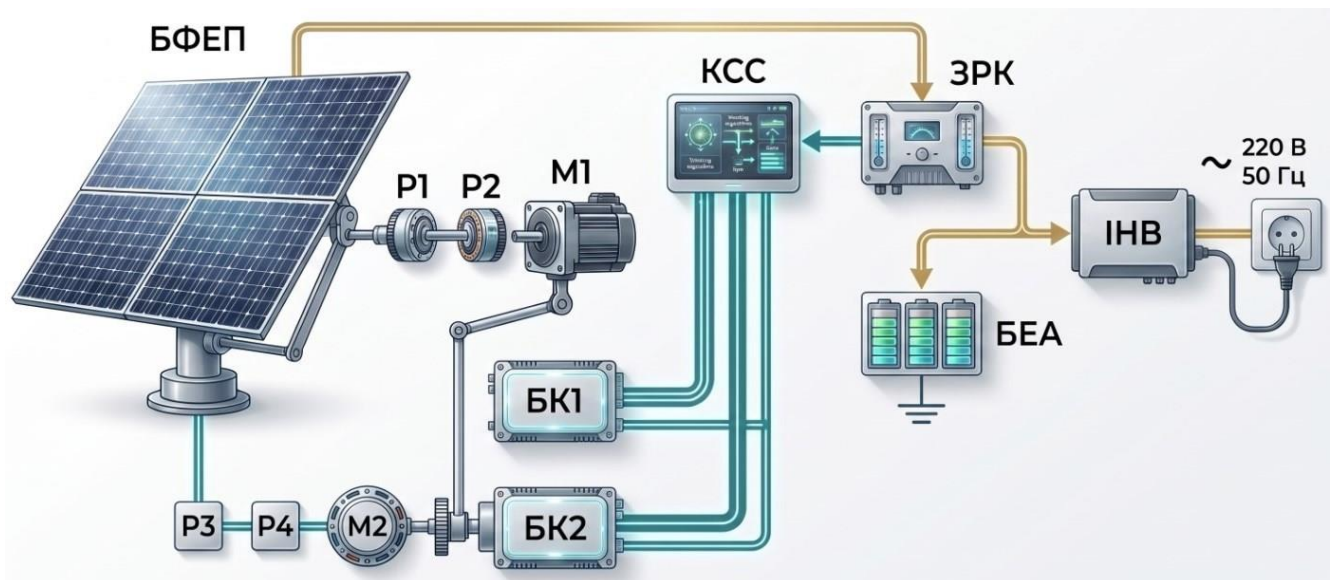


Рис. 7.1. Апаратно-структурна схема автономної геліостанції з інтеграцією двовісного позиціонування та динамічного MPPT-трекінгу

Центральним вузлом управління акумуляторним парком виступає спеціалізований контролер заряду-розряду. Цей мікропроцесорний пристрій виконує прецизійне балансування струмів, повністю нівелюючи ризики деградації хімічних джерел живлення внаслідок їх критичного виснаження або небезпечного перенасичення. Крім того, блок керування бере на себе функції теплового моніторингу та апаратного захисту від струмів короткого замикання, гарантуючи загальну експлуатаційну безпеку електротехнічного комплексу.

Сучасна номенклатура керуючих пристроїв поділяється на дві базові технологічні гілки: класичні широтно-імпульсні модулятори (ШІМ) та високотехнологічні трекери точки максимальної потужності (MPPT). Застосування ШІМ-регуляторів супроводжується фундаментальним недоліком – необхідністю жорсткої апаратної синхронізації вихідної напруги фотомодулів із робочими параметрами накопичувачів. Наприклад, формування стандартної шини на 12 вольтів вимагає чіткого послідовного комутування рівно тридцяти шести комірок, що суттєво обмежує гнучкість масштабування масивів. Будь-яка розбіжність

потенціалів у такій схемі призводить до незворотної дисипації (втрати) згенерованої електрики.

Зі свого боку, МРРТ-системи, незважаючи на складнішу мікроелектронну топологію, здатні підвищити загальний коефіцієнт конверсії щонайменше на 30%. Їхня обчислювальна логіка дозволяє динамічно адаптувати вхідний імпеданс до швидкоплинних змін інсоляційного фону, екстрагуючи максимум доступної енергії без прив'язки до поточного вольтажу батарей. Завдяки цій властивості підтримується стабільна генерація навіть за умов часткового затінення або екстремальних температурних флуктуацій. Сьогодні такі контролери легко інтегруються в екосистеми "Інтернету речей" (IoT) для віддаленої телеметрії та сумісні практично з усіма електрохімічними типами промислових акумуляторів. Відповідно, впровадження інтелектуальних трекерів є безальтернативним рішенням для побудови високоефективних острівних мікромереж.

Фінальна апаратна конфігурація автономної електростанції формується на основі глибокого аналізу локальних кліматичних патернів, географічних координат та добового графіка навантажень. У світовій практиці існує низка математичних методик розрахунку необхідних ємностей та генеруючих площ. Проте використання фірмових програмних калькуляторів від конкретних дистриб'юторів часто призводить до штучного завищення проєктних параметрів. Комерційно зацікавлені постачальники схильні закладати надлишкову потужність інверторів чи надмірну кількість панелей, що радикально завищує капітальні витрати (CAPEX) без реальної технічної потреби.

З огляду на зазначене, розробка об'єктивних, математично вивірених інженерних алгоритмів проєктування стає критичною вимогою. Науково обґрунтований підхід до визначення номіналів обладнання дасть змогу уникнути зайвих фінансових витрат та забезпечити найвищу експлуатаційну ефективність ізольованих енергосистем.

7.3. Математичні методи та алгоритми відстеження локального максимуму потужності фотоелектричних систем

Максимізація генерації електричної енергії напівпровідниковими масивами вимагає безперервного утримання їхнього робочого режиму в екстремальній точці вольт-ватної характеристики (VBX). Динамічний пошук та апаратна стабілізація цього енергетичного піку (MPPT – Maximum Power Point Tracking) дозволяють суттєво підвищити коефіцієнт використання встановленої потужності станції. За відсутності інтелектуального керування навантажувальними параметрами, лівова частка потенційної енерговидачі втрачатиметься через фізичну неузгодженість еквівалентного опору джерела струму та його приймача.

Сучасна інженерна практика пропонує розгалужений спектр стратегій локалізації екстремуму. Базовий перелік математичних підходів охоплює: алгоритм збурення та спостереження (Perturb and Observe, P&O), метод інкрементальної провідності (Incremental Conductance, InC), спосіб фіксованої частки напруги неробочого ходу (Fractional Voc), а також гібридні моделі та неймережеві підходи на базі нечіткої логіки (Fuzzy Logic).

Незважаючи на те, що провідні виробники інверторного обладнання імплементують власні закриті модифікації цих методів, їхнім фундаментальним ядром виступає циклічний ітераційний процес оптимізації. Ключовим індикатором ефективності будь-якої розробленої MPPT-системи є швидкість її конвергенції (часу збіжності до оптимуму) за умов швидких флуктуацій інсоляції та температурних градієнтів.

Алгоритм збурення та спостереження (P&O) базується на періодичному генеруванні дискретних інкрементів (приростів) робочої напруги шляхом зміни коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу (Duty Cycle) у DC/DC перетворювачі. Після кожної такої транзакції мікроконтролер обчислює актуальне значення згенерованої потужності та порівнює його з результатами попереднього такту. Якщо похідна ΔP має додатний знак, вектор напругового коригування залишається незмінним. У разі

фіксації від'ємного значення приросту ($\Delta P < 0$), електронна система ідентифікує проходження піку та миттєво реверсує напрямок наступного кроку.

Блок-схема ітераційного алгоритму збурення та спостереження (P&O) приведена на рис. 7.2. На рис. 7.2 детально розкрито логіку мікропроцесорного розгалуження, а також наочно показано послідовність математичних операцій керуючого контролера під час пошуку екстремуму.

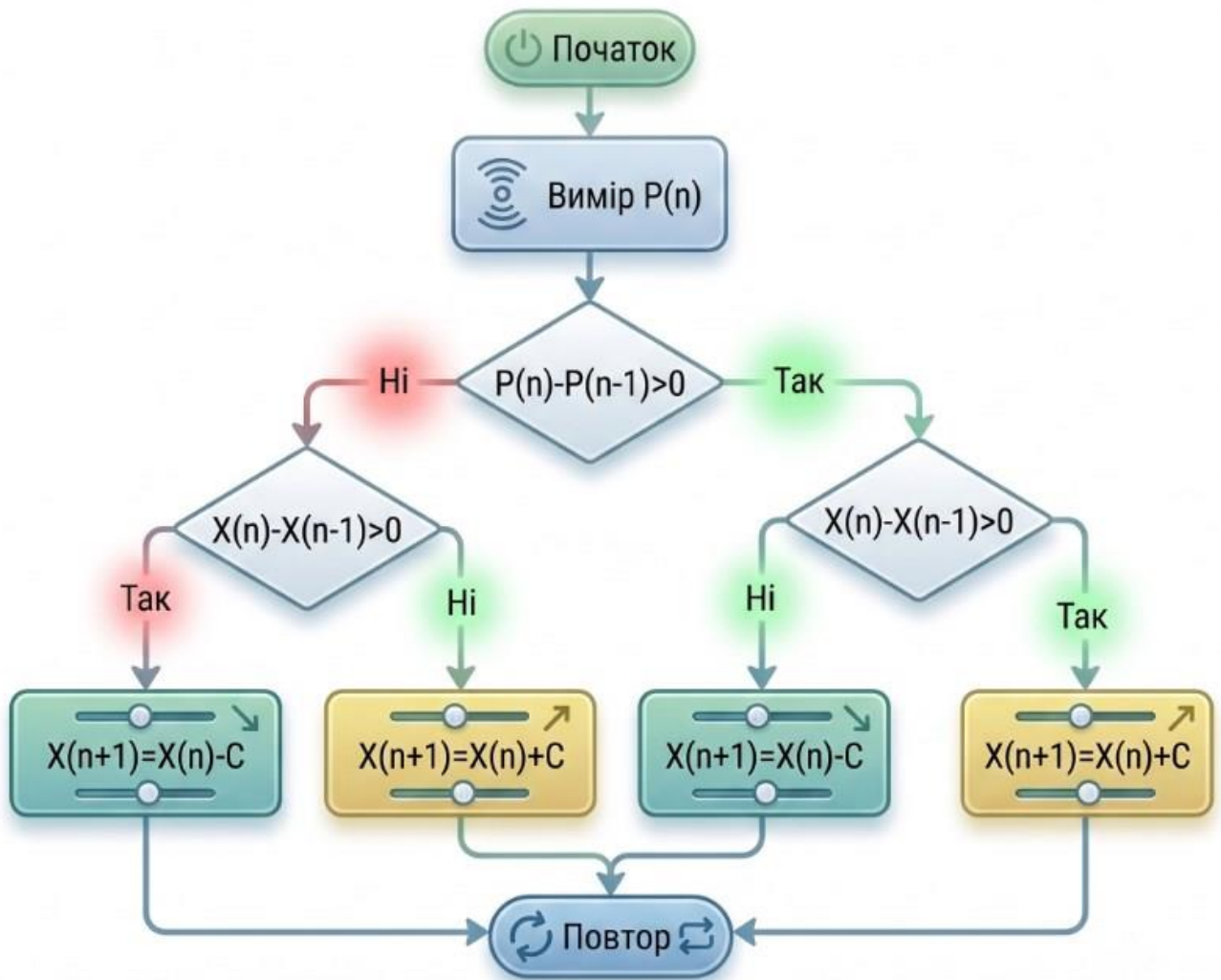


Рис. 7.2. Структурно-логічна блок-схема мікропроцесорної реалізації алгоритму збурення та спостереження (P&O) для оптимізації енерговидачі

Широка комерційна популярність описаної методики P&O пояснюється її мінімальним навантаженням на обчислювальне ядро процесора та високою легкістю написання програмного коду. Проте фундаментальним експлуатаційним недоліком цього математичного апарату є генерування незгасаючих сталих

автоколивань робочої точки безпосередньо навколо енергетичного максимуму. Амплітуда таких флуктуацій прямо пропорційна величині заданого кроку сканування, що неминуче призводить до відчутних енергетичних втрат, особливо під час мінливої хмарності.

З метою усунення паразитних автоколивань навколо екстремуму, які притаманні класичному методу збурення та спостереження (P&O), інженери імплементують адаптивні модифікації даної стратегії. У таких вдосконалених системах розмір напругового інкременту масштабується динамічно: крок звужується при наближенні до цільової координати і розширюється пропорційно до швидкості зміни метеорологічних умов.

Більш досконалим математичним підходом вважається метод інкрементальної провідності (Incremental Conductance, InC), який часто називають диференційним. Його фізико-аналітичне підґрунтя спирається на фундаментальну аксіому: похідна потужності за напругою (dP/dV) строго дорівнює нулю виключно на вершині вольт-ватної кривої сонячного модуля.

Аналізуючи знак цього диференціалу, обчислювальний блок здатний безпомилково визначати просторове положення робочої точки відносно максимуму. Логіка прийняття рішень мікроконтролером за методом інкрементальної провідності приведена на рис. 7.3. Суть підходу зводиться до безперервного порівняння параметрів миттєвої провідності стрінга (I/V) з показником її інкрементального приросту ($\Delta I/\Delta V$).

З алгебраїчної точки зору, процесор відстежує градієнт енерговидачі. Якщо сума $\Delta I/\Delta V + I/V = 0$, це є гарантованим індикатором досягнення ідеального режиму генерації, і подальше коригування вхідного імпедансу припиняється. Додатне значення диференціалу свідчить про розташування зліва від вершини графіка (необхідно піднімати напругу), а від'ємне — про перебування справа (система повинна зменшувати вольтаж). Як тільки оптичні сенсори фіксують флуктуації рівня інсоляції, що руйнують збалансовану рівність, керуючий цикл ініціюється знову.

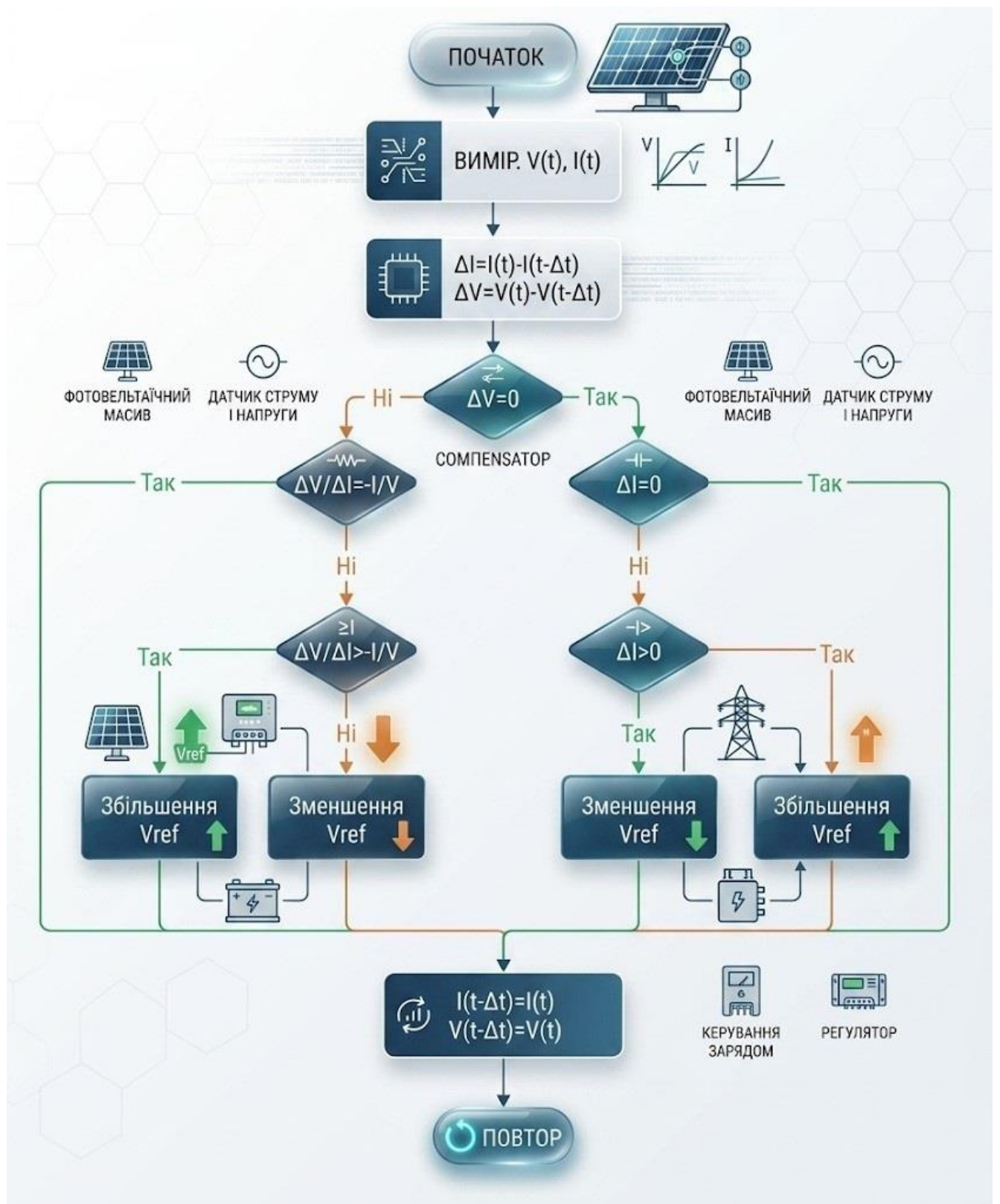


Рис. 7.3. Блок-схема мікропроцесорної реалізації алгоритму МРРТ на базі методу інкрементальної провідності (InC)

Головною перевагою диференційної стратегії (InC) порівняно з емпіричними алгоритмами є феноменально швидка конвергенція (збіжність) та практична відсутність втрат енергії через стаціонарні пульсації. Технологія InC дає змогу інвертору миттєво підлаштовуватися під різкі перепади освітленості (наприклад, під час швидкого проходження хмар) без тривалих перехідних блукань. Водночас слід пам'ятати, що паралельне обчислення диференціальних пропорцій створює серйозне навантаження на апаратну частину, вимагаючи застосування високошвидкісних цифрових сигнальних процесорів (DSP), що може збільшити фінальну вартість контролера.

Третім популярним напрямком є метод дробової напруги холостого ходу (Fractional Voc), який базується на утриманні стабілізованого потенціалу. Дана концепція спирається на емпірично доведену лінійну пропорцію між ідеальною напругою максимуму (V_{mpp}) та параметром повністю розімкнутого кола (V_{oc}).

Алгоритм керування за методом Fractional Voc циклічно ізолює фотоелектричний масив від споживача для вимірювання фактичної напруги неробочого стану. Наступним етапом мікросхема обчислює нову координату через множення отриманого значення на фіксований коефіцієнт k (для сучасних кремнієвих комірок він зазвичай лежить у межах 0,71 ... 0,78). Отримана в результаті такої апроксимації точка ніколи не збігається з абсолютним піком генерації на сто відсотків.

Незважаючи на певну похибку відстеження, технологія дробової напруги характеризується абсолютною стійкістю до екстремальних інсоляційних збурень. Завдяки мінімальним вимогам до тактової частоти процесора, такий алгоритм є найкращим вибором для ультрабюджетних PWM/MPPT зарядних пристроїв. У сучасній інженерії цей метод найчастіше слугує базовим компонентом складних гібридних систем: Fractional Voc забезпечує миттєве "грубе" наближення до зони оптимуму, після чого керування передається більш прецизійним алгоритмам типу InC чи P&O для остаточного доведення.

Гібридні (комбіновані) методики максимізації енерговидачі базуються на синергетичному поєднанні кількох фундаментальних стратегій керування.

						Ар.
						66

Найбільш раціональним інженерним рішенням у сучасній фотовольтаїці визнано інтеграцію методу дробової напруги холостого ходу (Fractional Voc) із прецизійними техніками – алгоритмом збурення та спостереження (P&O) або методом інкрементальної провідності (InC).

Блок-схема ітераційного процесу такої дворівневої системи приведена на рис. 7.4. Згідно з логікою гібридного підходу, пошуковий цикл розділяється на дві функціональні стадії. Початковий етап передбачає миттєве "грубе" наближення робочого вольтажу до зони очікуваного екстремуму за допомогою обчислення пропорції від напруги неробочого стану. Щойно контролер виводить систему у цю буферну зону, ініціюється друга фаза: процесор активує механізм покрокового сканування. Це забезпечує високоточне коригування параметрів та фіксацію абсолютного піку на вольт-вартній кривій генератора.

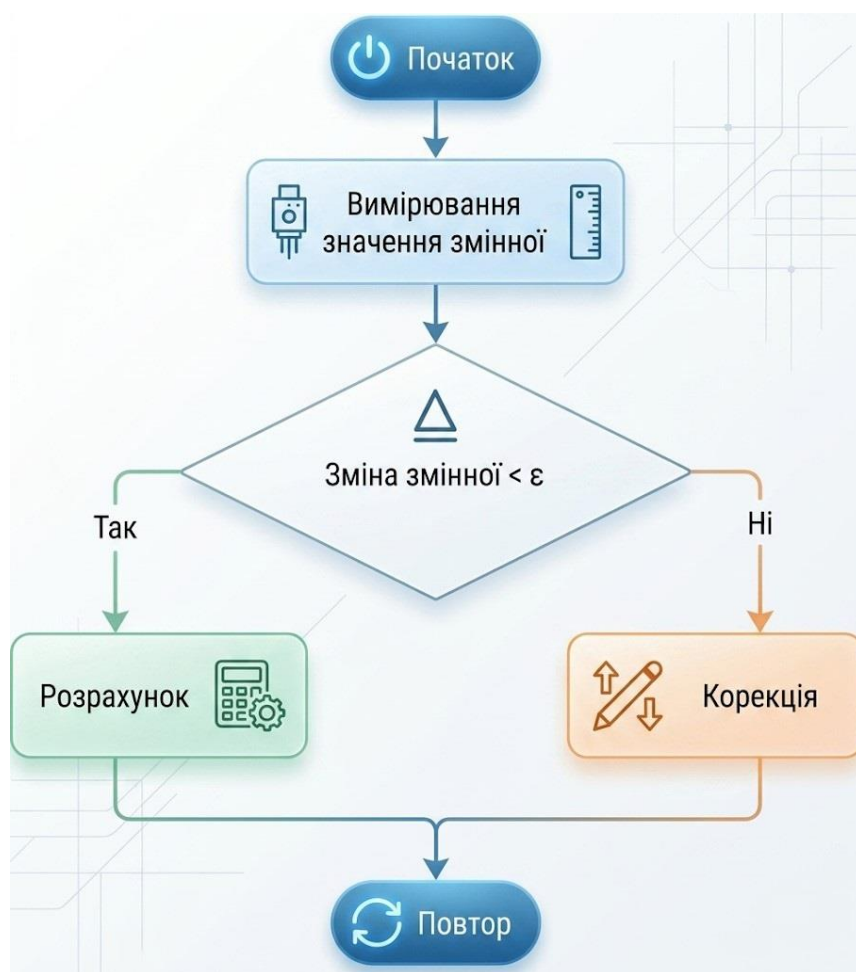


Рис. 7.4. Структурно-алгоритмічна схема дворівневого гібридного MPPT-контролера по комбінації методу Fractional Voc та прецизійного сканування

Запропонована двоступенева архітектура нівелює недоліки індивідуальних методів, поєднуючи блискавичну стартову оцінку із філігранною точністю фінального налаштування. Такий симбіоз гарантує високу стійкість мікроінвертора за умов аномальних температурних градієнтів чи раптового виникнення тіні.

Розглядаючи алгоритми другої стадії (точного доведення), варто акцентувати увагу на їхніх експлуатаційних особливостях. Класичний алгоритм збурення та спостереження (P&O) характеризується перманентним пошуком покращених параметрів: навіть вивівши панель в ідеальний режим, мікроконтролер продовжує генерувати тестові інкременти. Це неминуче провокує сталі автоколивання напруги та струму довкола екстремуму, навіть якщо рівень інсоляції залишається абсолютно незмінним. Внаслідок таких безперервних флуктуацій виникає хоч і незначна, але постійна дисипація (втрата) згенерованої енергії. Для придушення цього негативного явища розробники змушені впроваджувати адаптивні модифікації, де розмір кроку збурення експоненціально звужується при наближенні до вершини графіка.

Натомість метод інкрементальної провідності (InC), який базується на градієнтному аналізі, математично здатен розпізнати точну координату максимуму і повністю зупинити пошукові коливання. Проте його застосування супроводжується іншими викликами: під час стрімких флуктуацій освітленості (наприклад, швидкий рух хмар) обчислювальна логіка диференціалів може тимчасово втрачати математичну стійкість. Крім того, паралельний розрахунок співвідношень $\Delta I / \Delta U$ створює серйозне навантаження на обчислювальне ядро, що може знижувати тактову частоту моніторингу та викликати апаратні затримки реакції. Відповідно, вибір фінальної стратегії керування завжди є інженерним компромісом між швидкодією, точністю та обчислювальною вартістю мікропроцесора.

Окремої уваги потребують фізичні обмеження, притаманні методу дробової напруги (Fractional Voc), що застосовується на першій фазі гібридного циклу. Головним апаратним недоліком є необхідність регулярного відключення сонячного стрінга від споживача для апаратного вимірювання потенціалу розімкнутого кола.

Протягом цих коротких проміжків часу енергогенерація повністю зупиняється, що сумарно знижує загальний виробіток станції.

Додатковим фактором похибки є використання жорсткого коефіцієнта пропорційності (зазвичай на рівні 0,76 для кремнієвих кристалів). Дана константа є лише теоретичною апроксимацією. Під впливом інтенсивного теплового нагрівання фотокомірок, процесу їхньої природної деградації або зміни спектрального складу випромінювання, реальна координата максимальної потужності здатна критично зміщуватися. За таких нестандартних умов фіксований множник не відображає дійсної фізики процесу, що призводить до хибного первинного позиціонування та зниження сумарного коефіцієнта корисної дії інверторної установки.

7.4. Комп'ютерне моделювання мікропроцесорної системи MPPT на базі алгоритму покрокового екстремального регулювання

Жорсткі інженерні вимоги, що висуваються до мікроконтролерів екстремального керування, зумовлюють нагальну необхідність глибокого дослідження точності локалізації оптимуму. Ключовим параметром тут виступає розмір дискретного кроку зміни напруги стабілізації фотомодуля ($\Delta U_{\text{ст}}$). Крім того, критично важливо визначити загальні динамічні показники трекера, оскільки саме вони гарантують стійкість замкнутого контуру автоматики під час неминучого температурного або інсоляційного дрейфу вольт-ватної характеристики (BBX) генератора. Глибокий аналіз кореляції між величиною скануючого інкременту та похибкою утримання максимуму дає змогу знайти ідеальний компроміс: забезпечити блискавичну реакцію інвертора на зміну погоди, не провокуючи при цьому паразитних автоколивань у стаціонарних режимах.

Під час інженерного проектування ізольованих геліосистем, оснащених екстремальними покроковими контролерами (ЕПК), базовим завданням є достовірне прогнозування їхньої сумарної енергоефективності. Щоб кількісно оцінити вплив параметра $\Delta U_{\text{ст}}$ на загальні втрати потужності, було прийнято

						Ар.
						69

рішення про створення віртуального випробувального стенда. З цією метою у спеціалізованому програмному комплексі MATLAB Simulink реалізовано цифрову симуляційну модель автономної мікромережі. Структурно-функціональна схема розробленої комп'ютерної моделі приведена на рис. 7.5. Використання даного математичного інструментарію дозволяє з високою достовірністю досліджувати перехідні процеси та оптимізувати налаштування широтно-імпульсного модулятора до початку етапу фізичного макетування.

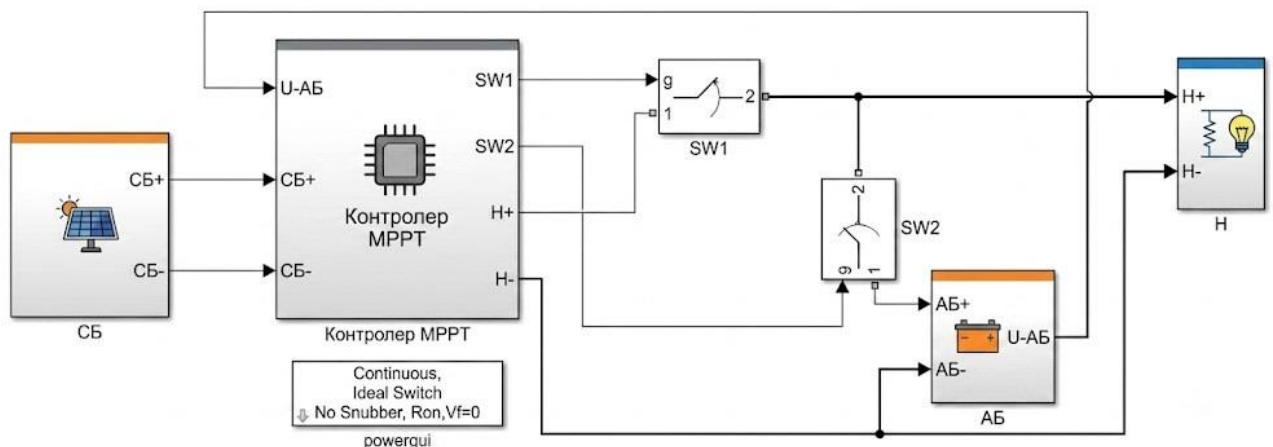


Рис. 7.5. Схема цифрової симуляційної моделі автономної ФЕС у середовищі MATLAB Simulink

Представлена на рис. 7.5 архітектура віртуальної установки включає такі базові підсистеми: математичну модель сонячного стрінга, електрохімічний акумуляторний стек, активне резистивне навантаження та безпосередньо сам інтелектуальний зарядний пристрій із закладеним алгоритмом покрокового сканування (P&O). Додатково впроваджено віртуальні силові контактори (SW1, SW2), призначенням яких є маршрутизація енергетичних потоків між генеруючою площиною, накопичувачами та кінцевим споживачем.

Безперервний моніторинг миттєвих значень струмів і потенціалів у вузлах схеми здійснюється за допомогою інтегрованих вимірювальних блоків (віртуальних вольтметрів, амперметрів) та багатоканальних осцилографів. Внутрішні параметри кожного цифрового компонента жорстко прив'язані до

паспортних специфікацій реального промислового обладнання та верифіковані попередніми натурними випробуваннями.

Проведена програмна імплементація забезпечує вичерпний інструментарій для поглибленого вивчення електромагнітних транзієнтів (перехідних явищ) та енергетичного балансу мікромережі. Створена віртуальна архітектура адекватно і з мінімальною похибкою відтворює фізику процесів, характерних для натурних геліостанцій. Отже, закладений математичний апарат є повністю валідним інструментом для розробки, тестування та фінального калібрування вдосконалених MPPT-контролерів. У наступних підрозділах буде наведено розгорнутий формалізований опис ключових ланок запропонованої симуляції.

Графічні результати комп'ютерного моделювання, що демонструють поведінку монокристалічних фотоперетворювачів (на прикладі модуля Altek ALM-180M-24 або його архітектурних аналогів), наведені на рис. 7.6. Отримана сукупність вольт-амперних (ВАХ) та вольт-ватних (ВВХ) залежностей переконливо доводить надвисоку чутливість вихідних електричних параметрів до просторового кута нахилу площини та поточних метеорологічних чинників. Фактичні значення напруги в точці максимальної потужності (V_{mpp}) під час реальної польової експлуатації коливаються у межах від 22 до 44 вольт.

Проведені розрахунки підтверджують, що таке радикальне зміщення екстремальної координати викликане складною синергетичною взаємодією кількох фізичних явищ: тепловим нагріванням напівпровідникового переходу, зміною щільності фотонного потоку та добовими флуктуаціями сонячного спектра. Детальне розуміння цих закономірностей відіграє фундаментальну роль під час програмного калібрування MPPT-алгоритмів, гарантуючи найвищий можливий рівень конверсії електромагнітного випромінювання.

Заводські специфікації досліджуваного модуля Altek ALM-180M-24 зазвичай регламентують робочий діапазон V_{mpp} у вузькому коридорі 22...35 В, що суттєво розбігається з отриманими емпіричними даними. Цей технічний парадокс має логічне пояснення: стандартизовані стендові тестування (STC) проводяться за ідеалізованої температури фотокомірки +25 °С. Натомість реальна робота на об'єкті

						Ар.
						71

супроводжується значно жорсткішими кліматичними перепадами, які неминуче провокують глибокий дрейф оптимального вольтажу.

Виявлені невідповідності між лабораторними сертифікатами та натурними вимірюваннями акцентують увагу на необхідності обов'язкового комп'ютерного моделювання систем з жорсткою прив'язкою до регіональної метеорології. Лише за умови інтеграції температурних коефіцієнтів деградації потужності інженер здатний достовірно оцінити річний виробіток мікромережі та оптимізувати математичну логіку керування інвертором.

Фізичний тепловий баланс генеруючої площини формується під впливом матеріалів конструкції, швидкості конвекційного охолодження вітром та рівня поглинання інфрачервоного спектра. Інструментальні заміри показують, що навіть морозного зимового дня, під час штилю та безхмарного неба, поверхня кристала здатна нагріватися на 10–20 °C вище за температуру навколишнього середовища. Спекотного літа відсутність природного обдування може розігріти фотоелементи на додаткові 30–40 °C відносно розігрітого повітря.

З огляду на вищезазначене, аналіз сімейства графіків на рис. 7.6 доводить: під час проєктування ізольованих систем слід закладати розрахунковий термодіапазон кристалів від -20 °C до +70 °C. Саме такі критичні градієнти викликають сумарний зсув потенціалу розімкнутого кола (V_{oc}) та робочого оптимуму (V_{mpp}) для типової 72-коміркової панелі (Altek ALM-180M-24) на вражаючу величину - близько 25 вольт.

Описані температурні флуктуації відіграють критичну роль у питаннях стабільності екстремальних контролерів, адже вони повністю змінюють просторове положення максимуму на енергетичній кривій. Створення безвідмовної апаратної автоматики вимагає програмного охоплення всіх гіпотетично можливих кліматичних сценаріїв. Виходячи з цього, вікно напругового сканування мікропроцесора зобов'язане перекривати смугу шириною щонайменше 30 В (а саме апаратний діапазон від 20 до 50 вольт).

Програмне закладення такого розширеного коридору пошуку (наочно проілюстрованого на рис. 7.6) гарантує безперебійне функціонування силової

						Ар.
						72

Керування

- ☐ ЯСНО
- ☒ ДИМКА
- ☐ ПАСМУРНО

Показати всі криві ☒

Показати MPP ☒

ПОРІВНЯННЯ ВСІХ

Значення за $U = 35 \text{ В}$ (вибрано)

Умова	I (Струм)	P (Потужність)
ясно	(value_clear_I)	(value_clear_P)
димка	(value_mid_I)	(value_mid_P)
пасмурно	(value_cloudy_I)	(value_cloudy_P)

Результати віртуального тестування перехідних процесів МРРТ-контролера, побудованого на базі ітераційного алгоритму збурення та спостереження (P&O), проілюстровано на рис. 7.7–7.9. Отримані в середовищі MATLAB Simulink часові розгортки фіксують ключові електричні координати (силу струму, напругу та сумарну генеруючу потужність) під час процедури захоплення екстремуму. Апаратне симулювання здійснювалося за умови абсолютно стабільного радіаційного фону без імітації хмарності. Це дозволило ізольовано дослідити вплив розміру керуючого кроку напруги (ΔU_{CT}) на поведінку цифрової автоматики при зафіксованій частоті оновлення сигналів мікропроцесора на рівні $\Delta f = 5$ Гц.

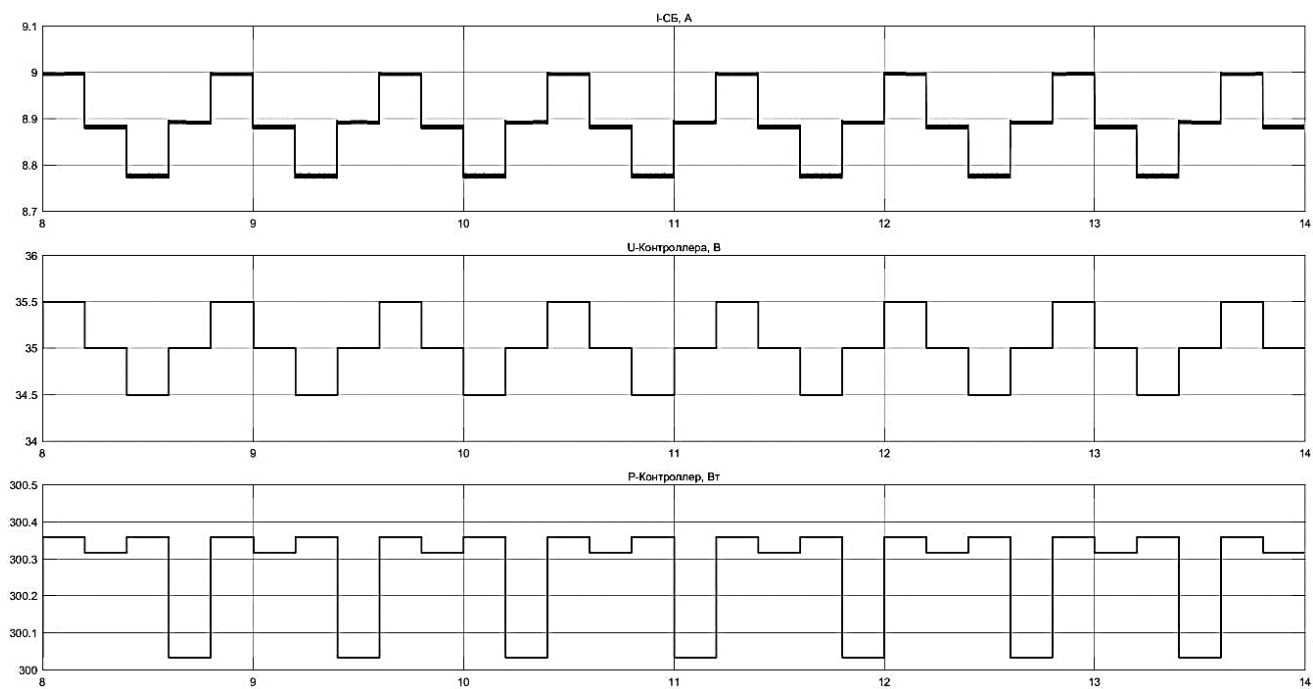


Рис. 7.7. Осцилограми перехідних процесів струму, напруги та вихідної потужності при мінімальному кроці сканування ($\Delta U_{\text{ст}} = 0,5 \text{ В}$, $\Delta f = 5 \text{ Гц}$)

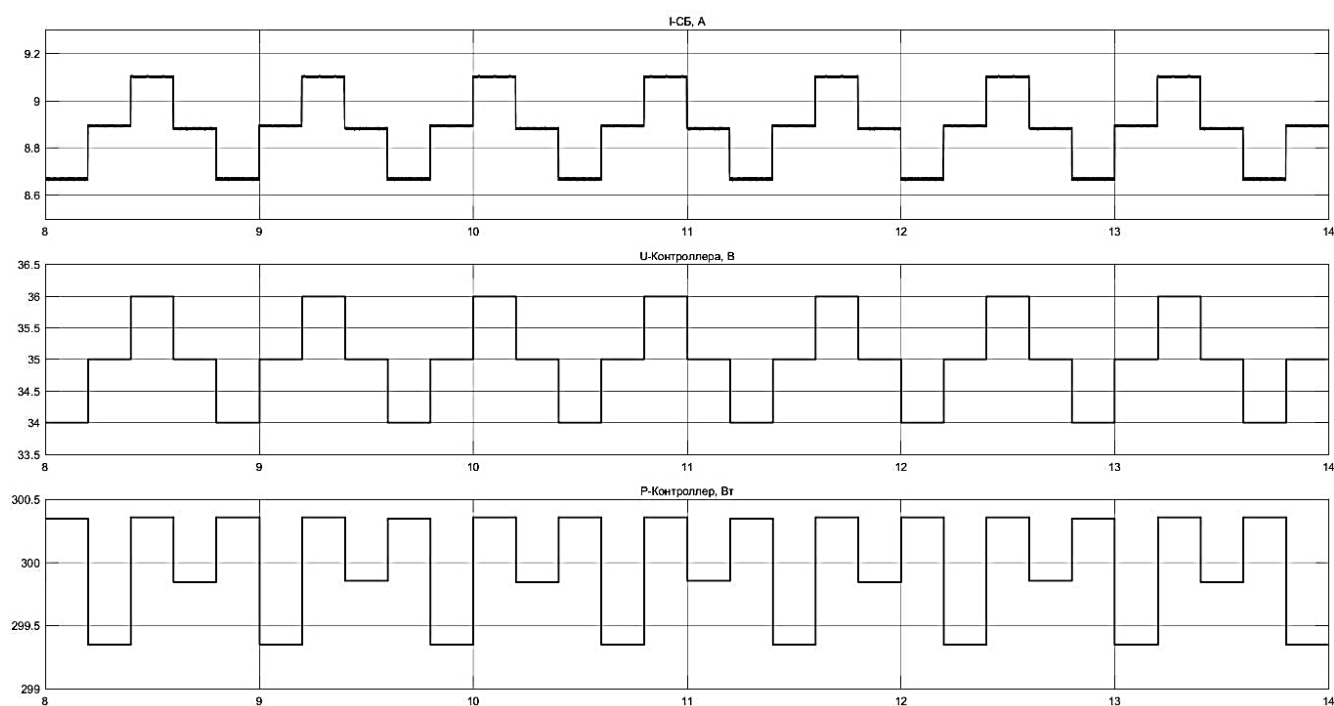


Рис. 7.8. Динаміка електричних параметрів системи під час пошуку екстремуму із середнім напруговим інкрементом ($\Delta U_{\text{ст}} = 1,0 \text{ В}$, $\Delta f = 5 \text{ Гц}$)

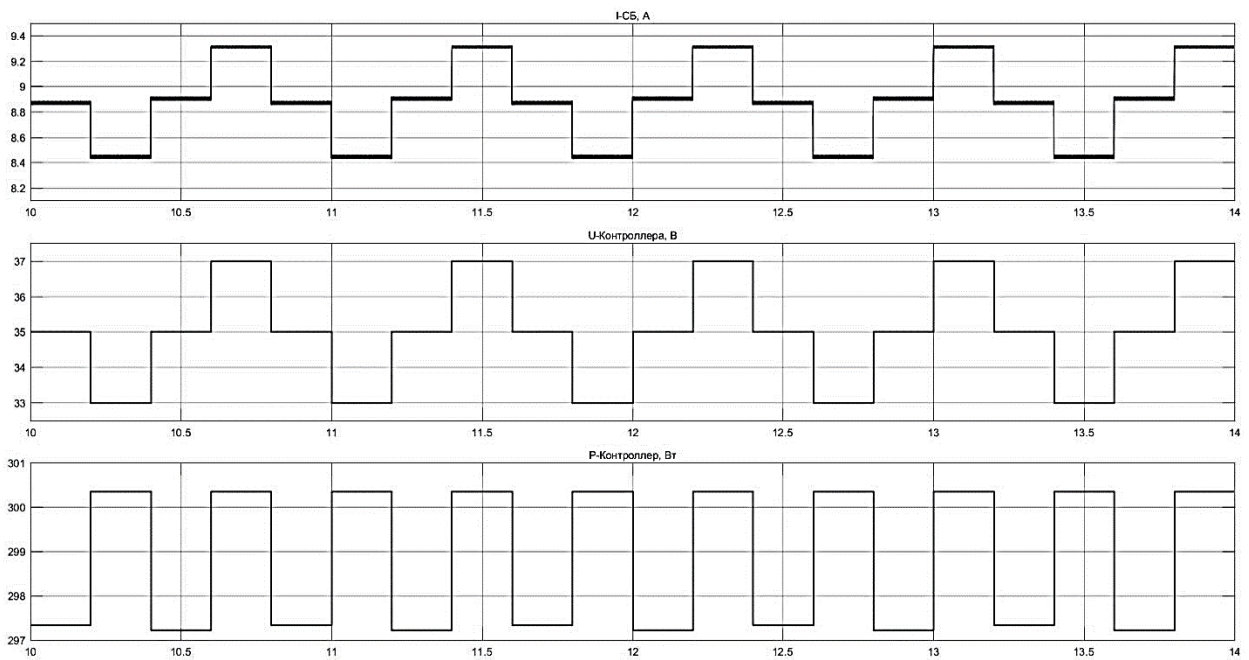


Рис. 7.9. Часові діаграми генерації за умов збільшеного кроку регулювання, що провокує зростання амплітуди пульсацій ($\Delta U_{\text{ст}} = 2,0 \text{ В}$, $\Delta f = 5 \text{ Гц}$)

Детальний аналіз наведених осцилограм чітко візуалізує фундаментальний компроміс дискретно-покрокової стратегії управління. Збільшення калібрувального інкременту $\Delta U_{\text{ст}}$ від 0,5 до 2,0 вольт очікувано скорочує час первинного виходу мікроінвертора на оптимальний режим. Проте одночасно з цим пропорційно розширюється амплітуда стаціонарних автоколивань навколо ідеальної точки максимуму (V_{mpp}). Саме ці безперервні флуктуації струму та напруги виступають головним джерелом паразитних втрат електроенергії в усталеному стані роботи станції.

Для об'єктивного кількісного оцінювання енергетичної ефективності застосованого математичного апарату було обчислено індекс втраченої (нереалізованої) генерації. Даний параметр (позначимо його як $P_{\text{втрат}}$) вираховується як відсоткова різниця між теоретичним максимумом напівпровідникового масиву (в ідеальних умовах) та фактично відібраною потужністю з урахуванням усіх робочих пульсацій. Функціональну залежність сумарних статичних втрат від обраної величини інкременту напруги наведено на рис. 7.10.

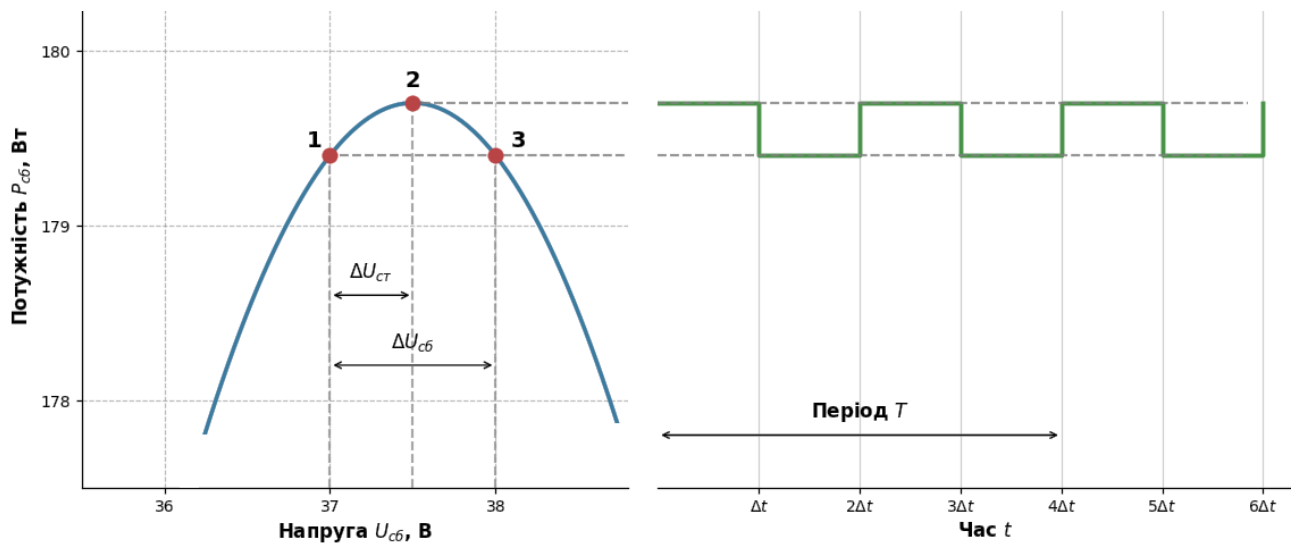


Рис. 7.11. Графічна інтерпретація двотактової траєкторії позиціонування робочої точки в зоні максимуму потужності

За такої математичної диспозиції будь-яка подальша зміна еквівалентного навантаження (незалежно від знаку) неминуче провокуватиме спад генерації. Подібна реакція системи виступає надійним маркерним сигналом для мікропроцесора: стрінг уже перебуває в зоні абсолютного максимуму (V_{mpp}), отже, продовження руху за попереднім вектором лише віддалятиме об'єкт від найвищого коефіцієнта корисної дії.

Загальна результативність класичного алгоритму збурення та спостереження у цьому контексті жорстко лімітується точністю стартової оцінки та фізичним розміром калібрувального інтервалу. Мікроскопічні прирости напруги гарантують філігранне позиціонування на графіку, проте критично уповільнюють швидкість реакції автоматики під час динамічного проходження хмар. Натомість надмірне розширення кроку суттєво форсує динаміку відстеження, але несе високий ризик інерційного "перескакування" через шуканий цільовий пік.

Що стосується апаратних рішень із вбудованими аналоговими вимірювальними ланцюгами, які використовують компаратори із гістерезисом у контурі зворотного зв'язку, то для них є притаманним трикроковий цикл оптимізації. Цей специфічний перехідний режим ініціюється кожного разу, коли система генерує керуючий імпульс величиною $\Delta U_{ст}$.

Фізичне явище гістерезису утворює так звану "мертву зону" (смугу нечутливості електронних компонентів). Знаходячись у межах цього буферного коридору, логічний контролер ігнорує незначні флуктуації енерговидачі, вважаючи їх шумовим фоном. Подібна схемотехнічна специфіка дає змогу обладнанню виконати один додатковий транзитний крок наближення ще до того моменту, як напрямок зміни градієнта потужності стане математично та апаратно очевидним.

Якщо ж архітектура керування інвертором базується на використанні високоточних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), то ймовірність виникнення тритактового перехідного процесу зводиться практично до нуля. Це пояснюється тим, що сучасна цифрова мікроелектроніка позбавлена так званих паразитних зон нечутливості (гістерезису). Завдяки феноменальній роздільній здатності вимірювальних трактів, процесор здатен детектувати навіть мікроскопічні флуктуації генерованої потужності. Відповідно, мікроконтролер безпомилково розпізнає знак градієнта (ΔP) та коригує вектор пошуку вже під час другої ітерації базового алгоритму. Отже, вибір елементної бази (аналогова компараторна чи повністю цифрова) фундаментально визначає не лише метрологічну похибку, а й безпосередньо формує топологію траєкторії відстеження екстремуму.

Окрім стаціонарних режимів експлуатації, на просторове положення енергетичних кривих (ВАХ та ВВХ) критично впливають швидкоплинні метеорологічні збурення. Найбільш типовим динамічним навантаженням для сонячної мікромережі є раптове затінення генеруючого масиву внаслідок руху щільних купчастих хмар. Зазвичай активна фаза такого падіння інсоляції триває всього 5–10 секунд, що викликає стрімке, майже миттєве просідання амплітуди робочого струму.

Водночас важливо акцентувати увагу на фундаментальній термодинамічній властивості напівпровідникових панелей – їхній масивній тепловій інерційності. Протягом короткого періоду затінення фізична температура кремнієвих кристалів просто не встигає суттєво змінитися. Завдяки цій термічній стабільності, координата напруги розімкнутого кола (V_{oc}) залишається на попередньому рівні.

Даний фізичний феномен значно спрощує математичне завдання для МРРТ-системи: алгоритму потрібно компенсувати виключно інсоляційний дрейф характеристик, повністю ігноруючи повільні температурні поправки.

В умовах екстремально швидких перепадів радіаційного фону логіка класичного покрокового регулювання (P&O) здатна перемикатися у специфічний однократковий (однокроковий) режим. Суть цього перехідного стану полягає в тому, що напрямок напругового інкременту примусово реверсується автоматикою після кожної окремої керуючої ітерації.

Графічна інтерпретація траєкторії захоплення максимуму (однокроковий алгоритм) в умовах нестабільної інсоляції приведена на рис. 7.12. Згідно з наведеною діаграмою, обчислювальний блок синхронно фіксує миттєві значення потужності у ключових вузлових позиціях (позначених як 2' та 3'). Розрахунок диференціалу між цими вимірами дозволяє процесору миттєво синтезувати оптимальний вектор подальшого напругового зміщення.

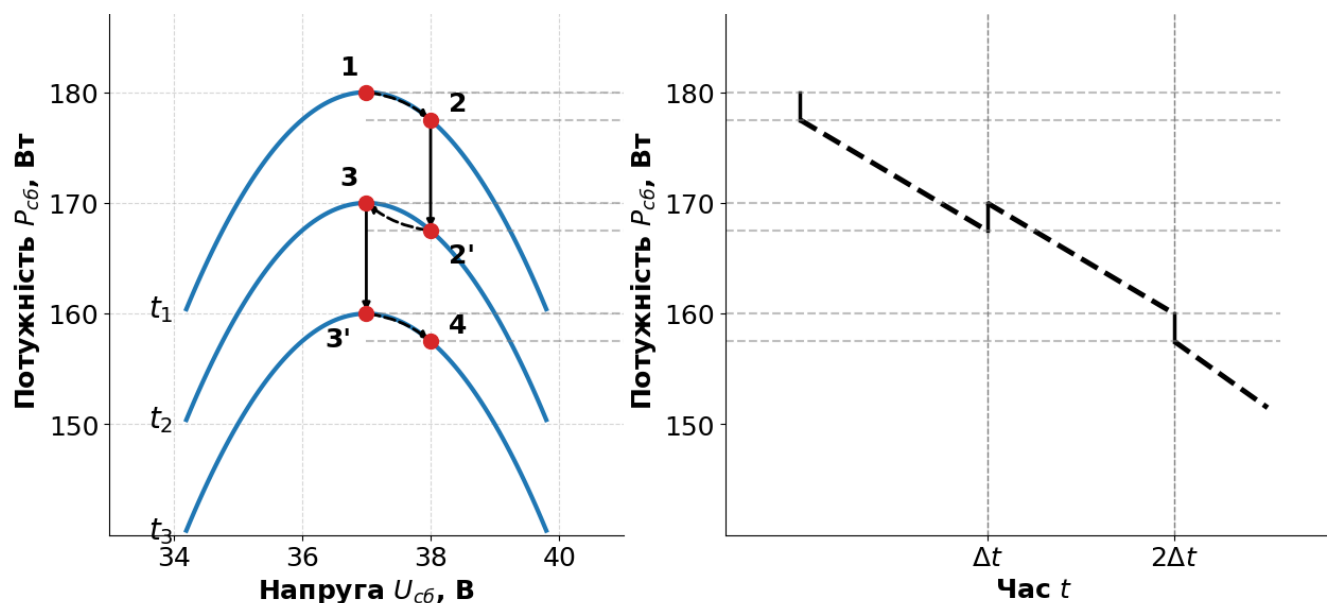


Рис. 7.12. Динаміка просторового зміщення робочої точки в однократковому режимі МРРТ за умов швидкоплинних флуктуацій радіаційного фону

Хоча такий однократковий формат гарантує максимально можливу швидкість реакції інвертора на зміну хмарності, його практична імплементація супроводжується певними програмними труднощами. Для утримання

константа є фундаментальною базою для проєктування алгоритмів МРРТ, адже вона диктує мінімально необхідну тактову частоту мікропроцесора. Математичний взаємозв'язок між швидкістю опитування апаратної частини та величиною скануючого інкременту описується наступним рівнянням (7.1):

$$\Delta t = 1/f_{o\pi} \leq \Delta U_{cT}/V_d \quad (7.1)$$

де V_d – максимальна швидкість температурного дрейфу напруги сонячної батареї в зоні абсолютного максимуму потужності; $f_{оп}$ – частота опитування датчиків; ΔU_{CT} – крок регулювання напруги.

Варто зауважити, що наведена пропорція гарантує стабільність контролера лише за ідеалізованого сценарію суто горизонтального зсуву вольт-ватної кривої (VBX). На практиці ж інтенсивне теплове нагрівання кремнію не лише зменшує робочий вольтаж, а й неминуче «просаджує» абсолютне значення пікової генерації. Графічну інтерпретацію цього складного діагонального дрейфу екстремальної точки наведено на рис. 7.14.

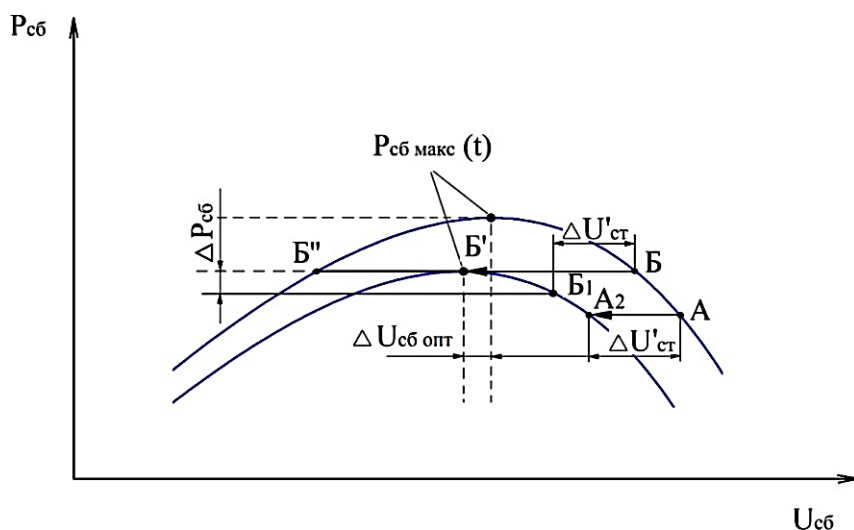


Рис. 7.14. Графічне представлення просторового дрейфу потужнісної характеристики фотовольтаїчного модуля

Якщо тактова частота інвертора підібрана неправильно (занадто повільно), автоматика може втратити орієнтир та увійти в реверсний (хибний) режим

функціонування. Щоб запобігти алгоритмічній дестабілізації та гарантовано втримати систему в зоні максимуму, мікропроцесорна логіка зобов'язана виконувати жорстку базову умову: $\Delta P_{cb} > 0$. З фізичної точки зору це означає, що штучний приріст потужності від чергового керованого кроку напруги (ΔU_{CT}) має із запасом перекивати природні втрати, викликані температурним просіданням самої генеруючої кривої. Хоча для глибокого теоретичного обґрунтування меж стійкості використовується складна математична апроксимація дрейфу через параболічні функції, ключовим інженерним критерієм надійності завжди залишається безперервне збереження додатного градієнта енерговидачі під час пошукового процесу.

Комплексний аналіз та результати проведеного комп'ютерного моделювання дають змогу чітко сформулювати оптимальні експлуатаційні параметри для розробки сучасних MPPT-контролерів заряду. Доведено, що для безпомилкової локалізації піку генерації (з урахуванням усього спектра погодних та температурних флуктуацій) апаратний діапазон сканування напруги повинен становити не менше 30 В. Правильність такого інженерного підходу повністю підтверджується фізичними характеристиками використаних фотомодулів, чия номінальна напруга за стандартних умов (STC, +25 °C) якраз дорівнює зазначеному показнику.

Створена цифрова симуляційна модель екстремального регулятора, яка функціонує за ітераційним алгоритмом покрокового сканування з інкрементом від 0,5 до 1,0 В, продемонструвала виняткову продуктивність. Запропонована апаратна конфігурація здатна стабільно екстрагувати понад 98% від теоретично можливого максимуму енергії напівпровідникового масиву. Відповідно, рівень незворотних втрат гарантовано утримується в межах 2%, що є відмінним показником для автономних мікромереж.

Здобуті результати переконливо доводять високу результативність застосування адаптивних градієнтних алгоритмів і формують надійне наукове підґрунтя для проектування автономних сонячних електростанцій підвищеної ефективності.

						Ар.
						82

ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена розробці комплексної схеми живлення індустриального підприємства з випуску хімічних реагентів, головна мета якої полягає у гарантуванні стабільного, безпечного та раціонального транспортування електрики до кожної групи технологічних приймачів.

Під час виконання поставлених завдань детально досліджено специфіку безперервних процесів синтезу речовин, сформовано архітектуру потужностей та розроблено точні добові діаграми використання енергоресурсів. Обчислено параметри струмів для робочих машин та систем освітлення в контурах напругою нижче та понад 1000 В. Завдяки цьому вдалося з'ясувати сумарні обсяги енергоспоживання заводу й аргументувати технічні критерії для підбору устаткування.

Знаходження характеристик перетікання реактивної енергії допомогло максимально ефективно підібрати конденсаторні установки для всіх ланок магістралі – як на стороні низького, так і високого вольтажу. Такий підхід гарантує відчутне скорочення марнотратства ресурсів, поліпшення загального коефіцієнта потужності, а також надійну стабілізацію потенціалу на розподільчих шинах цехів.

Спираючись на знайдені величини та специфіку роботи потужних хімічних агрегатів, було затверджено число і базові параметри знижувальних трансформаторів. При цьому суворо враховувалися умови гарячого резервування, оптимальні межі завантаженості та критерії безвідмовності. Обчислення величин аварійних замикань для ключових ділянок мережі дало змогу грамотно укомплектувати об'єкт високовольтною комутаційною апаратурою, котра повністю задовольняє жорсткі нормативи термічної витривалості та механічної міцності.

Розроблені інженерні кроки створюють міцний фундамент для безперебійної діяльності хімічного комплексу як за нормальних умов, так і під час позаштатних ситуацій, зводячи до мінімуму ймовірність раптових зупинок ліній та зайві фінансові витрати.

						Ар.
						83

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.