

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ

“___” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Розробка системи електропостачання
підприємства цементної промисловості»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

Андрій НАЙДА

«___» _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

Василь ЗІНЗУРА

«___» _____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

Найди Андрія Віталійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання підприємства цементної промисловості

Development of a power supply system for an enterprise in the cement industry

2. Керівник роботи Зінзура Василь Васильович, 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 розробка системи електропостачання підприємства цементної промисловості. Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання: 1. Провести розрахунок електричних навантажень. 2. Провести розрахунок картограми електричних навантажень. 3. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання. 4. Провести розрахунок режимів реактивної потужності системи електропостачання. 5. Здійснити вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства. 6. Провести розрахунок струмів коротких замкнень та здійснити вибір високовольтного обладнання. 7. Провести розрахунок спеціального розділу роботи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Дата видачі завдання
«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника _____ Василь ЗІНЗУРА

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____ Андрій НАЙДА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 85 с.; 26 рис.; 20 табл.; 5 джерел

Найда А. В. Розробка системи електропостачання підприємства цементної промисловості. – Рукопис.

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

Робота присвячена розробці надійної та енергоефективної системи електропостачання підприємства цементної промисловості. На основі розрахунку електричних навантажень оптимізовано розташування підстанцій, визначено кількість трансформаторів та спроектовано систему компенсації реактивної потужності. За критерієм мінімальних приведених витрат обґрунтовано вибір схем зовнішнього (КЛ 10 кВ) та внутрішнього (радіальна мережа) живлення.

Правильність рішень підтверджено розрахунками струмів короткого замикання та вибором сучасного високовольтного обладнання. У спеціальній частині досліджено ефективність впровадження гібридної сонячної мікромережі з накопичувачами енергії (LiFePO_4) та алгоритмами енергоменеджменту (EMS) для підвищення автономності підприємства.

Ключові слова: електропостачання, електричні навантаження, струми короткого замикання, компенсація реактивної потужності, сонячна електростанція

ABSTRACT

Qualification work: 85 p.; 26 Fig.; 20 tables; 5 sources

Naida A. Development of a power supply system for an enterprise in the cement industry. – 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 work is devoted to the development of a reliable and energy-efficient power supply system for a cement industry enterprise. Based on the calculation of electrical loads, the location of substations was optimized, the number of transformers was determined, and a reactive power compensation system was designed. The choice of external (10 kV overhead line) and internal (radial network) power supply schemes was justified using the criterion of minimum reduced costs.

The correctness of the solutions was confirmed by calculations of short-circuit currents and the selection of modern high-voltage equipment. In a special part, the effectiveness of implementing a hybrid solar microgrid with energy storage devices (LiFePO₄) and energy management algorithms (EMS) to increase the autonomy of the enterprise was investigated.

Keywords: power supply, electrical loads, short-circuit currents, reactive power compensation, solar power plant

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	10
1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ	10
1.2 Освітлювальні електричні навантаження.....	11
1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ	12
1.4 Графіки електричних навантажень заводу	16
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	21
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ	23
3.1 Схема зовнішнього електропостачання.....	23
3.2 Схема внутрішнього електропостачання	26
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	29
4.1 Баланс реактивної потужності.....	29
4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв	30
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	33
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	34
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	34
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ.....	41
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....	43
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	43
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	45
7.1 Мережі живлення на базі альтернативних енергоресурсів	45
7.2 Класифікація перетворювальних пристроїв СЕС.....	60
7.3 Проектування та аналіз перетворювального обладнання для фотоелектричних комплексів	71
7.4 Моделювання роботи фотоелектричної станції	75
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Найда А. В.				Розробка системи електропостачання підприємства цементної промисловості Development of a power supply system for an enterprise in the cement industry	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.	Зінзура В.В.						6	85
						ЦНТУ зр. ЕЕ-23мб		
Н. контр.	Зінзура В.В.							
Затвер.	Плешков П.Г.							

ВСТУП

Сучасний етап розвитку промисловості нерозривно пов'язаний із потребою у надійному, економічно ефективному та гнучкому енергозабезпеченні. Серед усього розмаїття промислових галузей будівельна індустрія, а зокрема виробництво цементу, займає особливе місце завдяки своїй стратегічній важливості та колосальній енергоемності. Цементні заводи – це підприємства з безперервним технологічним циклом, де ключове обладнання, таке як обертові випалювальні печі, кульові млини для помелу клінкеру та потужні конвеєрні лінії, працює цілодобово і споживає мегавати електроенергії. У таких умовах система електропостачання стає не просто допоміжною інфраструктурою, а справжньою кровоносною системою підприємства.

Специфіка цементного виробництва полягає в тому, що воно абсолютно не прощає перебоїв з живленням. Раптове знеструмлення обертової печі навіть на відносно короткий час може призвести до незворотних наслідків: температурних деформацій корпусу, застигання розпеченого матеріалу всередині агрегату та виходу з ладу дорогих вогнетривких футерівок. Зупинка сировинних чи цементних млинів під навантаженням означає тривалий і важкий процес їх ручного очищення та перезапуску. Кожна година простою такого заводу вимірюється величезними фінансовими збитками, недовипущеною продукцією та ризиками для безпеки персоналу. Саме тому до проектування електричної частини цементних заводів висуваються найвищі вимоги щодо надійності, безперебійності та резервування потужностей.

Проте сьогодні класичні підходи до проектування систем електропостачання стикаються з новими, безпрецедентними викликами. Енергетичний сектор України переживає найскладніший період у своїй історії. Внаслідок масштабних пошкоджень магістральних мереж, трансформаторних підстанцій та об'єктів базової генерації, об'єднана енергосистема працює в умовах хронічного дефіциту. Систематичні обмеження потужності, планові та аварійні відключення стали новою реальністю, до якої промисловість змушена

						7

адаптуватися. Стара парадигма, за якої велике підприємство могло покладатися на стовідсоткову стабільність централізованої електромережі, остаточно відійшла в минуле.

У цих жорстких умовах підприємства змушені трансформуватися з пасивних споживачів електроенергії в активних учасників енергетичного ринку – просьюмерів. Інтеграція власних генеруючих потужностей безпосередньо на території заводів стає питанням виживання, збереження конкурентоздатності та забезпечення енергетичної безпеки. Серед усіх доступних альтернатив найбільш перспективним та технологічно зрілим рішенням для промисловості сьогодні є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема фотоелектричних (сонячних) електростанцій у комбінації із сучасними системами накопичення.

Сонячна енергетика пройшла величезний шлях від дорогих експериментальних установок до масового комерційного продукту. Сучасні промислові інвертори з алгоритмами відстеження точки максимальної потужності (MPPT) здатні ефективно перетворювати сонячну радіацію на якісну електроенергію навіть за умов мінливої хмарності. Однак сама по собі сонячна генерація має суттєвий недолік – її графік не завжди співпадає з графіком споживання підприємства. Для вирішення цієї проблеми розробляються гібридні комплекси гарантованого енергозабезпечення, серцем яких є акумуляторні батареї (наприклад, літій-залізо-фосфатні акумулятори).

Застосування накопичувачів енергії під управлінням розумних систем енергоменеджменту (EMS) відкриває для підприємства абсолютно нові можливості. Це дозволяє реалізувати такі стратегії, як зсунення графіка навантаження (накопичення енергії в періоди надлишкового сонця або низьких нічних тарифів для використання у пікові години) та «зрізання піків» (Peak Shaving), що суттєво зменшує плату за замовлену потужність. Найважливіше ж те, що створення такої локальної мікромережі (microgrid) дозволяє заводу безшовно переходити в острівний режим роботи під час аварій в зовнішній мережі, підтримуючи життєдіяльність критичних вузлів до моменту відновлення централізованого живлення або безпечної зупинки агрегатів.

						8

З огляду на зазначене вище, розробка комплексного проекту електропостачання промислового підприємства, який поєднує в собі надійні класичні рішення з новітніми технологіями сонячної генерації, є надзвичайно актуальним завданням сучасної інженерії.

Даний проект присвячений саме розв'язанню цього комплексу питань на прикладі цементного заводу. Робота охоплює повний цикл проектування: від ретельного збору вихідних даних та розрахунку електричних навантажень до вибору оптимальної топології мережі та високовольтного обладнання. Особлива увага в проекті приділяється техніко-економічному обґрунтуванню прийнятих рішень – чи то вибір між повітряною і кабельною лінією живлення, чи оптимізація кількості трансформаторів та установок компенсації реактивної потужності. Окремим, дослідницьким напрямком роботи є розробка архітектури гібридної системи електропостачання з інтегрованими сонячними панелями та накопичувачами, що дозволяє вивести енергонезалежність та енергоефективність підприємства на якісно новий рівень, адаптований до викликів сьогодення.

						9

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ

Нижче продемонстровано приклад визначення параметрів потужності до 1000 В для термічної ділянки (лінія охолодження).

$$m = \frac{P_{H.max}}{P_{H.min}} = \frac{50,60}{3,04} = 16,6$$

$$P_{зм} = \sum P_H \cdot K_B = 372,42 \cdot 0,7 = 260,69 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \phi = 260,69 \cdot 0,62 = 161,63 \text{ квар}$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot \sum P_H}{P_{H.max}} = \frac{2 \cdot 372,42}{50,60} \approx 15$$

Згідно [1] значення $K_p = 1,16$.

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 260,69 \cdot 1,16 = 302,40 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 161,63 \text{ квар}$$

Підсумкові дані обчислень наведено в табл. 1.1.

						10

Таблиця 1.1. Показники силових навантажень до 1000 В

№	Назва об'єкта	N, шт	Pmin, кВт	Pmax, кВт	Pсум, кВт	m	Кв	cosφ	tgφ	Pзм, кВт	Qзм, квар	неф	Кр	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
1	Термічна дільниця (охолодження)	26	3,04	50,6	372,4	17	0,7	0,85	0,62	260,69	161,63	15	1,2	302,4	161,6	342,88
2	Випалювальний цех (нагрів)	30	3,04	50,6	470,6	17	0,8	0,95	0,33	376,46	124,23	19	1	376,5	124,2	396,43
3	Склад матеріалів та ТМЦ	16	3,04	50,6	167	17	0,6	0,85	0,62	91,84	56,94	7	1,4	129,5	62,63	143,84
4	Сховище вихідних компонентів	5	8,1	20,2	273,2	2,5	0,3	0,65	1,17	68,31	79,92	27	2,1	144,8	87,91	169,41
5	Цех сировинного помелу	50	10,1	50,6	2125	5	0,7	0,75	0,88	1487,6	1309,12	84	1,1	1607	1309	2072,5
6	Пункт зберігання клінкеру	10	2,02	25,3	151,8	13	0,3	0,7	1,02	45,54	46,45	12	1,6	73,77	51,09	89,73
7	Секція помелу цементу	15	20,2	101	485,8	5	0,7	0,75	0,88	340,03	299,23	10	1,2	408	329,2	524,25
8	Відділення теплової сушки	18	20,2	75,9	428,1	3,8	0,6	0,8	0,75	256,85	192,64	11	1,3	326,2	192,6	378,84
9	Цементне силосне господарство	17	5,06	40,5	237,8	8	0,3	0,7	1,02	71,35	72,78	12	1,6	111,3	72,78	132,99
10	Станція перекачування	4	28,3	28,3	113,3	1	0,6	0,7	1,02	68	69,36	8	1,5	104	76,3	129,02
11	Гаражний бокс підприємства	4	1,01	10,1	15,18	10	0,4	0,7	1,02	6,07	6,19	3	2,1	12,75	6,81	14,45
12	Адміністративний корпус	8	2,02	8,1	50,6	4	0,8	0,9	0,48	37,95	18,22	12	1,2	44,78	20,05	49,06
13	Харчоблок заводу	12	2,02	6,07	56,67	3	0,6	0,9	0,48	34	16,32	19	1,3	42,84	16,32	45,84
	РАЗОМ	215	1,01	101	4948	-	0,6	0,79	0,78	3144,7	2453,03	239	1,1	3684	2511	4457,8

1.2 Освітлювальні електричні навантаження

Методика обчислення параметрів освітлення для термічної ділянки (лінія охолодження) відображена далі.

$$P_{\text{BCT}} = F \cdot P_0 \cdot 10^{-3} = 1793 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 28,69 \text{ кВТ}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot K_1 \cdot P_{\text{БСТ}} = 0,95 \cdot 1,0 \cdot 28,69 = 27,26 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \phi = 27,26 \cdot 0,203 = 5,53 \text{ квар}$$

Результати обчислень по іншим об'єктам наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Показники освітлювальних навантажень

№	Назва цеху	$F, \text{ м}^2$	$P_0, \text{ Вт/м}^2$	$P_{\text{вст}}, \text{ кВт}$	$K_{\text{п}}$	K_1	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{р}}, \text{ кВт}$	$Q_{\text{р}}, \text{ квар}$	$S_{\text{р}}, \text{ кВА}$
1	Термічна дільниця (охолодження)	1793	16	28,69	0,95	1	0,98	0,2	27,26	5,53	27,82
2	Випалювальний цех (нагрів)	1971	16	31,54	0,95	1	0,98	0,2	29,96	6,08	30,57
3	Склад матеріалів та ТМЦ	1785	12	21,42	0,95	1	0,98	0,2	20,35	4,13	20,76
4	Сховище вихідних компонентів	688	12	8,26	0,95	1	0,98	0,2	7,85	1,59	8,01
5	Цех сировинного помелу	2186	14	30,6	0,95	1	0,98	0,2	29,07	5,9	29,66
6	Пункт зберігання клінкеру	1838	12	22,06	0,95	1	0,98	0,2	20,96	4,25	21,39
7	Секція помелу цементу	2514	14	35,2	0,95	1	0,95	0,33	33,44	11	35,2
8	Відділення теплової сушки	4101	15	61,52	0,95	1	0,98	0,2	58,44	11,9	59,63
9	Цементне силосне господарство	2514	16	40,22	0,95	1	0,98	0,2	38,21	7,76	38,99
10	Станція перекачування	656	12	7,87	0,6	1	0,98	0,2	4,72	0,96	4,82
11	Гаражний бокс підприємства	660	12	7,92	0,95	1	0,98	0,2	7,52	1,53	7,67
12	Адміністративний корпус	915	18	16,47	0,95	1	0,98	0,2	15,65	3,18	15,97
13	Харчоблок заводу	887	6	5,32	0,95	1	0,98	0,2	5,05	1,03	5,15
14	Промисловий майданчик	86890	0,1	8,69	1	1	0,98	0,2	8,69	1,76	8,87
	РАЗОМ			325,8					307,2	66,6	314,3

1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ

Результати обчислень навантажень вище 1 кВ приведені в табл.1.3.

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	N, шт	P _{min} , кВт	P _{max} , кВт	P _{сум} , кВт	m	K _в	cosφ	tgφ	P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар	пєф	K _р	P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
ТП1, 2															
Термічна дільниця (охолодження)															
силове:	26	3,04	50,6	372,42	16,6	0,7	0,85	0,6	260,69	161,63	15	1,16	302,4	161,63	342,88
освітлювальне:				28,69					27,26	5,53					
Всього:				289,38	162				329,66	167,16			369,11		
Випалювальний цех (нагрів)															
силове:	30	3,04	50,6	470,58	16,6	0,8	0,95	0,3	376,46	124,23	19	1	376,46	124,23	396,43
освітлювальне:				31,54					29,96	6,08					
Всього:				408,01	124				406,42	130,31			426,66		
Пункт зберігання клінкеру															
силове:	10	2,02	25,3	151,8	12,5	0,3	0,7	1	45,54	46,45	12	1,62	73,77	51,09	89,73
освітлювальне:				22,06					20,96	4,25					
Всього:				67,6	46,5				94,73	55,34			109,75		
Гаражний бокс підприємства															
силове:	4	1,01	10,1	15,18	10	0,4	0,7	1	6,07	6,19	3	2,1	12,75	6,81	14,45
освітлювальне:				7,92					7,52	1,53					
Всього:				13,99	6,19				20,27	8,34			21,94		
Адміністративний корпус															
силове:	8	2,02	8,1	50,6	4	0,8	0,9	0,5	37,95	18,22	12	1,18	44,78	20,05	49,06
освітлювальне:				16,47					15,65	3,18					
Всього:				54,42	18,2				60,43	23,23			64,68		
Харчоблок заводу															
силове:	12	2,02	6,07	56,67	3	0,6	0,9	0,5	34	16,32	19	1,26	42,84	16,32	45,84
освітлювальне:				5,32					5,05	1,03					
Всього:				39,32	16,3				47,89	17,35			50,93		
Відділення теплової сушки															
силове:	18	20,2	75,9	428,08	3,8	0,6	0,8	0,8	256,85	192,64	11	1,27	326,2	192,64	378,84
освітлювальне:				61,52					58,44	11,86					
Всього:				318,37	193				384,64	204,5			436,02		
Промисловий майданчик															
освітлювальне:				8,69					8,69	1,76					
Всього:				8,69	0				8,69	1,76			8,87		
Всього по ТП1, 2:															

Продовження табл. 1.3

силове:	108	1,01	75,9	1545,3	75,9	0,7	0,87	0,6	1017,57	565,43	41	1,1	1124,11	565,43	1258,31
освітлювальне:				182,19					173,52	35,23					
БК 0,4 кВ				-455,4					-455,4						
Всього 0.4 кВ ТП1, 2:				1199,8	110				1297,63	145,26			1305,73		
Втрати в ТП:									15,86	119,14					
Нтр: 3 шт.															
Стр, кВА: 630															
Кз = 0,69															
Всього 10 кВ ТП1, 2:									1313,48	264,4			1339,83		
ТПЗ															
Склад матеріалів та ТМЦ															
силове:	16	3,04	50,6	166,98	16,6	0,6	0,85	0,6	91,84	56,94	7	1,41	129,49	62,63	143,84
освітлювальне:				21,42					20,35	4,13					
Всього:				113,26	56,9				149,84	66,76			164,42		
Секція помелу цементу															
силове:	15	20,2	101	485,76	5	0,7	0,75	0,9	340,03	299,23	10	1,2	408,04	329,15	524,25
освітлювальне:				35,2					33,44	11					
Всього:				375,23	299				441,48	340,15			557		
Цементне силосне господарство															
силове:	17	5,06	40,5	237,82	8	0,3	0,7	1	71,35	72,78	12	1,56	111,31	72,78	132,99
освітлювальне:				40,22					38,21	7,76					
Всього:				111,57	72,8				149,52	80,54			169,57		
Станція перекачування															
силове:	4	28,3	28,3	113,34	1	0,6	0,7	1	68	69,36	8	1,53	104,04	76,3	129,02
освітлювальне:				7,87					4,72	0,96					
Всього:				75,87	69,4				108,76	77,26			133,27		
Всього по ТПЗ:															
силове:	52	3,04	101	1003,9	33,7	0,6	0,75	0,9	571,22	498,96	20	1,21	690,51	498,96	851,91
освітлювальне:				104,71					96,72	23,84					
БК 0,4 кВ				-202,4					-202,4						
Всього 0.4 кВ ТПЗ:				675,93	297				787,22	320,4			849,93		
Втрати в ТП:									10,23	77,63					
Нтр: 2 шт.															
Стр, кВА: 630															
Кз = 0,68															
Всього 10 кВ ТПЗ:									797,46	398,03			891,27		

Продовження табл. 1.3

ТП4, 5															
Сховище вихідних компонентів															
силове:	5	8,1	20,2	273,24	2,5	0,3	0,65	1,2	68,31	79,92	27	2,12	144,82	87,91	169,41
освітлювальне:				8,26					7,85	1,59					
Всього:				76,57	79,9				152,67	89,5			176,66		
Цех сировинного помелу															
силове:	50	10,1	50,6	2125,2	5	0,7	0,75	0,9	1487,64	1309,12	84	1,08	1606,65	1309,12	2072,47
освітлювальне:				30,6					29,07	5,9					
Всього:				1518,2	1309				1635,72	1315,02			2099,74		
Всього по ТП4, 5:															
силове:	55	8,1	50,6	2398,4	6,3	0,7	0,75	0,9	1555,95	1391,84	55	1,09	1698,96	1391,84	2196,28
освітлювальне:				38,86					36,92	7,49					
БК 0,4 кВ				-1265					-1265						
Всього 0,4 кВ ТП4, 5:				1594,8	127				1735,87	134,33			1741,06		
Втрати в ТП:									21,14	158,87					
Нтр: 4 шт.															
Стр, кВА: 630															
Кз = 0,69															
Всього 10 кВ ТП4, 5:									1757,01	293,21			1781,31		
Всього по об'єкту															
силове:	215	1,01	101	4947,7	101	0,6	0,99	0,2	3144,74	533,44	98	1,07	3363,76	533,44	3405,79
освітлювальне:				325,76					307,15	66,56					
Всього:				3470,5	533				3670,91	600			3719,62		
Потужність КП 0,4 кВ:				-1923					-1922,8						
Втрати в ТП:									47,23	355,65					
Всього по об'єкту:									3718,14	955,64			3838,98		
Високовольтне навантаження															
АД1, 2	2	607	607	1214,4		0,7	0,9	0,5	850,08	411,71			850,08	411,71	944,53
Всього високовольтного навант.:									850,08	411,71			944,53		
Всього по об'єкту 10 кВ:									4568,22	1367,35			4768,46		
КП 10 кВ:				-910,8											
Всього 10 кВ з КП:				4568,2	457				4590,99						
tgφ=0,1															

1.4 Графіки електричних навантажень заводу

Підсумкові показники обчислення параметрів режимів електроспоживання представлені далі по тексту.

Таблиця 1.4. Вихідна інформація щодо моделювання навантажувальних режимів

№	Робочі дні Р, %	Робочі дні Q, %	Вихідні дні Р, %	Вихідні дні Q, %
1	50,6	42,5	40,5	70,8
2	35,4	34,4	40,5	70,8
3	37,4	42,5	40,5	70,8
4	37,4	41,5	40,5	70,8
5	56,7	55,7	40,5	70,8
6	56,7	47,6	40,5	70,8
7	90,1	61,7	40,5	70,8
8	88	74,9	40,5	70,8
9	101,2	101,2	20,2	51,6
10	101,2	101,2	20,2	51,6
11	95,1	71,9	20,2	51,6
12	81	62,7	20,2	51,6
13	93,1	75,9	20,2	51,6
14	101,2	73,9	20,2	51,6
15	101,2	78,9	20,2	51,6
16	96,1	68,8	20,2	51,6
17	92,1	77,9	20,2	51,6
18	81	60,7	40,5	70,8
19	52,6	41,5	40,5	70,8
20	57,7	57,7	40,5	70,8
21	41,5	46,6	40,5	70,8
22	46,6	44,5	40,5	70,8
23	54,6	47,6	40,5	70,8
24	52,6	49,6	40,5	70,8

Таблиця 1.5. Результати розрахунків доб. графіків

№	Зимовий період (робочі дні)			Зимовий період (вихідні дні)			Літній період (робочі дні)			Літній період (вихідні дні)		
	Рд, кВт	Qд, квар	Сд, кВА	Рд, кВт	Qд, квар	Сд, кВА	Рд, кВт	Qд, квар	Сд, кВА	Рд, кВт	Qд, квар	Сд, кВА
1	2283	287	2301	1827	480	1889	1941	245	1956	1552	408	1605
2	1599	233	1616	1827	480	1889	1359	198	1373	1552	408	1605
3	1690	287	1714	1827	480	1889	1436	245	1457	1552	408	1605
4	1690	281	1713	1827	480	1889	1436	239	1456	1552	408	1605
5	2557	376	2584	1827	480	1889	2174	320	2197	1552	408	1605
6	2557	322	2577	1827	480	1889	2174	273	2191	1552	408	1605
7	4065	418	4086	1827	480	1889	3455	355	3473	1552	408	1605
8	3973	507	4005	1827	480	1889	3377	431	3404	1552	408	1605
9	4567	685	4618	914	349	978	3882	582	3925	776	297	831
10	4567	685	4618	914	349	978	3882	582	3925	776	297	831
11	4293	487	4321	914	349	978	3649	414	3672	776	297	831
12	3653	425	3678	914	349	978	3106	361	3127	776	297	831
13	4202	514	4233	914	349	978	3571	437	3598	776	297	831
14	4567	500	4594	914	349	978	3882	425	3905	776	297	831
15	4567	534	4598	914	349	978	3882	454	3908	776	297	831
16	4338	466	4363	914	349	978	3688	396	3709	776	297	831
17	4156	527	4189	914	349	978	3533	448	3561	776	297	831
18	3653	411	3676	1827	480	1889	3106	349	3126	1552	408	1605
19	2375	281	2392	1827	480	1889	2019	239	2033	1552	408	1605
20	2603	391	2632	1827	480	1889	2213	332	2238	1552	408	1605
21	1872	315	1898	1827	480	1889	1592	268	1614	1552	408	1605
22	2101	302	2123	1827	480	1889	1786	256	1804	1552	408	1605
23	2466	322	2487	1827	480	1889	2096	273	2114	1552	408	1605
24	2375	336	2399	1827	480	1889	2019	285	2039	1552	408	1605

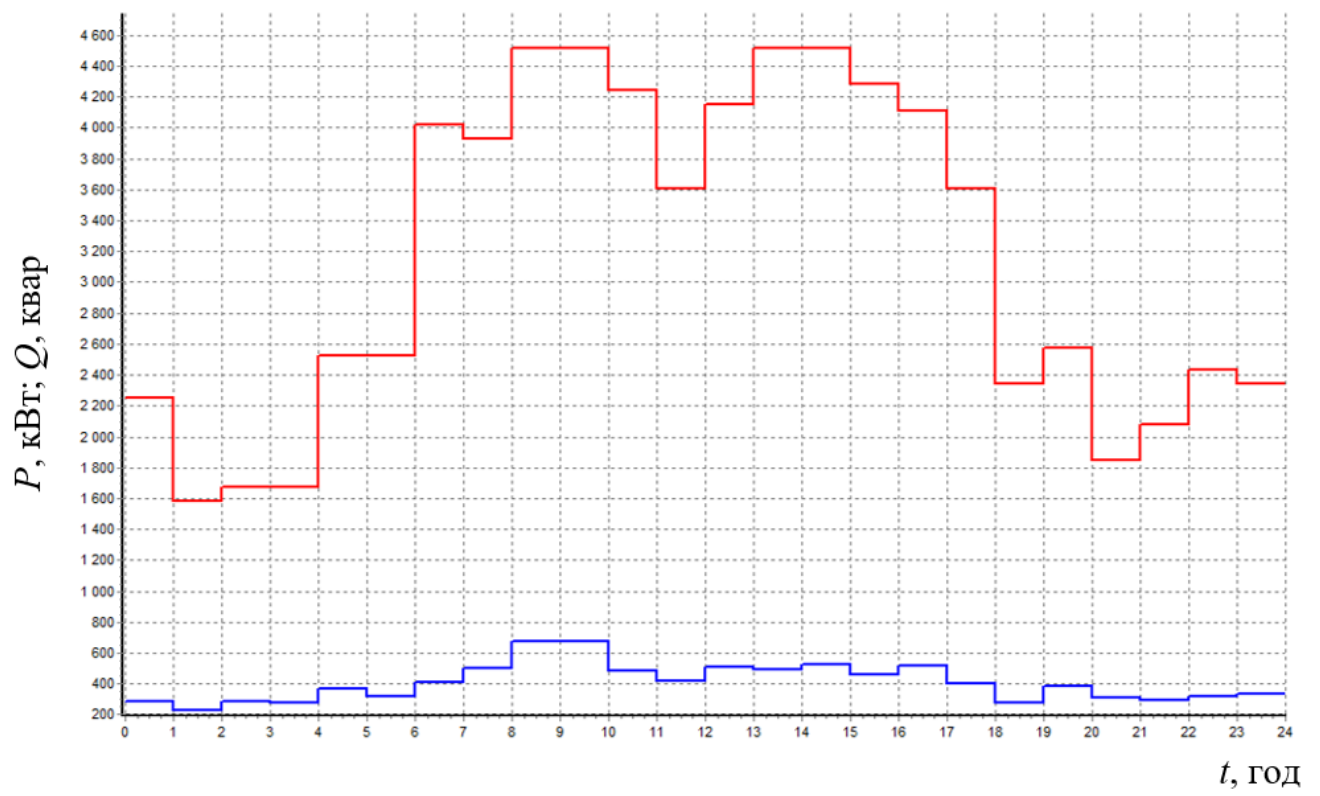


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

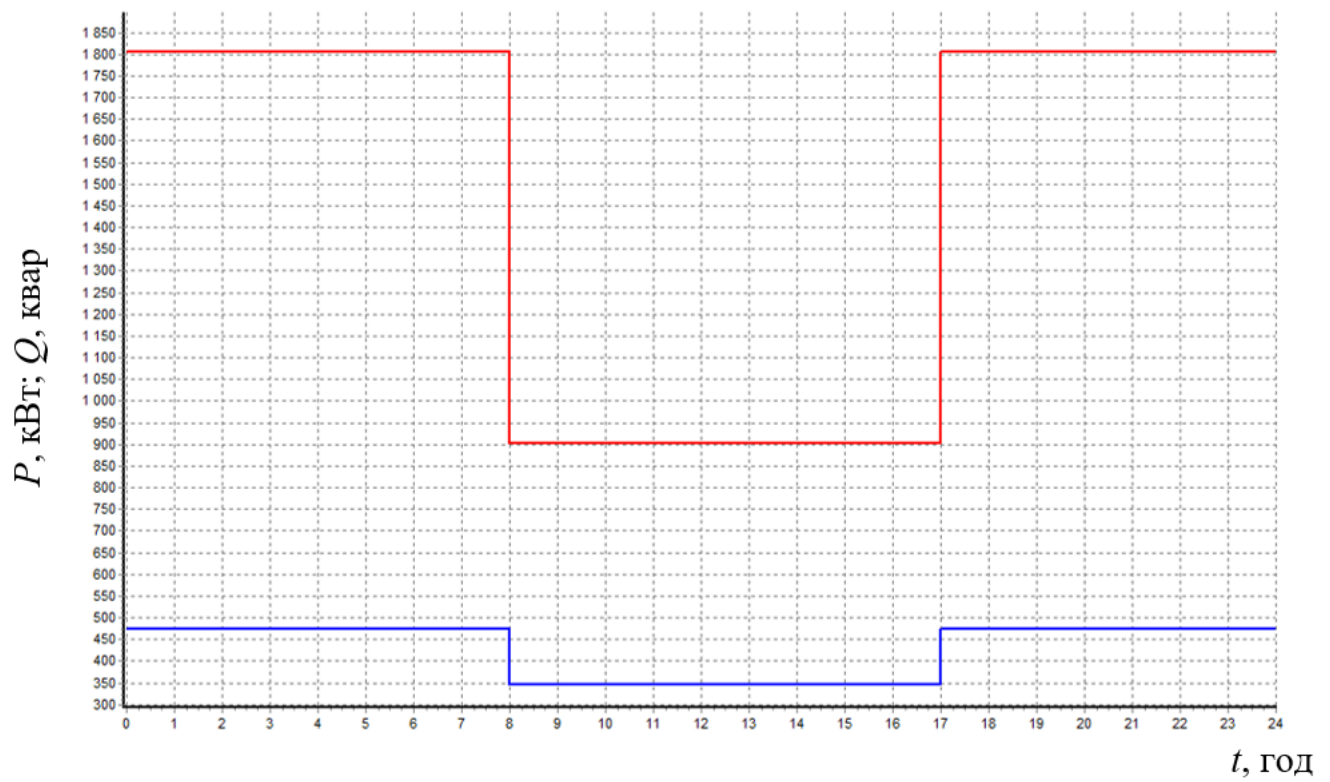


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (з.в.)

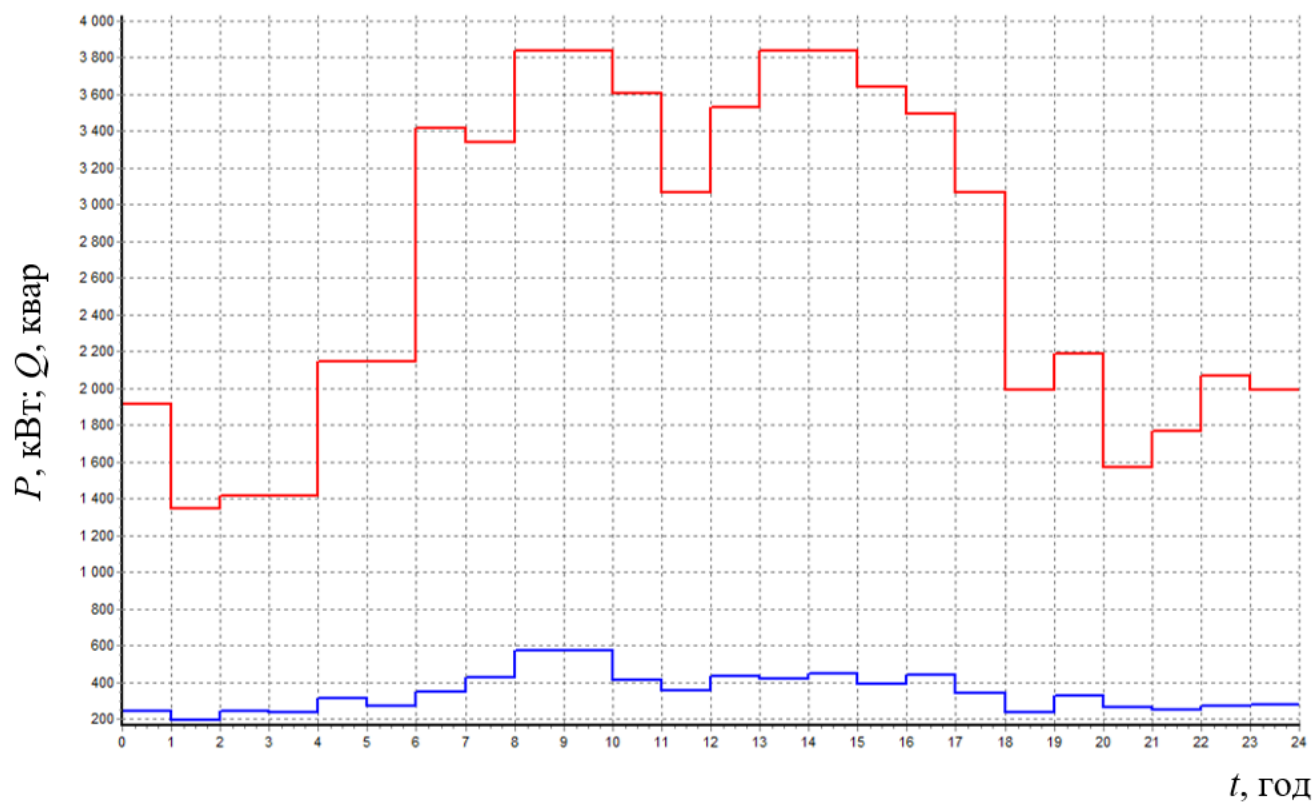


Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

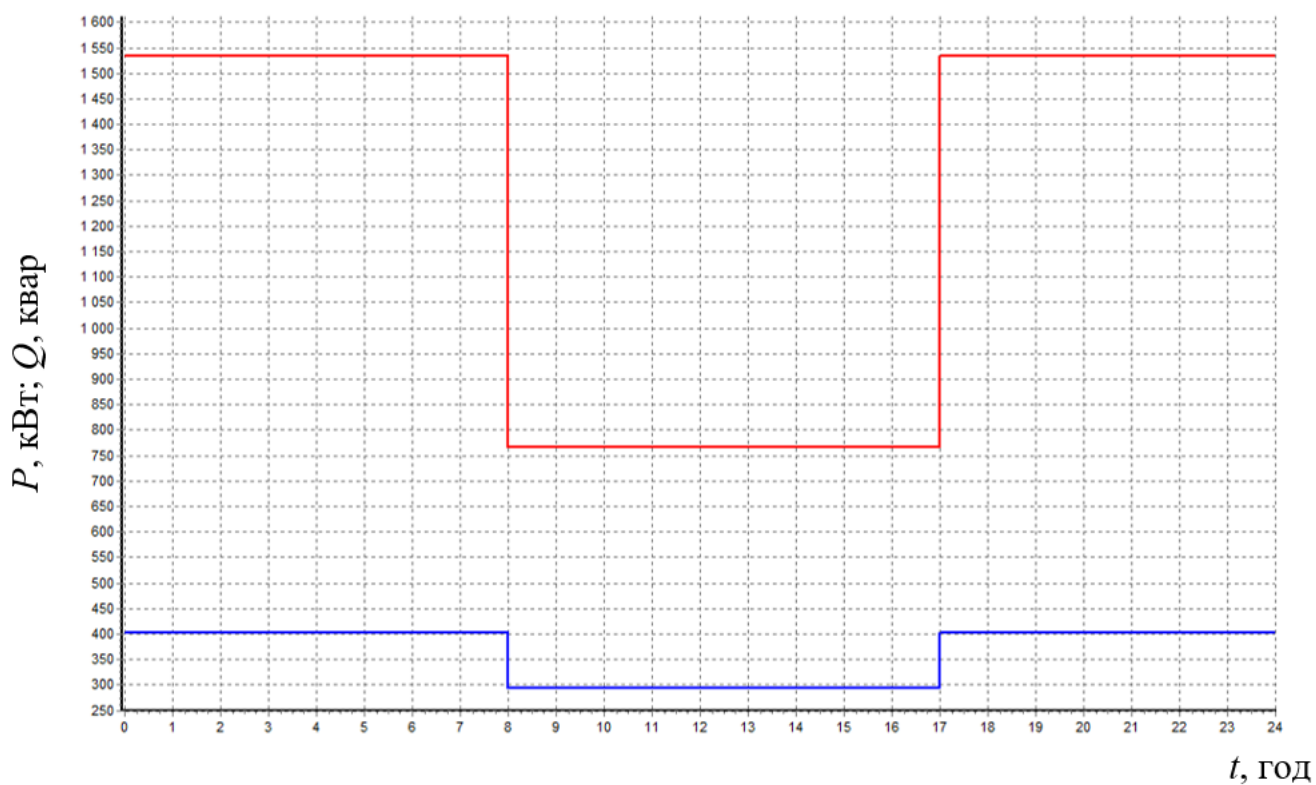


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

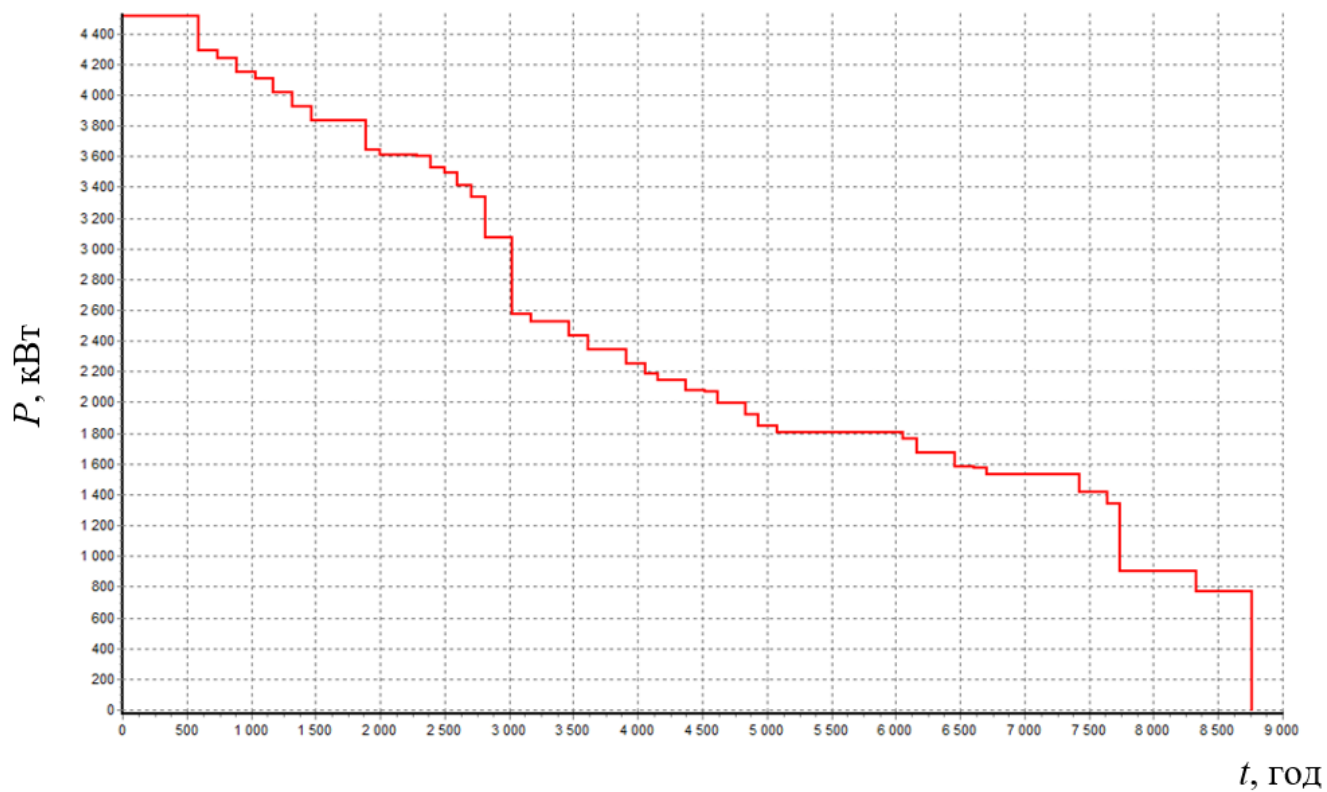


Рис. 1.5. Річний графік за тривалістю (Р)

Таблиця 1.6. Узагальнені параметри режимів електроспоживання

№	Назва параметру	Значення	Одиниця виміру
1	Spозр	4618,3	МВА
2	Wз.р.	11285535	кВт·год
3	Vз.р.	1454168	квар·год
4	Wз.в.	2315588	кВт·год
5	Vз.в.	671943	квар·год
6	Wл.р.	6852070	кВт·год
7	Vл.р.	882914	квар·год
8	Wл.в.	1453054	кВт·год
9	Vл.в.	421737	квар·год
10	Wрічн.	21906246	кВт·год
11	Vрічн.	3430762	квар·год
12	Tм	4859	год
13	тм	3235	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Обчислення геометричних розмірів кола термічної ділянки (охолодження):

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{302,40 + 27,26}{3,14 \cdot 0,2}} = 22,91 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}} \cdot 360^\circ}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{27,26 \cdot 360^\circ}{302,40 + 27,26} = 29,77^\circ$$

Результати аналогічних розрахунків щодо інших підрозділів підприємства згруповано у табл. 2.1.

Координати умовного центру електроспоживання:

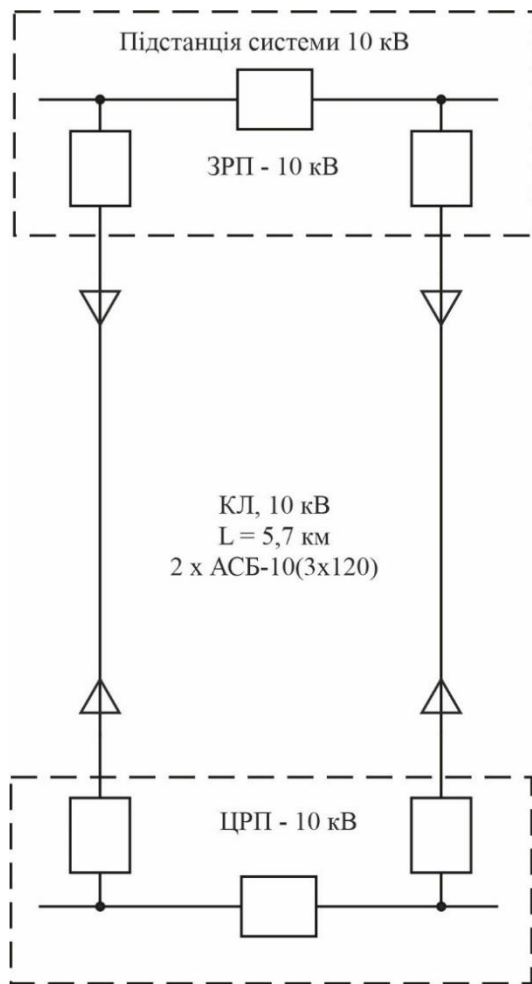
$$X = \frac{\sum_{j=1}^m X_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{468959,18}{4839,62} = 96,90 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{225284,31}{4839,62} = 46,55 \text{ м}$$

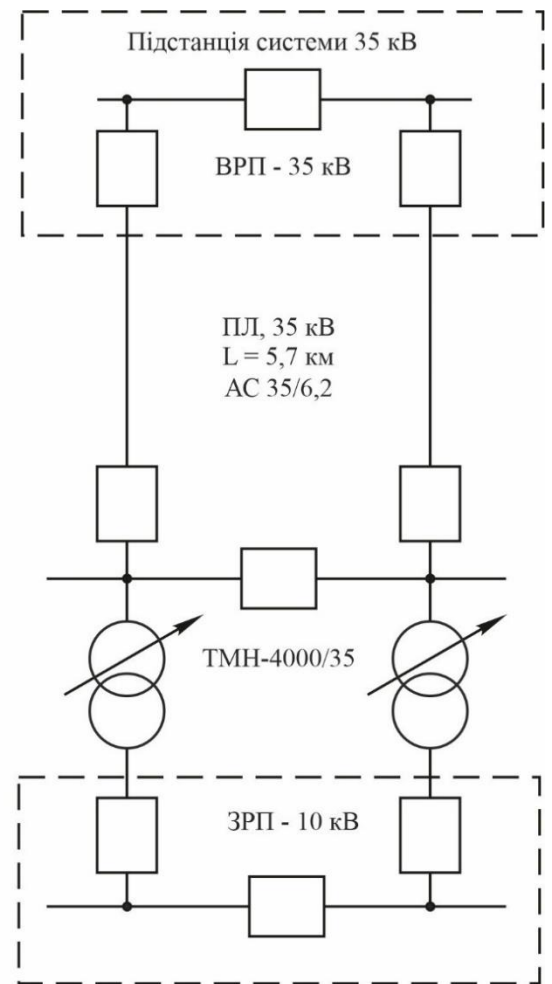
						21

Таблиця 2.1. Показники картограми електричних навантажень

№	Назва об'єкта	Рсил, кВт	Росв, кВт	P1, кВт	m	R, мм	α, град	х, м	у, м	P1·х, кВт·м	P1·у, кВт·м
1.	Термічна дільниця (охолодження)	302,4	27,26	329,66	0,2	22,91	29,77	17,2	133,58	5670,15	44035,98
2.	Випалювальний цех (нагрів)	376,46	29,96	406,42	0,2	25,44	26,54	153,82	133,58	62515,52	54289,58
3.	Склад матеріалів та ТМЦ	129,49	20,35	149,84	0,2	15,45	48,9	69,83	11,13	10463,33	1667,72
4.	Сховище вихідних компонентів	144,82	7,85	152,67	0,2	15,59	18,51	159,9	7,08	24411,93	1080,9
5.	Цех сировинного помелу										
	а) 0,4 кВ	1606,65	29,07	1635,72	0,2	51,04	6,4	116,38	12,14	190365,09	19857,64
	б) 10,5 кВ (АД)	850,08	0	850,08	0,2	36,8	0	116,38	12,14	98932,31	10319,97
6.	Пункт зберігання клінкеру	73,77	20,96	94,73	0,2	12,28	79,64	12,14	105,25	1150,02	9970,33
7.	Секція помелу цементу	408,04	33,44	441,48	0,2	26,51	27,27	16,19	49,59	7147,56	21893
8.	Відділення теплової сушки	326,2	58,44	384,64	0,2	24,75	54,69	89,06	113,34	34256,04	43595,1
9.	Цементне силосне господарство	111,31	38,21	149,52	0,2	15,43	92	24,29	16,19	3631,84	2420,73
10.	Станція перекачування	104,04	4,72	108,76	0,2	13,16	15,62	86,02	49,59	9355,54	5393,41
11.	Гаражний бокс підприємства	13,16	7,08	20,24	0,2	5,68	125,93	163,94	49,59	3318,15	1003,7
12.	Адміністративний корпус	44,53	15,18	59,71	0,2	9,75	91,52	163,94	105,25	9788,86	6284,48
13.	Харчоблок заводу	42,5	5,06	47,56	0,2	8,7	38,3	138,64	47,56	6593,72	2261,95
14.	Промисловий майданчик	0	9,11	9,11	0,2	3,81	360	153,82	133,58	1401,3	1216,91
	Всього по заводу	4532,75	306,87	4839,62						468959,18	225284,31



а)



б)

Рис. 3.1. Варіанти виконання зовнішньої мережі

$$K_{\text{зав}} = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{133,32}{240} = 0,56$$

$$\Delta P_{\text{л}} = \Delta P_{\text{1км}} \cdot l_{\text{сум}} \cdot K_{\text{зав}}^2 = 18 \cdot 11,54 \cdot 0,3136 = 65,14 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{кл}} = \Delta P_{\text{кл}} \cdot \tau_{\text{м}} = 65,14 \cdot 3235 = 210727,90 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$B_{\text{втрат}} = \Delta W_{\text{сум}} \cdot c_0 \cdot 0,001 = 210727,90 \cdot 8,98 \cdot 0,001 = 1892,34 \text{ тис. грн.}$$

Таблиця 3.1. Обчислення капітальних інвестицій

№	Найменування елементів	Одиниця	Кількість	Ціна, тис. грн	Сума, тис. грн
1	Кабельна магістраль 10 кВ	км	11,54	50,6	583,92
2	Земляна траншея	км	5,77	14,47	83,49
3	Комірки КРП	шт.	2	10,83	21,66
	РАЗОМ				689,07

Таблиця 3.2. Щорічні експлуатаційні видатки

№	Назва	K_j	P_{aj}	C_{aj}	P_{ej}	C_{ej}	C_j
1	Кабельна магістраль 10 кВ	583,92	5	29,2	5	29,2	58,4
2	Земляна траншея	83,49	5	4,17	5	4,17	8,34
3	Комірки КРП	21,66	15	3,25	5	1,08	4,33
	РАЗОМ						71,07

Обчислення приведених затрат:

$$3 = E_{\text{н}} \cdot K + C + B_{\text{втр}} + 3_{\text{б}} = 0,12 \cdot 689,07 + 71,07 + 1892,34 + 1,57 = 2047,67 \text{ тис. грн.}$$

Таблиця 3.3. Підсумкове зіставлення варіантів живлення

Критерій оцінки	Варіант 1	Варіант 2
Інвестиційні витрати, тис. грн	689,07	2076,67
Експлуатаційні видатки, тис. грн	71,07	379,2
Фінансовий еквівалент втрат електроенергії, тис. грн	1892,34	3334,55
Розмір очікуваних збитків, тис. грн	1,57	2,32
Приведені затрати, тис. грн	2047,67	3965,27

Оскільки перше технічне рішення характеризується значно меншими приведеними затратами, доцільно прийняти саме його для подальшої практичної реалізації.

3.2 Схема внутрішнього електропостачання

Організація внутрішньозаводського електропостачання є одним із найважливіших етапів проектування електричної частини промислового підприємства. Від правильного вибору конфігурації мережі залежить безперебійність технологічних процесів, безпека обслуговуючого персоналу, зручність експлуатації та загальні техніко-економічні показники виробництва. На практиці найчастіше застосовуються дві основні схеми внутрішнього розподілу електроенергії: радіальна та магістральна, а також їх комбінації (змішані схеми).

Враховуючи специфіку проектного об'єкта (наявність потужних споживачів, таких як цементні млини та пічні агрегати, безперервність технологічного циклу та високі вимоги до надійності), для внутрішньої схеми електропостачання приймається рішення обрати радіальну схему.

Цей вибір обґрунтовується низкою суттєвих переваг, які детально розглянуті нижче:

У класичній радіальній схемі кожна трансформаторна підстанція або окремий потужний приймач отримує живлення по індивідуальній лінії безпосередньо від головного розподільного щита (ГРЩ) або розподільного пункту (РП). Така топологія гарантує, що у випадку виникнення короткого замикання (КЗ) або іншого пошкодження на одній із ліній, спрацює захисний апарат лише цієї конкретної гілки. Усі інші цехи та підрозділи підприємства продовжать працювати в штатному режимі. Натомість у магістральній схемі аварія на головній магістралі або відмова вступного апарату неминуче призводить до повного знеструмлення всієї групи підключених споживачів («за місцем пошкодження»), що для пічного цеху чи відділення помелу означало б катастрофічну зупинку виробництва, застигання матеріалу в печах та величезні фінансові збитки.

Радіальна конфігурація мережі вирізняється максимальною прозорістю та зрозумілістю для оперативного та ремонтного персоналу. Кожна лінія має єдине джерело і єдиного споживача (або локальну групу). Це суттєво полегшує алгоритм

пошуку місця пошкодження під час аварійних ситуацій. Черговому електрику не потрібно обстежувати довгі ділянки зі шлейфовими відгалуженнями — достатньо перевірити конкретний кабель від комірки РП до щита споживача. Крім того, проведення планово-попереджувальних ремонтів (ППР) на окремій ділянці не потребує складних перемикань у системі: достатньо вивести в ремонт одну комірку, що забезпечує високий рівень безпеки для персоналу та мінімізує час простою обладнання.

Промислові підприємства схильні до модернізації: з часом можуть додаватися нові технологічні лінії, встановлюватися більш потужні двигуни або будуватися додаткові склади. Радіальна схема ідеально пристосована до таких змін. При зростанні навантаження або появи нового цеху достатньо прокласти новий кабель від резервної комірки головного розподільного пристрою до нового об'єкта. Це відбувається без будь-якої серйозної реконструкції існуючої діючої мережі. У випадку ж використання магістральної схеми, підключення потужного додаткового навантаження може призвести до перевантаження всієї магістралі, що вимагатиме її повного демонтажу та заміни на кабель або шинопровід більшого перерізу, що є надзвичайно трудомістким і дорогим процесом.

Оскільки кожна лінія у радіальній мережі є електрично і фізично незалежною, струми короткого замикання та просадки напруги під час пуску потужних двигунів мають менший вплив на суміжні лінії. Відключення однієї радіальної гілки не викликає каскадних відключень, які є характерною проблемою розгалужених магістральних мереж із невідкаліброваною селективністю релейного захисту. Це дозволяє зберігати стабільність напруги на клеммах чутливого обладнання (наприклад, систем автоматики та управління пічного цеху) навіть за умови важких пускових режимів у сусідніх відділеннях.

В умовах сучасного енергоменеджменту точний облік спожитої електроенергії набуває першочергового значення. Радіальна схема створює ідеальні умови для встановлення приладів технічного та комерційного обліку, а також систем телеметрії (АСКОЕ) для кожного окремого цеху безпосередньо в комірках ГРЩ. Це дозволяє диспетчеру в режимі реального часу відстежувати

споживання активної та реактивної потужності кожним підрозділом, контролювати коефіцієнт потужності ($\cos\phi$) та своєчасно виявляти ненормальні режими роботи (наприклад, перекоси фаз або появу вищих гармонік). У магістральній схемі організувати такий деталізований облік значно складніше та дорожче, оскільки датчики потрібно виносити безпосередньо до місць відгалужень.

Незважаючи на беззаперечні технічні переваги, об'єктивний аналіз вимагає вказати і на певні недоліки обраного рішення. Головним компромісом при впровадженні радіальної схеми є її підвищена капіталоємність. Вона потребує прокладання значно більшої сумарної довжини кабельних ліній (оскільки до кожного цеху йде свій кабель від єдиного центру), що тягне за собою збільшення обсягів земляних або монтажних робіт. Крім того, така схема вимагає встановлення більшої кількості комутаційної апаратури (високовольтних вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму) та відповідного розширення габаритів самого розподільного пристрою.

Однак, для підприємств будівельної індустрії (зокрема, цементних заводів), де збитки від раптової зупинки обладнання або браку продукції через перебої в електропостачанні в рази перевищують одноразові витрати на кабельну продукцію та комірки, початкове збільшення капітальних інвестицій є економічно виправданим. Висока надійність та ремонтпридатність радіальної мережі гарантовано окупаються протягом перших років експлуатації за рахунок зниження втрат від простоїв та зменшення експлуатаційних витрат на обслуговування.

Таблиця 4.1. Результати розрахунку балансу реактивної потужності об'єкта

№ вар.	К-сть трансформ.	Потужн. Q_l , квар	Потужність Q_{KH} , квар	Потужність Q_{KB} , квар
1	9	387,89	2192,71	421,91
2	10	1961,02	619,58	1995,04
3	11	2815,97	0	2614,62

4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв

Процедура підбору та розподілу пристроїв компенсації реактивної потужності (КП) для різних варіантів конфігурації підстанцій наведена нижче.

Таблиця 4.2. Підсумки вибору та розміщення КП (при $\$N_T = 9\$$ шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{розр}$, кВт	$Q_{розр}$, квар	$Q_{проп}$, квар	$Q_{комп}$, квар	К-сть БСК	$Q_{BKсум}$, квар	$Q_{кл} - Q_{бк}$, квар	$K_{зав}$	$S_{розр}$, кВА
ТП1,2	3	1313,34	719,09	159,58	559,51	2·150; 1·250	550	9,51	0,7	1324,18
ТПЗ	2	796,48	595,2	378,87	216,33	2·100	200	16,33	0,71	889,14
ТП4,5	4	1756,92	1557,74	157,89	1399,85	4·150; 4·200	1400	-0,15	0,7	1763,99

Таблиця 4.3. Підсумки вибору та розміщення КП (при $\$N_T = 10\$$ шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{розр}$, кВт	$Q_{розр}$, квар	$Q_{проп}$, квар	$Q_{комп}$, квар	К-сть БСК	$Q_{BKсум}$, квар	$Q_{кл} - Q_{бк}$, квар	$K_{зав}$	$S_{розр}$, кВА
ТП1,2	3	1313,34	719,09	159,58	559,51	2·150; 1·250	550	9,51	0,7	1324,18
ТПЗ	2	796,48	595,2	378,87	216,33	2·100	200	16,33	0,71	889,14
ТП4,5	5	1756,92	1557,74	1332,39	225,35	4·50	200	25,35	0,7	2220,4

Таблиця 4.4. Підсумки вибору та розміщення КП (при $\$N_T = 11\$$ шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{розр}$, кВт	$Q_{розр}$, квар	$Q_{проп}$, квар	$Q_{комп}$, квар	К-сть БСК	$Q_{BKсум}$, квар	$Q_{кл} - Q_{бк}$, квар	$K_{зав}$	$S_{розр}$, кВА
ТП1,2	4	1313,34	719,09	1177,64	0	-	0	0	0,59	1497,32
ТПЗ	2	796,48	595,2	378,87	216,33	2·100	200	16,33	0,71	889,14
ТП4,5	5	1756,92	1557,74	1332,39	225,35	4·50	200	25,35	0,7	2220,4

Обчислення втрат активної потужності:

$$\Delta P_{\text{БКН}} = P_{\text{пит}} \cdot Q_{\text{БКН}} = 0,0045 \cdot 1925 = 8,66 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{\text{БКВ}} = P_{\text{пит}} \cdot Q_{\text{БКВ}} = 0,003 \cdot 911 = 2,73 \text{ кВт}$$

Капітальні інвестиції в компенсувальні установки:

$$K_{\text{БКН}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_i = 2 \cdot 26,78 + 4 \cdot 28,42 + 3 \cdot 34,34 + 4 \cdot 38,80 = 425,46 \text{ тис. грн.}$$

$$K_{\text{БКВ}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot K_i = 2 \cdot 117,40 = 234,80 \text{ тис. грн.}$$

Капіталовкладення в трансформаторні підстанції:

$$K_{\text{ТП}} = 4 \cdot 6456,50 + 1 \cdot 3415,50 = 29241,50 \text{ тис. грн.}$$

Визначення приведених затрат:

$$\begin{aligned} Z &= E_{\text{н}} \cdot (K_{\text{БКН}} + K_{\text{БКВ}} + K_{\text{ТП}}) + C_0 \cdot \tau_{\text{м}} \cdot (\Delta P_{\text{БКН}} + \Delta P_{\text{БКВ}} + \Delta P_{\text{Т}}) \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,12 \cdot (425,46 + 234,80 + 29241,50) + 8,98 \cdot 3235 \cdot (8,66 + 2,73 + 28,36) \\ &\quad \cdot 10^{-3} = 4742,96 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

У табл. 4.5 згруповано результати економічних обчислень для решти технічних рішень.

						31

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Еквівалентні опори елементів системи:

$$X_c = \frac{U_{\text{cp.ном}}^2}{S_{\text{к.з.}}} = \frac{10,5^2}{100} = 1,103 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{1,103}{25} = 0,044 \text{ OM}$$

$$R_{\text{кл}} = \frac{r_0 \cdot l_{\text{сум}}}{n_{\text{кл}}} = \frac{0,258 \cdot 5,77}{1} = 1,488 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l_{\text{сум}}}{n_{\text{кл}}} = \frac{0,081 \cdot 5,77}{1} = 0,467 \text{ Ом}$$

Результуючі опори до точки К1:

$$X_{K1} = X_c + X_{Kd} = 1,103 + 0,467 = 1,570 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{KL} = 0,044 + 1,488 = 1,532 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{1,532^2 + 1,570^2} = 2,194 \text{ O}_M$$

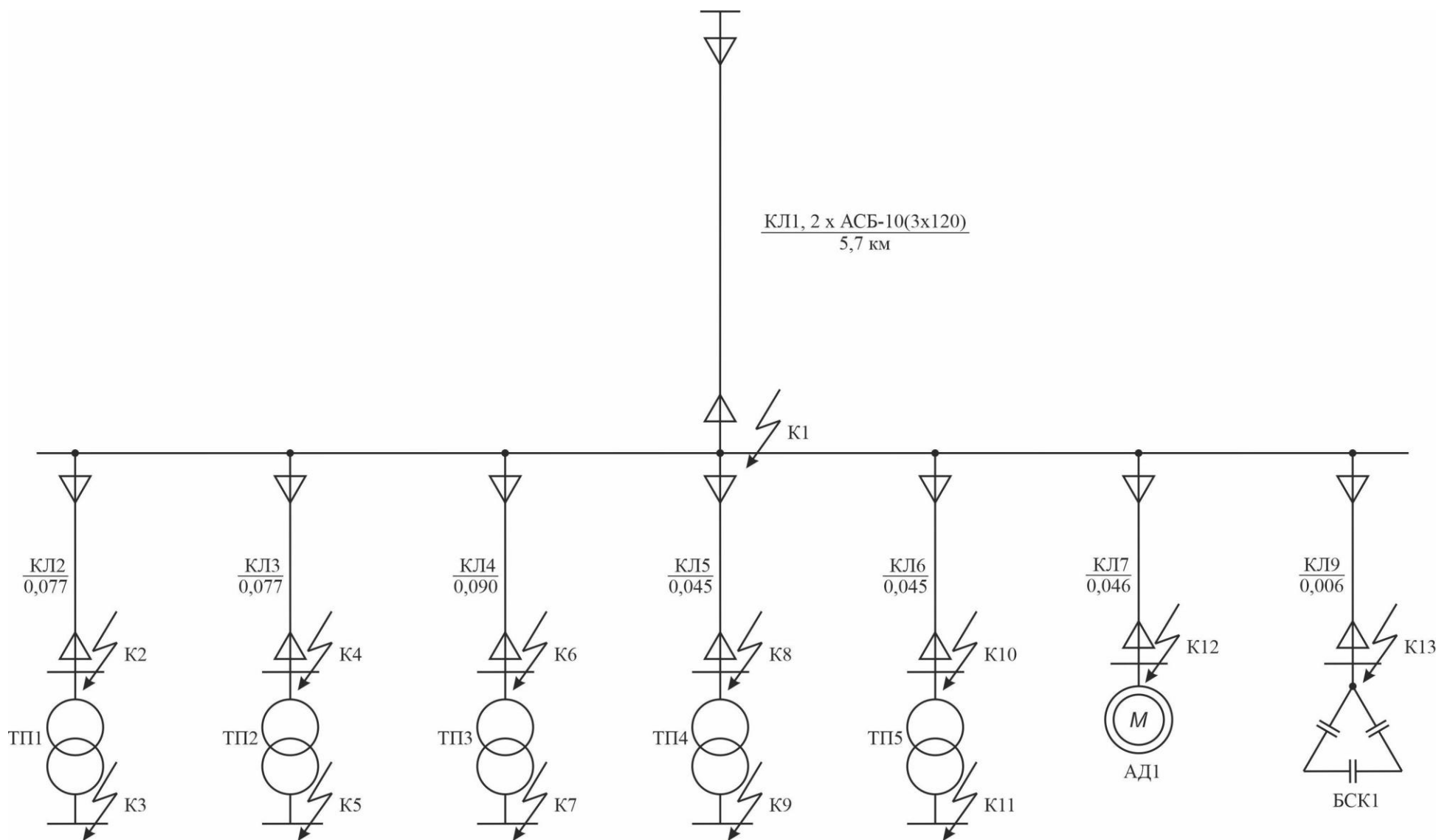


Рис. 6.1. Розрахункова схема

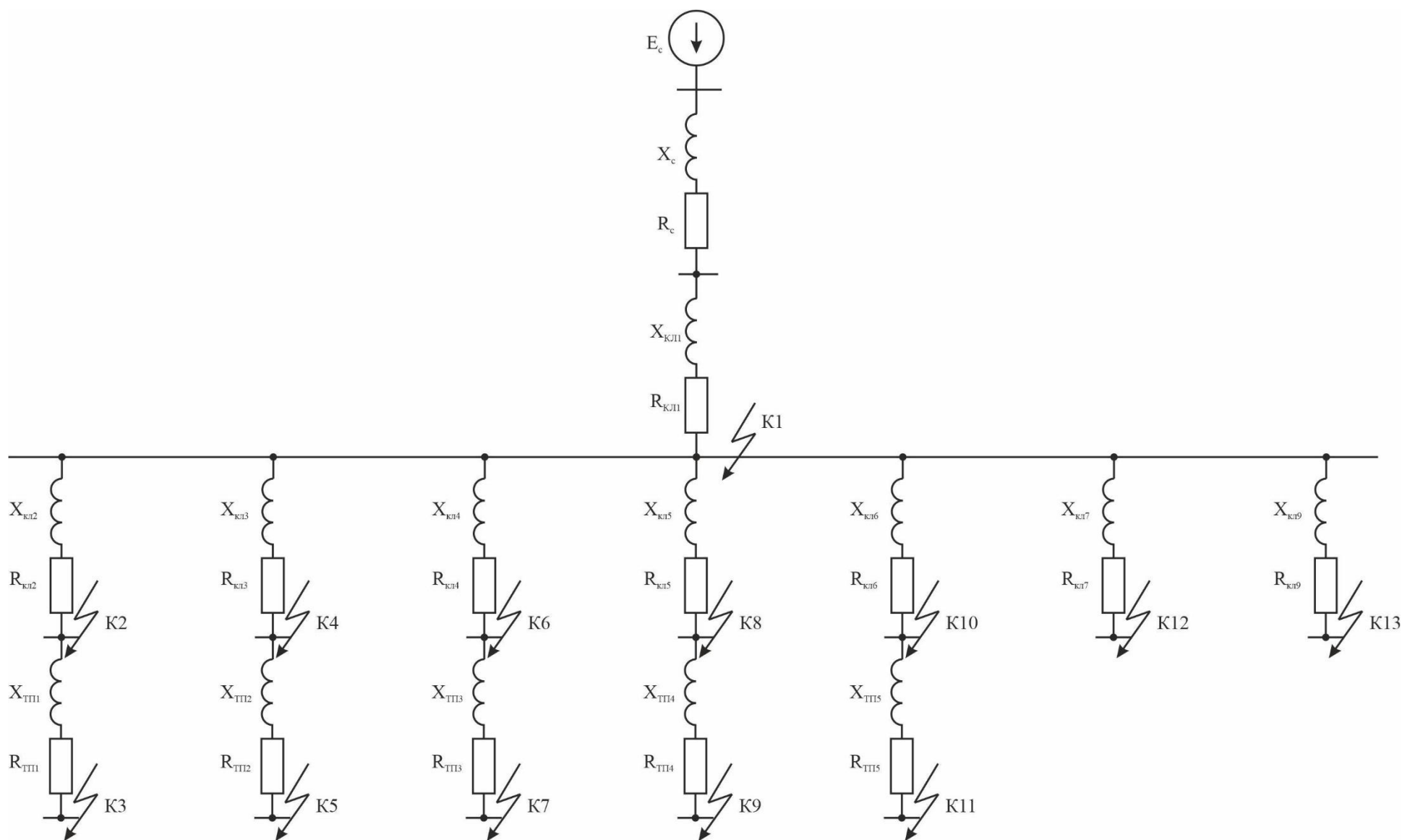


Рис. 6.2. Схема заміщення

Параметри струму КЗ у точці К1:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,194} = 2,76 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,570}{314 \cdot 1,532} = 0,0033 \text{ с}$$

$$k_{yд1} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0033}} = 1,048$$

$$i_{yд1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{yд1} \cdot I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,048 \cdot 2,76 = 4,09 \text{ кА}$$

Внесок струму підживлення від високовольного АД (10 кВ):

$$S_{\text{ном.АД}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \phi \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{0,607}{0,9 \cdot 0,92} = 0,733 \text{ МВА}$$

$$X_{\text{АД}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{I_{\text{пуск}} \cdot S_{\text{ном.АД}}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 0,733} = 28,92 \text{ Ом}$$

$$I''_{K1(\text{АД})} = 2 \cdot \frac{E''_{*\text{АД}} \cdot U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{АД}}} = 2 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 28,92} = 0,38 \text{ кА}$$

$$i_{yд1(\text{АД})} = \sqrt{2} \cdot k_{yд(\text{АД})} \cdot I''_{K1(\text{АД})} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,38 = 0,91 \text{ кА}$$

Сумарний струм та ударний струм у точці К1:

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(\text{АД})} = 2,76 + 0,38 = 3,14 \text{ кА}$$

$$i_{yд1} = i_{yд1(c)} + i_{yд1(\text{АД})} = 4,09 + 0,91 = 5,00 \text{ кА}$$

						37

Параметри для вибору перерізу цехової КЛ1:

$$I_p = \frac{S_{\text{розр.ТП1}}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{893,04}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 24,59 \text{ А}$$

$$B_k = I_{K1}''^2 \cdot (t_{3.min} + T_a) = 3,14^2 \cdot (1,365 + 0,0033) = 13,49 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} \cdot 10^3 = \frac{\sqrt{13,49}}{94} \cdot 10^3 = 39,07 \text{ мм}^2$$

Згідно з розрахунками, приймаємо до прокладання кабель марки ААШв-10(3х50).

Визначення опору прийнятої КЛ1 (довжина 0,078 км):

$$R_{\text{кл1}} = r_0 \cdot l_{\text{кл1}} = 0,62 \cdot 0,078 = 0,048 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{кл1}} = x_0 \cdot l_{\text{кл1}} = 0,09 \cdot 0,078 = 0,007 \text{ Ом}$$

Дані щодо опорів інших кабельних ліній згруповані у табл. 6.1.

Параметри струму К3 у точці К2 (на шинах ТП1):

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{\text{кл1}} = 1,570 + 0,007 = 1,577 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{\text{кл1}} = 1,532 + 0,048 = 1,580 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{1,580^2 + 1,577^2} = 2,232 \text{ Ом}$$

						38

Таблиця 6.1. Характеристики опорів кабельних ліній

№	Довжина l , км	Пит. опір r_0 , Ом/км	Пит. опір x_0 , Ом/км	Опір R , Ом	Опір X , Ом
1	5,77	0,258	0,081	1,489	0,467
2	0,078	0,62	0,09	0,048	0,007
3	0,078	0,62	0,09	0,048	0,007
4	0,091	0,62	0,09	0,056	0,008
5	0,046	0,62	0,09	0,029	0,004
6	0,046	0,62	0,09	0,029	0,004
7, 8	0,047	0,62	0,09	0,029	0,004
9, 10	0,0061	0,62	0,09	0,004	0,001

$$I''_{K2(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,232} = 2,71 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega \cdot R_{K2}} = \frac{1,577}{314 \cdot 1,580} = 0,0032 \text{ с}$$

$$k_{yд2} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0032}} = 1,044$$

$$i_{yд2} = \sqrt{2} \cdot k_{yд2} \cdot I''_{K2(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,044 \cdot 2,71 = 4,00 \text{ кА}$$

Параметри струму КЗ у точці КЗ (на шинах 0,4 кВ ТП1):

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_T) \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}}\right)^2 = (1,577 + 9,741) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 0,0164 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_T) \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}}\right)^2 = (1,580 + 1,828) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 0,0049 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0049^2 + 0,0164^2} = 0,0171 \text{ Ом}$$

$$I_{K3}'' = \frac{U_{\text{ср.нн}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0171} = 13,50 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0164}{314 \cdot 0,0049} = 0,0107 \text{ с}$$

$$k_{\text{уд3}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0107}} = 1,393$$

$$i_{\text{уд3}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд3}} \cdot I_{K3}'' = \sqrt{2} \cdot 1,393 \cdot 13,50 = 26,59 \text{ кА}$$

Розрахунки струмів короткого замикання для інших розрахункових точок зведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Зведені результати розрахунку струмів короткого замикання

№	R, Ом	X, Ом	I _к '', кА	T _а , с	k _{уд}	i _{уд} , кА
1	1,532	1,57	3,14	0,0033	1,048	5
2	1,58	1,577	2,71	0,0032	1,044	4
3	0,0049	0,0164	13,5	0,0107	1,393	26,59
4	1,58	1,577	2,71	0,0032	1,044	4
5	0,0049	0,0164	13,5	0,0107	1,393	26,59
6	1,5899	1,5899	2,7	0,0032	1,043	3,98
7	0,0049	0,0164	13,5	0,0107	1,393	26,59
8	1,5615	1,5858	2,72	0,0032	1,045	4,03
9	0,0049	0,0164	13,5	0,0107	1,393	26,59
10	1,5615	1,5858	2,72	0,0032	1,045	4,03
11	0,0049	0,0164	13,5	0,0107	1,393	26,59
12	1,5625	1,5858	2,72	0,0032	1,045	4,03
13	1,5372	1,5828	2,75	0,0033	1,047	4,07

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Визначення параметрів кабельної лінії для живлення ТП1:

Розрахунковий струм у нормальному режимі:

$$I_p = \frac{S_{\text{розр.ТП1}}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{893,04}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 24,59 \text{ А}$$

Попередньо приймаємо до монтажу дві паралельні лінії марки ААШв-10(3х50).

Перевірка обраного кабелю за умовами тривалого допустимого навантаження та в аварійному режимі:

1. Нормальний режим:

$$I_p = 24,59 \text{ А} \leq K_n \cdot I_{\text{доп}} = 0,9 \cdot 140 = 126 \text{ А}$$

2. Післяаварійний режим (при відключенні одного кабелю):

$$I_{\text{ав}} = 49,18 \text{ А} \leq K_{\text{ап}} \cdot K_n \cdot I_{\text{доп}} = 1,35 \cdot 1 \cdot 140 = 189 \text{ А}$$

Оцінка термічної стійкості провідника до дії струмів КЗ:

$$B_k = I_{K1}''^2 \cdot (t_{\text{з.мин}} + T_a) = 3,14^2 \cdot (1,365 + 0,0033) = 13,49 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} \cdot 10^3 = \frac{\sqrt{13,49}}{94} \cdot 10^3 = 39,07 \text{ мм}^2$$

Оскільки фактичний переріз кабелю (50 мм²) більший за мінімально необхідний (39,07 мм²), обрана марка кабелю задовольняє вимогам термічної стійкості. Результати підбору кабельних ліній наведено в табл. 6.3.

						41

Таблиця .6.3. Вибір КЛ

№	$n_{\text{КЛ}},$ шт	$S_{\text{розр}},$ МВА	$I_{\text{р}},$ А	$I_{\text{р.ав}},$ А	$B_{\text{к}},$ кА ² с	$F_{\text{min}},$ мм ²	Марка КЛ	$I_{\text{доп}},$ А	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{п}}I_{\text{доп}},$ А	$K_{\text{ап}}$	$K'_{\text{п}}$	$K_{\text{ап}}K'_{\text{п}}I_{\text{доп}},$ А
1	2	4618,3	127,1	254,2	13,49	39,07	2 х АСБ-10(3х120)	240	0,9	216	1,35	1	324
2	2	893,04	24,59	49,18	13,49	39,07	2 х ААШВ-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
3	1	446,51	24,59	-	13,49	39,07	1 х ААШВ-10(3х50)	140	1	140			
4	2	888,07	24,46	48,92	13,49	39,07	2 х ААШВ-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
5	2	890,57	24,53	49,06	13,49	39,07	2 х ААШВ-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
6	2	890,57	24,53	49,06	13,49	39,07	2 х ААШВ-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
7,8	1	607,2	33,45	-	13,49	39,07	1 х ААШВ-10(3х50)	140	1	140	-	-	-
9,1	1	455,4	25,08	-	13,49	39,07	1 х ААШВ-10(3х50)	140	1	140	-	-	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Розрахункові параметри вибору ввідного вимикача наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача

Умова перевірки	Розрах. значення	Каталожні дані
$U_r \leq U_{nom}$	10	10
$I_{r.max} \leq I_{nom}$	265,11	630
$I_k \leq I_{off}$	3,14	20
$i_a \leq \beta_{nom} \sqrt{2} I_{off}$	0	40
$\sqrt{2} I_k + i_a \leq 2 I_{off} (1 + \beta_{nom})$	4,44	39,48
$I_k \leq I_{dyn}$	3,14	52
$i_u \leq i_{dyn}$	5	132,37
$B_k \leq I_{th}^2 \cdot t_{th}$	5,38	1200

$$B_k = I_{K1}''^2 \cdot (t_{pз.min} + t_{с.в.} + T_a) = 3,14^2 \cdot (0,5 + 0,042 + 0,0033) = 5,38 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Обираємо ВР2-10-20/630.

Інші вимикачі обираються аналогічно.

Для обмеження перенапруг обираємо ОПН-10/420/12-УХЛ1.

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Варіант підключення ТВП до загальної електричної мережі зображено на рис. 6.3.

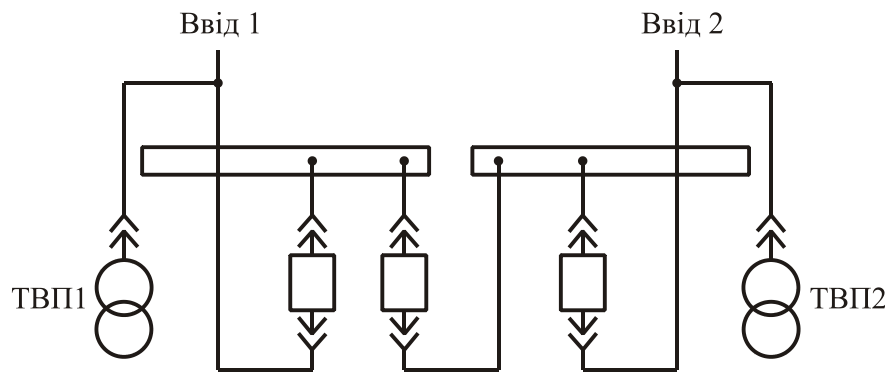


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП до мережі

Сумарне навантаження допоміжних трансформаторів:

$$S_{\text{вст}} = \sqrt{P_{\text{вст}}^2 + Q_{\text{вст}}^2} = \sqrt{68,01^2 + 18,22^2} = 70,41 \text{ кВА}$$

$$S_{\text{розр}} = K_{\text{п}} \cdot S_{\text{вст}} = 0,8 \cdot 70,41 = 56,33 \text{ кВА}$$

Приймаємо до встановлення агрегат марки ТМ-40/10.

$$K_{\text{зав}} = \frac{S_{\text{розр}}}{n_{\text{т}} \cdot S_{\text{ном.т}}} = \frac{56,33}{2 \cdot 40} \approx 0,7$$

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

7.1 Мережі живлення на базі альтернативних енергоресурсів

Системи гарантованого енергозабезпечення (СГЕ) проєктуються заради надійного живлення найбільш критичних споживачів струмом тоді, коли виникають регулярні та тривалі відключення загальної магістралі. Сонячні станції гарантують клієнтам подачу електрики з відмінними показниками якості при різких перепадах, а також під час тимчасових чи тривалих знеструмлень територій, що відрізняються слабкою енергетичною інфраструктурою. Варто зазначити, що використання сучасних концепцій мікромереж (microgrids) дозволяє повністю ізолювати локального абонента від системних аварій, створюючи повністю автономний енергетичний острів.

У таких схемах зовнішня лінія здатна виступати основним або ж резервним вузлом. Цей статус безпосередньо визначається характеристиками вхідного сигналу та цільовим завданням конкретної генераційної установки. Фотоелектричні модулі доцільно застосовувати задля створення допоміжної потужності при існуючих жорстких лімітах споживання, щоб безпечно утримувати виділені гілки навантаження. Крім того, вони дають змогу отримувати фінансовий прибуток завдяки продажу надлишків згенерованої електрики місцевим операторам (наприклад, за класичною програмою "Зелений тариф" або за допомогою сучасної моделі взаємозаліку Net Billing, яка зараз активно впроваджується на законодавчому рівні).

Новітні комбіновані комплекси зазвичай оснащуються перетворювачами, що підтримують алгоритми пошуку точки максимальної потужності (MPPT). Завдяки цій технології досягається найвищий коефіцієнт корисної дії утилізації сонячного випромінювання навіть за умов часткового затінення панелей або хмарної погоди. Батарейні блоки, насамперед передові літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) рішення,

						45

дають змогу безпечно акумулювати заряд протягом усього світлового дня. Накопичений ресурс ефективно витрачається у темну пору доби чи в моменти найвищого попиту на електроенергію. Дані типи акумуляторів характеризуються значно більшим експлуатаційним ресурсом циклів розряду-заряду порівняно зі звичайними Li-ion аналогами, а також практично виключають ризик неконтрольованого термічного розгону.

Інтелектуальні контролери розподілу (EMS) повністю самостійно перемикають активні генераційні вузли. Вони раціоналізують щоденний баланс між масивом фотомодулів, зовнішньою мережею та акумуляторними комірками, спираючись на дані прогнозів погоди та поточні графіки споживання. Подібні технологічні підходи є вкрай затребуваними на території нашої держави зараз. Оскільки системні пошкодження критичної інфраструктури внаслідок постійних ворожих атак вимагають швидкого впровадження максимально стійких, гнучких та незалежних механізмів резервування. Додаткова інтеграція модулів дистанційного моніторингу через спеціалізовані хмарні сервіси дозволяє інженерам у режимі реального часу відстежувати стан обладнання та миттєво реагувати на будь-які позаштатні ситуації.

Інтеграція мікроперетворювачів разом із блоками оптимізації суттєво покращує показники продуктивності кожного окремого фотоелемента (технологія MLPE – Module-Level Power Electronics). Це досягається шляхом зведення до мінімуму негативного впливу часткового затінення чи локальних поломок певних сегментів генераційного масиву, оскільки падіння напруги на одній панелі більше не призводить до втрати потужності всього стринга. Сучасні телеметричні комплекси гарантують віддалене спостереження за станом усього обладнання, дозволяючи оперативно знаходити та усувати будь-які технічні збої ще до моменту повної зупинки системи.

Принципова візуалізація компонування фотоелектричної станції представлена на рисунку 7.1.

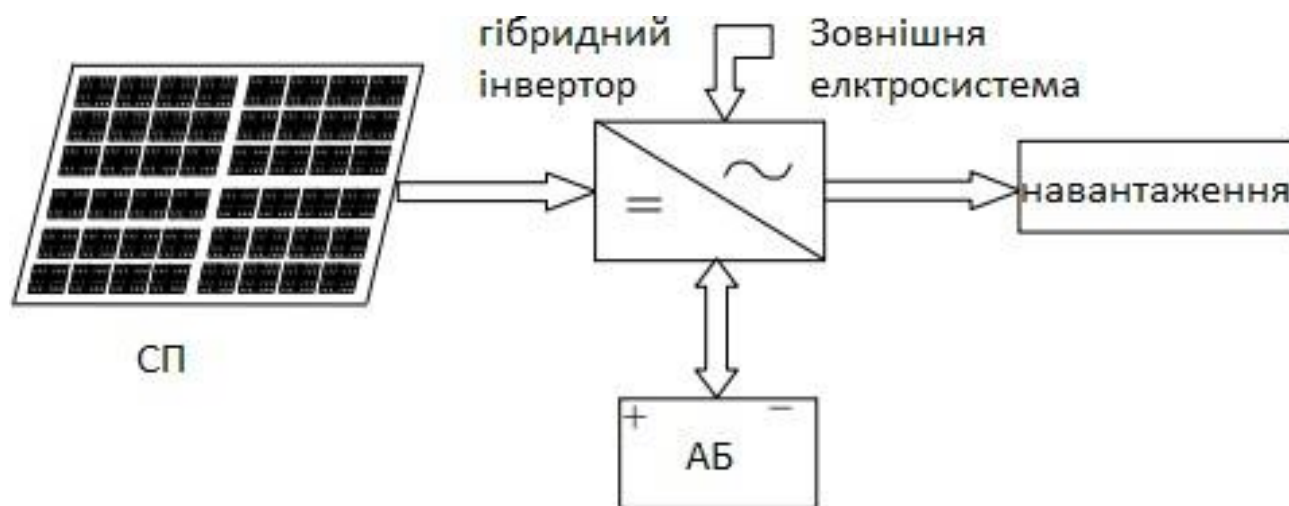


Рис. 7.1. Схема ФЕС

Базовий алгоритм функціонування даної інфраструктури спирається на концепцію раціоналізації витрат енергоресурсів. Коли рівень інсоляції є достатньо високим, зв'язок із загальною магістраллю логічно розривається. У цей момент об'єкт отримує струм безпосередньо від сонячних батарей, тоді як надлишкова генерація спрямовується на відновлення заряду накопичувачів (робота у форматі повністю ізольованого мікроострова). Однак межа допустимого падіння ємності акумуляторів програмно фіксується на рівні 25–30%. Такий підхід не лише подовжує життєвий цикл батарей (через контроль глибини розряду – DoD), але й створює так званий буфер безпеки, гарантуючи наявність обов'язкового запасу енергії при раптових знеструмленнях основної лінії.

Якщо залишковий заряд у накопичувачах досягає зазначеної критичної позначки, автоматика самостійно підключає вхідну міську мережу. Вона бере на себе стабільну подачу струму до навантаження, а також допомагає поповнити ємність батарейних блоків паралельно з фотомодулями (за умови, що поточне сонячне випромінювання дозволяє це робити). У разі, якщо постачання електрики з центральної магістралі раптово зникає, об'єкт миттєво перемикається на живлення виключно від акумуляторів. Завдяки використанню швидкодіючих автоматів вводу резерву (АВР), час такого перемикання зазвичай становить менше 10–20 мілісекунд, що працює за принципом безперебійника (UPS) і непомітно для чутливої техніки. Загальна місткість батарейного парку проєктується ще на етапі

планування таким чином, щоб витримувати найдовші періоди відсутності генерації, включаючи суворі зимові місяці або затяжну хмарну погоду.

Блоки керування заряджанням, побудовані на базі алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) або ж більш просунутого пошуку точки найвищої потужності (MPPT), гарантують високоефективний розподіл струмів. Вони також надійно оберігають накопичувачі від шкідливого надмірного заряджання. Спеціалізовані пристрої автоматичного введення резерву (ABP чи ATS) відповідають за безшовну зміну активного джерела напруги. Цей процес синхронізації відбувається настільки швидко (зазвичай у межах кількох мілісекунд), що чутлива електронна апаратура та пріоритетні лінії користувачів зовсім не фіксують тимчасової втрати живлення.

Сучасні телеметричні платформи безперервно фіксують ключові експлуатаційні показники кожного вузла системи. Завдяки цим рішенням інженери можуть віддалено оцінити ступінь наповненості акумуляторів, поточний обсяг виробітку фотомодулів, актуальні масштаби споживання об'єктом, а також наявність або відсутність вхідного сигналу від магістралі. Детальний аналіз таких масивів даних допомагає раціоналізувати загальний енергобаланс будівлі. Більше того, інтелектуальні алгоритми здатні завчасно передбачати моменти, коли комплексу доведеться змінити поточний формат функціонування.

Вбудовані апаратні механізми безпеки надійно блокують ризики виникнення струмів короткого замикання, різких стрибків напруги, критичного спустошення ємності комірок або ж термічного пошкодження елементів інвертора. Що стосується накопичувачів, то застосування передової літій-залізо-фосфатної технології (LiFePO₄) гарантує неймовірно довгий термін служби. Якщо суворо дотримуватися температурних норм та уникати екстремальних навантажень, такі акумуляторні блоки легко витримують понад шість тисяч повних циклів перезаряджання, зберігаючи стабільність завдяки вбудованим платам керування батареями (BMS).

Застосування спеціалізованих смарт-сценаріїв економії дає змогу суттєво знизити залежність від зовнішніх енергопостачальних компаній. У теплу пору

року, коли тривалість світлового дня максимальна, обсяги спожитої ззовні електрики можуть зменшитися на шістдесят-вісімдесят відсотків. Разом із тим, грамотно підібраний масив батарей здатен підтримувати життєдіяльність критичної інфраструктури в абсолютно ізольованому стані впродовж двох-п'яти днів поспіль (конкретний час залежить від сумарної ємності інсталюваних комірок).

Загальна продуктивність масиву сонячних панелей розраховується ще на етапі проєктування таким чином, щоб гарантовано відновити повний запас енергії акумуляторів за сорок вісім годин протягом весняних чи осінніх місяців. Однак ситуація кардинально змінюється взимку: при затяжних системних аваріях на міській лінії та низькому рівні інсоляції зарядити батареї лише від сонця стає фізично неможливо. Тому виникає гостра потреба у підключенні сторонніх джерел генерації. Найкращим технічним рішенням вважається додавання вітрогенераторів, оскільки їхній пік виробітку часто припадає саме на похмуру та вітряну погоду, що ідеально доповнює фотоелектрику. Використання ж класичних паливних агрегатів (на базі бензинових, дизельних або газопоршневих двигунів внутрішнього згоряння) розглядається як резервна, але значно менш вигідна альтернатива через високу вартість пального, шкідливі викиди та логістичні складнощі.

У сучасній світовій практиці побудови сонячних станцій еталоном надійності вважається проєктування незалежних локальних мікромереж, що базуються на передовому обладнанні від німецького гіганта SMA Solar Technology AG. Такі архітектурні концепції розробляються заради безперебійної видачі першокласного змінного струму абонентам будь-якого масштабу. Це вкрай важливо там, де зовнішня магістраль характеризується частими просіданнями напруги або невідповідністю частотних параметрів. Передові апаратні комплекси подібного класу використовують інноваційні підходи до генерації струму з альтернативних ресурсів, демонструючи найвищий рівень ефективності конвертації поряд із надзвичайною стійкістю до високих пускових струмів важкої техніки.

Флагманські перетворювачі лінійок Sunny Island, а також серії Sunny Boy Storage відрізняються вражаючим показником ККД, який здатний сягати 98

						49

відсотків. Більше того, вони вміють повноцінно формувати ізольовану енергосистему (так зване острівне функціонування), абсолютно не потребуючи опорної напруги від загальної мережі. Фірмовий програмний алгоритм ShadeFix (який прийшов на зміну технології OptiTrac Global Peak) надзвичайно точно знаходить глобальну точку найбільшого виробітку енергії, майстерно нівелюючи відчутні втрати від нерівномірного освітлення чи складних тіней на поверхні масиву.

Комбіновані блоки управління потоками успішно синхронізують відразу кілька типів генеруючих установок: класичні фотоелектричні стринги, вітряні турбіни та резервні паливні генератори. Розумна автоматика інвертора самостійно розставляє пріоритети використання конкретного ресурсу, миттєво оцінюючи його поточну доступність, ціну генерації та загальну економічну доцільність.

Завдяки модульному принципу компонування, сумарну потужність об'єкта можна максимально гнучко розширювати: від компактних трьохкіловатних інсталяцій для приватного сектору до потужних промислових кластерів на кілька мегават. Об'єднання кількох станцій у паралельну роботу створює гаряче резервування (за принципом N+1 або N+2), що в десятки разів підвищує безвідмовність усього енергетичного вузла.

Інтелектуальні контролери розподілу (Smart Home / EMS) вміють самостійно знеструмлювати другорядні побутові чи промислові прилади в моменти гострого дефіциту вільної потужності. Цей превентивний крок береже накопичений заряд виключно для критично важливої апаратури. Додаткова програмна інтеграція з сервісами метеорологічних прогнозів дає змогу ідеально планувати графік використання батарейних парків на кілька діб наперед, уникаючи глибоких розрядів перед похмурими днями.

Спеціалізоване хмарне середовище, створене розробником обладнання, гарантує безперервний онлайн-моніторинг роботи всього генеруючого комплексу. Воно акумулює деталізовану статистику щодо виробітку струму та обсягів його витрачання заради тонкого налаштування ключових експлуатаційних параметрів. Цей цифровий інструмент дозволяє власнику встановлювати найбільш вигідний

логічний сценарій керування: фокусування на повному покритті власних потреб об'єкта чи свідомий експорт залишків електроенергії у загальну магістраль. Останнє дає змогу отримувати прибуток за спеціальними комерційними ставками в рамках лібералізованого ринку.

Фірмові телеметричні сервіси, такі як SMA Sunny Portal або його аналоги від інших провідних брендів, відкривають гнучкий дистанційний контроль за технічними показниками через веб-браузер або зручний мобільний застосунок. Інженери та власники здатні переглядати поточні цифри генерації, локального навантаження, залишкової ємності акумуляторів, а також бачити орієнтовний план майбутнього виробітку, який формується завдяки синхронізації з глобальними метеорологічними базами даних.

Вбудовані модулі фінансової аналітики допомагають точно розраховувати рентабельність інвестиційного проєкту, визначати швидкість повернення капіталовкладень та моделювати довгострокові економічні вигоди від експлуатації станції. Програмне забезпечення самостійно формує регулярні зведення. Вони слугують не лише для глибокого аудиту продуктивності, але й для предиктивної діагностики (Predictive Maintenance), виявляючи приховані апаратні аномалії на ранніх стадіях.

Завдяки державним програмам підтримки відновлюваної енергетики (таким як класичний "Зелений тариф"), власники мають законне право заробляти на транзиті надлишків згенерованого струму до міської мережі. Водночас сьогодні в Україні активно впроваджується прогресивніша модель Net Billing (чистий продаж), яка замінює застарілий взаємозалік (Net Metering). Цей механізм дозволяє конвертувати віддані вдень кіловат-години у грошовий еквівалент на спеціальному рахунку абонента, щоб згодом оплачувати спожиту вночі чи в похмурі зимові дні електрику цими віртуальними коштами.

Інтелектуальні стратегії максимізації власного споживання (Zero Export або Self-Consumption) націлені на найефективнішу локальну утилізацію безкоштовної сонячної енергії. Це дозволяє радикально знизити обсяги купівлі дорогої електрики ззовні, особливо під час дії найвищих тарифних коефіцієнтів у години пік. Розумні

контролери мікромережі здатні легко інтегруватися з протоколами "розумного дому" (IoT) та самостійно активувати енергоємну техніку. Наприклад, теплові насоси, промислові бойлери, системи кондиціонування чи зарядні станції для електромобілів вмикаються саме тоді, коли інвертор фіксує піковий рівень виробітку від масиву фотомодулів.

Впровадження предиктивних математичних моделей, побудованих із використанням нейромереж (штучного інтелекту), дає можливість глибоко аналізувати ретроспективну статистику навантажень. Розумні алгоритми постійно зіставляють ці відомості з актуальними метеозведеннями та розкладом пікових прайсів багатозонних лічильників, щоб самостійно ідеально балансувати потоки потужності. Такий інноваційний підхід гарантує колосальне скорочення фінансових витрат абонента: рахунки за електрику можуть зменшитися на сімдесят-дев'яносто відсотків, якщо порівнювати зі стандартним енергоспоживанням виключно від зовнішнього міського постачальника.

Архітектура сонячної електростанції, що спеціально проєктується задля створення незалежного локального мікрокільця живлення, базується на кількох ключових вузлах. До її складу входять первинні стрингові перетворювачі (на схемі позначені як I1 та I2), а також двоспрямований гібридний модуль (PI). Останній апарат оснащений надзвичайно продуктивним блоком поповнення заряду акумуляторних комірок, здатним працювати безпосередньо від стандартної мережі 220 В. Детальну топологію даної апаратної конфігурації проілюстровано на рисунку 7.2.

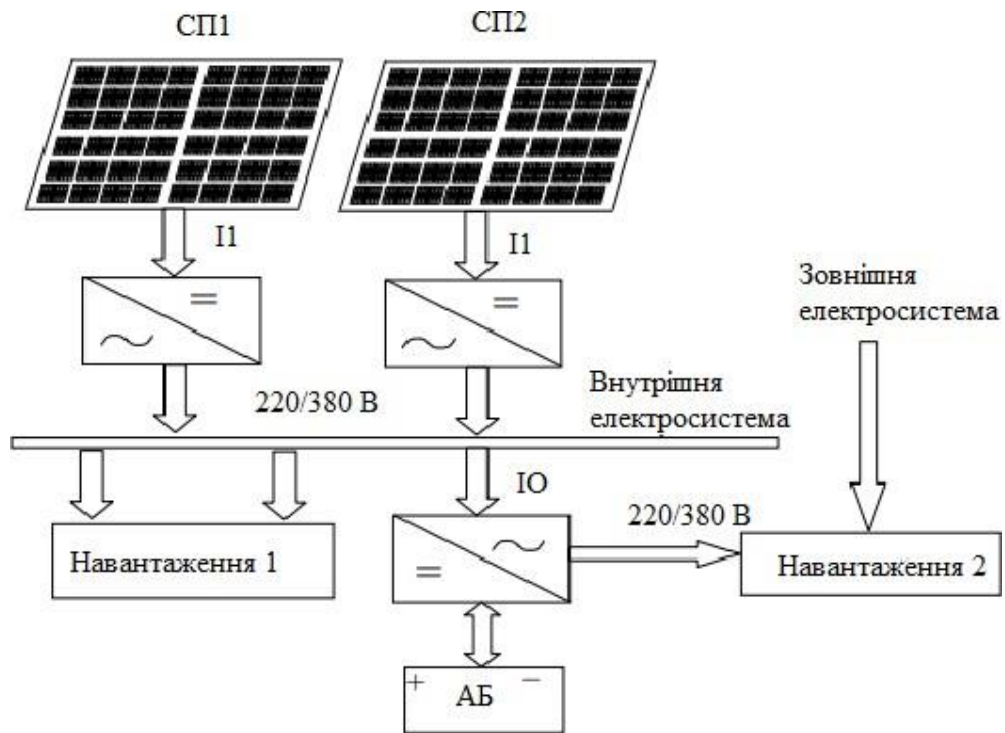


Рис. 7.2. Структура СЕС

Програмна логіка керування мікромережею передбачає наявність спеціального сценарію заощадження ресурсів. Його механізм базується на суворому ранжируванні ліній живлення. На етапі пусконаладження власник об'єкта виділяє пріоритетну апаратуру (так звана перша категорія споживачів), для якої гарантується стовідсотково безперебійна подача напруги за будь-яких аварійних умов. Далі формується пул другорядного обладнання: воно отримує живлення або від міської магістралі, або ж від сонячного масиву (проте виключно у моменти фіксації профіциту генерації панелями). Остання, третя група включає найбільш енергоємні прилади, робота яких дозволяється тільки за наявності стабільного з'єднання із зовнішньою електроцентраллю, щоб швидко не виснажувати батареї.

Базові фотоелектричні перетворювачі (І1, І2) виконують класичну роль: вони якісно трансформують згенерований панелями постійний струм (DC) у стандартизований змінний сигнал (AC) із промисловою частотою п'ятдесят герц. Номінальна продуктивність кожного такого пристрою підбирається індивідуально під специфіку будівлі, охоплюючи широкий діапазон від п'яти до ста кіловат. Комутація цих агрегатів у єдиний паралельний каскад не лише дозволяє гнучко

масштабувати загальну генерацію в майбутньому, але й формує надійний апаратний резерв (навіть якщо один модуль вийде з ладу на ремонт, інші продовжать генерацію).

Двоспрямований батареийний контролер (реверсивний інвертор) вирішує одразу два протилежні завдання. З одного боку, він інвертує енергію накопичувачів у змінну напругу заради підтримання життєдіяльності навантаження. З іншого боку, агрегат працює як потужний випрямляч, перетворюючи синусоїдальний сигнал із загальної магістралі на постійний струм для стрімкого відновлення ємності АКБ. Інтегрований всередину силовий зарядний блок здатен продукувати струми до двохсот ампер (для систем архітектури 48 Вольт) або ж до ста ампер (у конфігураціях з робочою напругою 96 Вольт). Це гарантує екстремально швидко підготовку батарейного парку до наступних блекаутів навіть у короткі проміжки наявності світла.

Повністю ізольований інфраструктурний комплекс традиційно складається із пари відокремлених структурних ланок: вузла гарантованої подачі напруги (який обов'язково укомплектовано масивом накопичувачів) та незалежного генеруючого агрегату. Сумарна місткість встановлених комірок зазвичай розраховується приблизно на пів години стабільної віддачі струму. Цього цілком достатньо задля безпечної підтримки найпріоритетніших ліній під час раптових зникнень зовнішньої напруги (так званих мікроблекаутів). Якщо ж системна аварія затягується і триває понад двадцять хвилин, наявний залишковий заряд починає відігравати роль критичного буфера. Він утримує працездатність апаратури безпосередньо до моменту успішного розгону та синхронізації паливної електростанції. Процедура старту керується спеціалізованим щитом автоматики введення резерву (АВР), який обов'язково оснащується реле часу для відкладеного запалювання.

Принципову візуалізацію такої архітектури продемонстровано на рисунку 7.3.

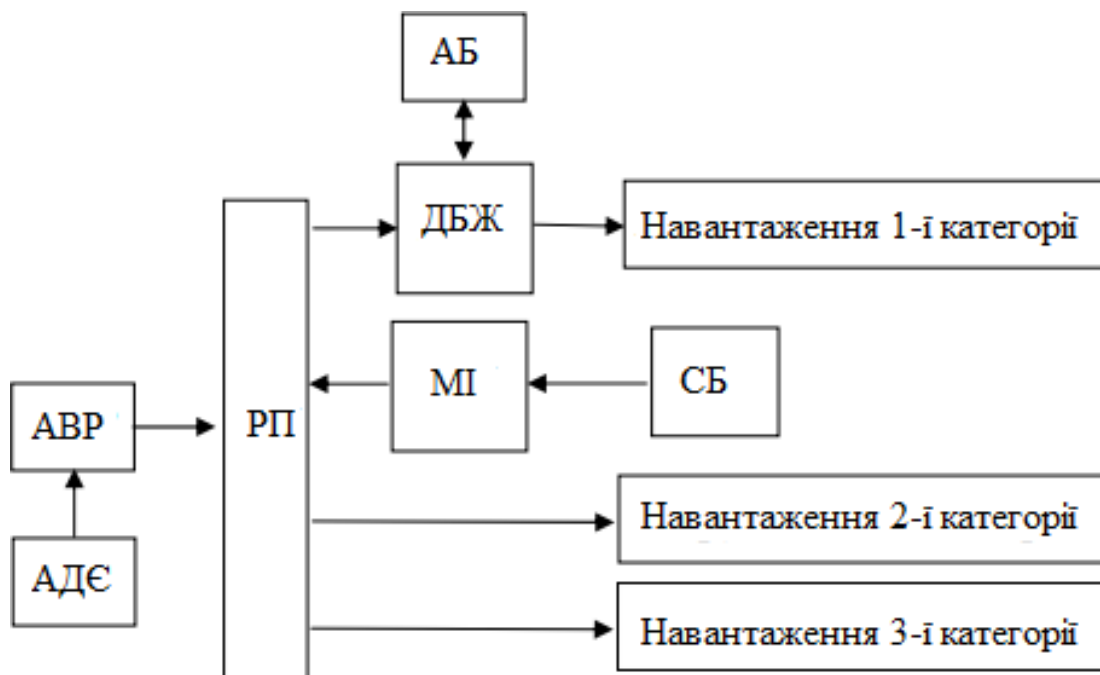


Рис. 7.3. Автономна СЕС

Модулі джерел безперебійного живлення (ДБЖ або UPS) гарантують майже непомітну зміну активного вводу. Зазвичай цей апаратний перехід триває від чотирьох до десяти мілісекунд, що є абсолютною необхідністю для стабільного функціонування серверних стійок, медичної чи точної обчислювальної техніки (адже вона може перезавантажитися при тривалішій втраті синусоїди). Сучасні накопичувальні парки будуються на базі герметизованих свинцево-кислотних (AGM чи GEL, які входять до групи VRLA) або ж більш передових літєвих технологій. Вони гарантують безпроблемне використання енерговузла впродовж п'яти-десяти років, якщо суворо дотримуватися температурних режимів приміщення та уникати глибокого спустошення комірок.

Розумна електроніка щита АВР безперервно проводить глибокий моніторинг вхідних характеристик міської магістралі, відстежуючи частоту, симетрію фаз та амплітуду. Як тільки фіксується вихід за межі допустимих нормативних значень, автоматика подає керівний сигнал на запуск паливного агрегату. Проте робить вона це попередньо витримавши задану програмну паузу, щоб уникнути хибних стартів двигуна через секундні просідання струму. Зазвичай дизельним установкам потрібно близько десяти-п'ятнадцяти секунд для виходу на робочі оберти, тоді як газопоршневим аналогам знадобиться трохи більше часу – орієнтовно двадцять-

тридцять секунд до прийняття повноцінного навантаження об'єкта.

У світлу пору доби саме масиви фотомодулів відіграють роль ключового донора потужності у таких мікромережах. Вони паралельно закривають поточні потреби увімкнених побутових чи промислових приладів та стрімко відновлюють витрачену ємність акумуляторних комірок. Високоінтелектуальні блоки інверторів із вбудованим алгоритмом пошуку точки максимального виробітку (MPPT) віртуозно адаптуються під погодні зміни. Це дає змогу витягувати найвищий ККД із сонячних пластин навіть тоді, коли небо частково затягнуте хмарами, змінюється кут падіння променів або наявне тимчасове затінення стринга.

Комбінована генераційна інфраструктура проєктується на базі пари потужних трифазних інверторів гібридного типу. Ці пристрої обладнані вбудованими інтелектуальними модулями поповнення ємності накопичувачів безпосередньо від зовнішньої магістралі, а також базовими силовими платами трансформації напруги (для двоспрямованої конвертації DC-AC та AC-DC). Структурну організацію такого технологічного вузла проілюстровано на рисунку 7.4.

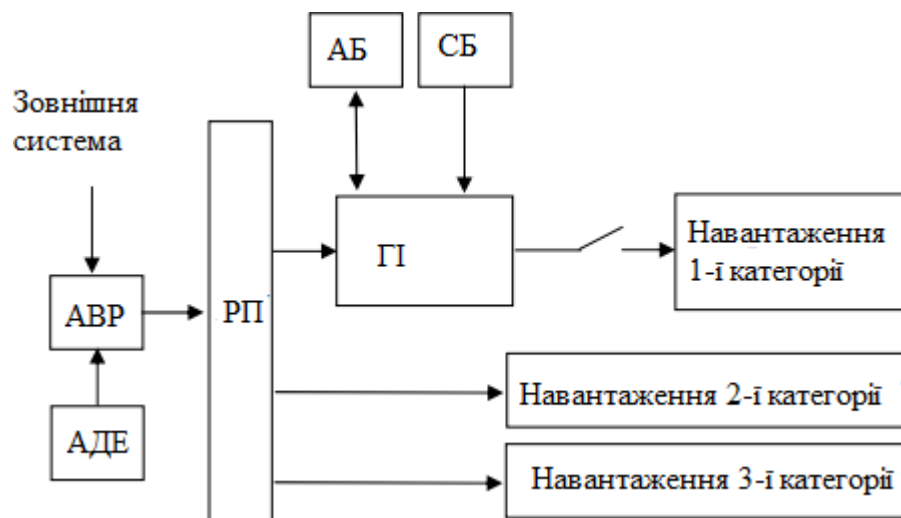


Рис. 7.4. Гібридна система

Спеціалізований мережевий протокол (Grid-tie) відповідає за ідеальну синхронізацію генерованого обладнанням струму із загальними державними стандартами: він чітко тримає частоту на рівні п'ятдесяти герц, стабілізує лінійну напругу в межах 380 вольт і контролює правильний кут зсуву фаз. Водночас апаратний механізм Anti-islanding (запобігання утворенню ізолюваного

енергетичного острова) миттєво блокує фізичний експорт потужності назовні у разі системної аварії на лінії. Цей стандарт є обов'язковим, оскільки гарантує абсолютну безпеку ремонтним бригадам обленерго, які усувають пошкодження на знеструмлених ділянках.

Високоточні трекери пошуку точки найвищої продуктивності (MPPT) демонструють вражаючий коефіцієнт корисної дії – майже дев'яносто дев'ять відсотків під час обробки постійного струму від сонячних батарей. Оскільки кожен фізичний вхід оснащується повністю незалежним контролером, інженери отримують можливість вільно комбінувати стринги з фотомодулів різного номіналу. Це також дозволяє монтувати масиви під кардинально різними кутами нахилу чи азимутами на дахах складної геометрії без втрати загальної ефективності.

Комплексна система безпеки безперервно аналізує стан ізоляційного покриття кабелів, запобігає пошкодженням від раптових стрибків вольтажу (як на стороні постійного, так і змінного струму), слідкує за температурними показниками силових транзисторів та вимірює актуальний опір контуру заземлення. Уся критично важлива статистика, разом із миттєвими метриками та архівами згенерованих кіловат-годин, зручно виводиться на інтегрований рідкокристалічний екран, а також дублюється у хмарний сервіс.

Двоспрямована архітектура плат дає можливість не лише трансформувати сонячну радіацію у корисний струм для будинку або експорту, але й реверсивно "закачувати" дешеву електрику з магістралі до акумуляторів уночі. Цей процес особливо вигідний за наявності багатозонного лічильника з нічним тарифом. Вбудований функціонал джерела безперебійного живлення (ДБЖ) додатково гарантує, що найважливіша техніка ніколи не залишиться без живлення навіть під час масштабних тривалих блекаутів.

Каскадне об'єднання одразу кількох комбінованих перетворювачів дозволяє гнучко масштабувати сумарну пропускну здатність енерговузла та створює надійний апаратний резерв на випадок сервісного обслуговування чи ремонту. Експлуатацією такого масиву керує розумна автоматика: вона пропорційно ділить

поточне навантаження між усіма активними модулями, мінімізуючи їхній знос та рівномірно розподіляючи тепловіддачу.

Підтримка інноваційної технології зрізання піків (Peak Shaving) суттєво обмежує обсяги споживання дорогої кіловат-години ззовні у найдорожчі ранкові чи вечірні години. Замість цього об'єкт живиться енергією, яка була попередньо запасена в комірках вдень від сонця або вночі за дешевим тарифом. Мікроконтролер самостійно, без втручання оператора, змінює формати роботи, спираючись на жорсткий розклад тарифних зон та динамічний рівень залишкового заряду підключеного батарейного парку.

"Розумний" генеруючий комплекс відрізняється винятковим рівнем експлуатаційної безвідмовності. Подібний результат досягається завдяки імплементації новітніх мікропроцесорних інструментів дистанційного спостереження та автоматизованого керування процесами.

Нейромережеві алгоритми разом із технологіями машинного навчання безперервно досліджують звички абонентів, актуальні метеозведення та графіки багатозонного обліку. Завдяки цьому відбувається ідеальне, повністю автономне балансування внутрішніх потоків потужності. Програмний комплекс здатний самостійно підлаштовуватися під будь-які трансформації щоденного графіка навантажень або кліматичні зсуви протягом року без втручання людини.

Інструменти випереджального (предиктивного) аналізу надзвичайно точно розраховують майбутні обсяги використання струму об'єктом, спираючись на ретроспективну статистику та дані супутникових метеорадарів. Водночас математичні моделі глибокого машинного навчання жорстко контролюють алгоритми поповнення та спустошення ємності комірок. Це робиться для того, щоб радикально подовжити експлуатаційний життєвий цикл хімічних джерел струму (запобігаючи їхній передчасній деградації).

Децентралізована архітектура керуючих вузлів із багаторазовим гарячим дублюванням ключових плат гарантує абсолютну стійкість локальної мікромережі. Навіть раптова поломка одного апаратного сегмента не призведе до фатального знеструмлення всього об'єкта. Крім того, впровадження криптографічних

протоколів блокчейну надійно шифрує телеметричну інформацію та дозволяє укладати так звані смарт-контракти для миттєвого прозорого взаєморозрахунку під час продажу надлишків чистої кіловат-години на відкритому ринку.

Глибока синхронізація з протоколами "Інтернету речей" (IoT) відкриває шлях до комплексної автоматизації побутової чи промислової інфраструктури (концепція Smart Home / Smart Building). Інвертор здатен самостійно подавати живлення на потужну техніку саме в ті години, коли сонячні масиви продукують найбільшу кількість струму. Абсолютно кожен експлуатаційний параметр можна легко відкоригувати віддалено через інтуїтивно зрозумілу програму на смартфоні або планшеті.

Вбудовані модулі постійної самодіагностики здатні фіксувати найменші відхилення у роботі електроніки задовго до критичної поломки, миттєво формуючи та надсилаючи електронний звіт технічній підтримці виробника. Використання інноваційної технології "цифрових двійників" (Digital Twins) допомагає проєктувальникам створювати віртуальні копії реального обладнання у хмарі та безпечно тестувати різноманітні сценарії навантажень задля досягнення пікової продуктивності всієї станції.

Графічне відображення архітектури такого високотехнологічного вузла наведено на рисунку 7.5.

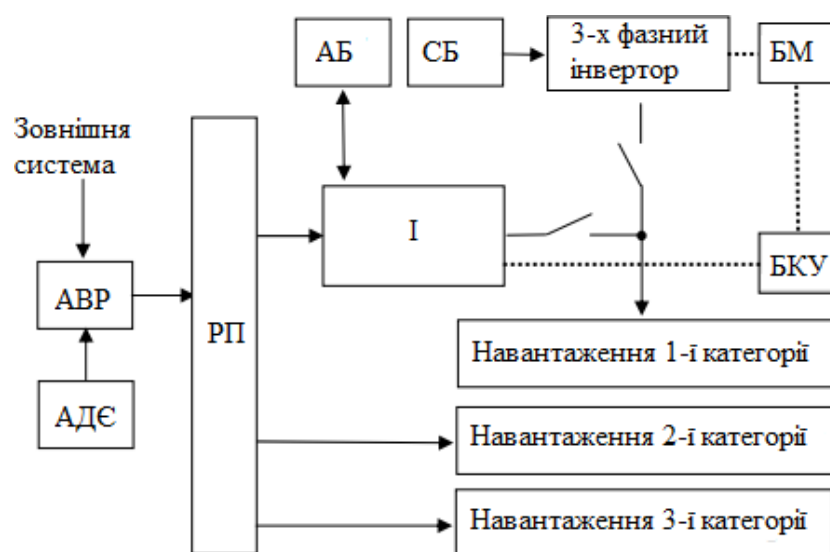


Рис.7.5. Інтелектуальна система системи

Програмний механізм ранжирування ліній (так званий Load Shedding) дає змогу гнучко формувати послідовність заживлення конкретних приладів. Цей процес безпосередньо спирається на рівень експлуатаційної критичності апаратури, а також суворо враховує наявний обсяг вільної потужності інвертора у поточну секунду. Спеціалізоване програмне забезпечення для смартфонів відкриває розширений доступ до віддаленого відстеження статусу кожного інтегрованого вузла через зашифровані хмарні сервери. Крім того, воно надає інженерам чи власникам опцію примусового перемикання смарт-розеток (Smart Plugs) або керованих реле повністю вручну.

Математичні моделі на базі нейромереж безперервно вивчають індивідуальні графіки використання електрики об'єктом. Це робиться задля того, щоб мікроконтролер міг самостійно переносити активацію найважчого устаткування (наприклад, теплових насосів, кліматичних систем чи зарядних станцій EV) на години найвищої продуктивності сонячних панелей. Завдяки такому предиктивному керуванню, загальний показник ефективної локальної утилізації власноруч виробленого струму здатен сягати безпрецедентних дев'яноста п'яти відсотків, зводячи залежність від міської магістралі практично до нуля.

7.2 Класифікація перетворювальних пристроїв СЕС

Детальний структурний розподіл силового електрообладнання, яке відіграє ключову роль у процесах трансформації напруги всередині сучасних екологічних електростанцій, наочно проілюстровано на рисунку 7.6. Ця ієрархія враховує специфіку взаємодії устаткування із загальними енергетичними магістралями та локальними накопичувачами.

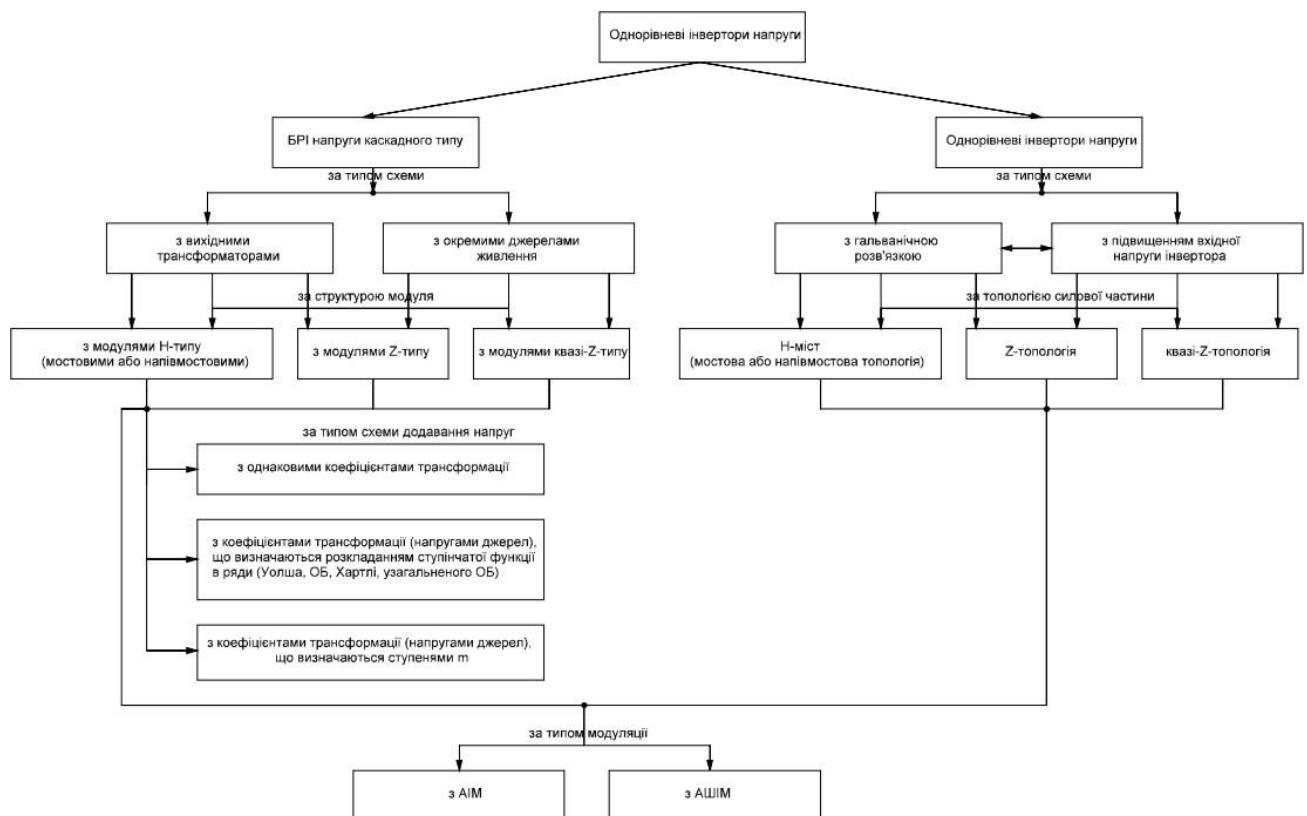


Рис. 7.6. Класифікація перетворювачів

Ізольовані перетворювачі (що класифікуються як Off-grid або Stand-alone рішення) проєктуються виключно заради забезпечення безперебійної працездатності повністю відокремлених об'єктів, які фізично не мають контакту з державними лініями електропередач. Головна місія такої електроніки полягає у високоякісному інвертуванні постійної напруги (DC), яка безпосередньо генерується фотоелементами або надходить від акумуляторного парку, у чисту синусоїду змінного струму (AC). Завдяки цьому досягаються необхідні номінальні характеристики (наприклад, 220 чи 380 Вольт при 50 Герцах), що дозволяє безпечно заживлювати будь-яку побутову чи промислову техніку абонента. Крім того, сучасні апарати цього класу часто оснащуються "сухими контактами" для автоматичного запуску дизель-генераторів під час тривалої нестачі сонця.

Синхронні або транзитні перетворювачі (більш відомі у професійному інженерному середовищі під термінами Grid-tie або On-grid) здатні генерувати електрику лише за умови стабільного з'єднання із зовнішньою централізованою електроцентраллю. Їхня мікропроцесорна архітектура вимагає безперервного

зчитування опорної напруги магістралі для ідеально точного підлаштування робочої частоти та кута зсуву фаз перед трансляцією виробленої потужності назовні. Варто наголосити, що подібне обладнання технічно позбавлене опції створення локального резервного живлення (вони не підтримують підключення акумуляторів). Згідно з жорсткими світовими стандартами безпеки, пристрої такого типу обладнані захистом від утворення "енергетичного острова" (Anti-Islanding). Вони миттєво, за частки секунди, припиняють експорт струму в момент аварійного зникнення вхідного міського сигналу, повністю унеможливлючи ураження напругою працівників ремонтних бригад обленерго на лінії.

Комбіновані (або мультимодальні) пристрої трансформації струму вдало об'єднують експлуатаційні переваги обох згаданих вище категорій. Вони здатні паралельно працювати із зовнішньою магістраллю (як класичні мережеві моделі) та миттєво формувати повністю ізольовану локальну мікромережу за участю акумуляторних масивів. Сучасні гібриди оснащені потужними цифровими процесорами, які гарантують безшовне перемикання режимів за лічені мілісекунди, виконуючи водночас функцію джерела безперебійного живлення елітного класу.

Модульні мікроперетворювачі (MLPE) монтуються безпосередньо на тильній стороні кожного окремого фотоелемента. Їхнє головне завдання полягає у персональній максимізації виробітку конкретної панелі, що повністю нівелює негативний вплив від локального затінення, опалого листя чи забруднення сусідніх модулів. Номінальна пропускна здатність таких компактних приладів зазвичай варіюється в межах від двохсот до шестисот ват, демонструючи робочий ККД на рівні дев'яноста шести відсотків. Крім того, подібна архітектура повністю виключає наявність небезпечних високовольтних ліній постійного струму на даху будівлі, що кардинально підвищує пожежну безпеку об'єкта.

Стрингові (ланцюгові) агрегати розраховані на роботу з послідовно з'єднаними групами сонячних батарей. Вони централізовано обробляють потужність цілих масивів, загальна генерація яких може складати від одного до ста кіловат. Завдяки спрощеній топології, даний тип обладнання виділяється значно нижчою питомою вартістю капіталовкладень на кожен встановлений ват, якщо

проводити паралелі з мікроінверторними системами. Однак їхнім суттєвим недоліком залишається залежність усього стринга від найслабшого чи затіненого елемента в цьому ланцюзі.

Централізовані промислові інвертори є основою для побудови масштабних комерційних сонячних парків мегаватного класу. Ці габаритні установки монтуються у спеціальних наземних контейнерах, пропонуючи найвищий можливий коефіцієнт конвертації (близько 98,5-99%) та найменші фінансові витрати на одиницю генеруючої потужності. Проте така централізована конфігурація вимагає наявності висококваліфікованого сервісного персоналу та створює єдину точку відмови (у разі виходу з ладу одного шкафа зупиняється величезний сегмент сонячного поля).

Блоки індивідуальної оптимізації потужності (DC-DC конвертери) також інтегруються на рівні кожної окремої сонячної панелі. Їхня логіка полягає в локальному пошуку точки максимального виробітку (MPPT), після чого збалансована постійна напруга передається на класичний стринговий інвертор для остаточної трансформації у змінний струм. Подібний інженерний підхід дозволяє отримати всі переваги гнучкого панельного моніторингу та захисту від тіней, зберігаючи при цьому фінансову привабливість традиційної ланцюгової схеми.

Сучасні смарт-інвертори наділені інноваційною здатністю керувати потоками енергії у ширшому спектрі. Вони здатні ефективно гасити реактивну складову навантаження в магістралі, суттєво покращуючи загальний показник коефіцієнта потужності ($\cos \phi$) та підтримуючи стабільність локальної енергосистеми. Найбільш просунуті промислові моделі можуть функціонувати в режимі статичного синхронного компенсатора (STATCOM). Це допомагає операторам систем розподілу утримувати жорсткі нормативні параметри електромережі навіть у нічний час, коли активна сонячна генерація фізично відсутня.

Розглядаючи схемотехнічні особливості побудови базових однокаскадних систем, варто виділити специфічні структури, що базуються на використанні вольтододаткових плат. Такі компоненти зазвичай оточують головний

перетворювальний блок і обов'язково доповнюються фізичним розділенням контурів (гальванічною розв'язкою). Останній захисний бар'єр найчастіше створюється завдяки додаванню спеціального ізолюючого трансформатора на фінальному етапі трансляції змінного струму. Цей метод є концептуально схожим на багаторівневі архітектури, де залучається спільний генеруючий вузол разом із комплексом вихідних трансформаторних обмоток.

Альтернативним шляхом є інтеграція ізолюючого елемента безпосередньо в структуру первинного конвертера вхідного сигналу (це реалізується тоді, коли розробникам потрібно об'єднати обидва підходи в єдиному монолітному пристрої). Слід зазначити, що подібні інженерні рішення ідеально відповідають вимогам та специфіці перетворювачів, які проєктуються цілеспрямовано для взаємодії з масивами сонячних елементів у ролі ключового генератора струму.

Принципову побудову каскадного багатоступеневого перетворювача на базі п'яти незалежних живлячих вузлів, а також відповідні осцилограми формованої вихідної напруги наведено на рисунку 7.7.

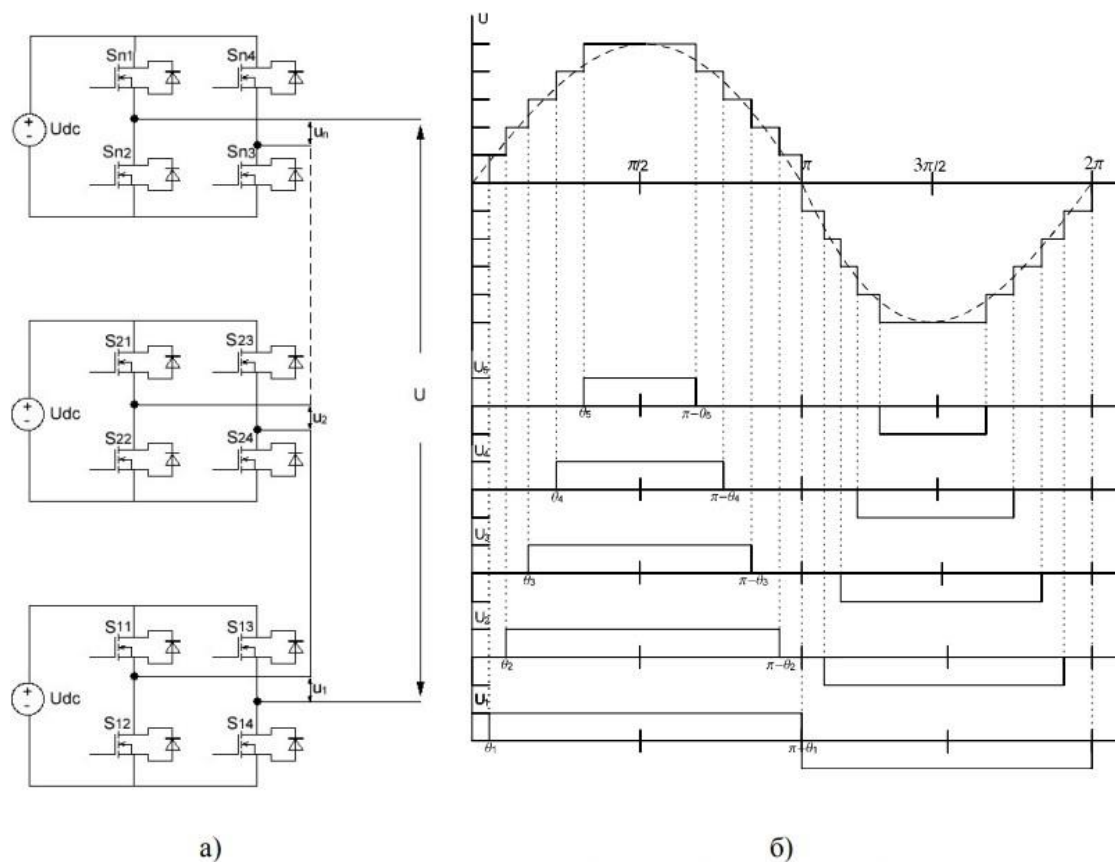


Рис. 7.7. Схема багаторівневого інвертора з (а) та графіки напруги (б)

Фізичне електромагнітне розділення ланцюгів відіграє багатогранну та надзвичайно важливу роль у всій інфраструктурі. По-перше, воно гарантує абсолютний захист сервісного персоналу від небезпечних потенціалів під час обслуговування. По-друге, такий бар'єр ефективно відсікає будь-які паразитні високочастотні чи синфазні шуми. Крім того, ізоляція дозволяє інженерам вільно створювати контури заземлення як на стороні постійної, так і змінної напруги абсолютно незалежно один від одного. Трансформаторна розв'язка здатна функціонувати на базі класичних низькочастотних масивних осердь (при стандартних 50 Гц) або ж використовувати компактні феритові високочастотні рішення (де робочі частоти сягають від 20 до 100 кГц), що радикально зменшує загальну вагу та габарити сучасного інверторного обладнання.

Архітектури багатоступеневого типу (Multilevel) відкривають шлях до

генерації синусоїдального сигналу з ідеальними параметрами, збиваючи показник нелінійних спотворень (THD) до скромних 2-3%. Водночас застосування Н-мостових каскадних схем гарантує чудову масштабованість інфраструктури, паралельно створюючи надійний запас міцності завдяки дублюванню незалежних силових плат.

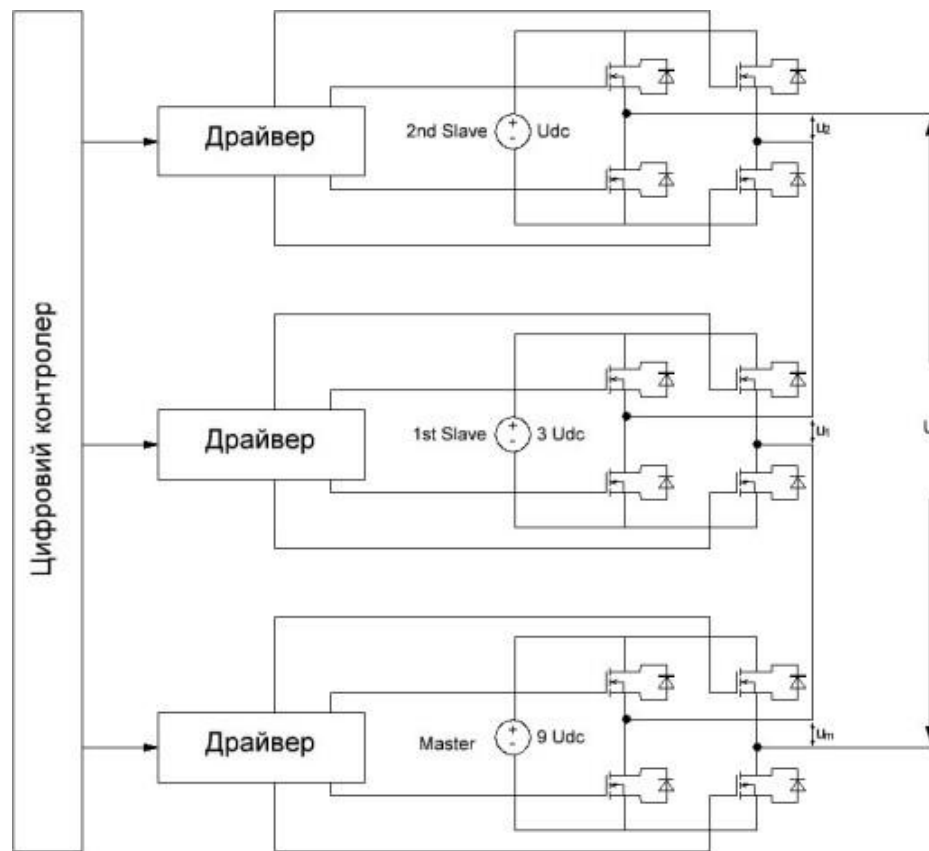
Обширний робочий коридор вхідного вольтажу контролера (так зване вікно MPPT), який простягається від 150 до 800 В, дає проєктувальникам максимальну свободу під час об'єднання сонячних батарей у ланцюги будь-якої складності. Крім того, наявність двосторонніх перетворювальних блоків відкриває шлях не лише для транзиту генерованого струму до загальної магістралі, але й для швидкісного відновлення заряду акумуляторних комірок безпосередньо від зовнішньої розетки.

Інтелектуальні механізми динамічної компенсації (Active PFC) жорстко стабілізують фактор потужності поблизу ідеальної позначки 0,99, причому цей показник залишається незмінним незалежно від непередбачуваних коливань сонячної інсоляції. Разом з тим, програмно-апаратний комплекс блокування острівного режиму (Anti-Islanding) надійно оберігає міські лінії електропередач. У разі виникнення аварії на підстанції ця автоматика миттєво відрубає транзит назовні – зазвичай на таку реакцію витрачається від 0,1 до 2 секунд.

Аналізуючи величезну кількість конвертерів, чия структура базується на послідовному об'єднанні Н-подібних ланок із відповідним показником каскадності m , фахівці виділяють дві головні категорії. Перша група передбачає наявність персонального живлячого вузла для кожної силової плати, тоді як друга спирається на використання єдиного централізованого джерела живлення.

Ступінчасті перетворювачі каскадного типу (широко відомі у світовій практиці як CHB MLI), які використовують відокремлені канали постачання енергії для окремого Н-моста, демонструють еталонну адаптивність та безпрецедентний рівень безвідмовності. Тут кожен ізольований сегмент отримує напругу від власного генератора постійного струму. У ролі такого донора може виступати виділений ланцюг фотомодулів, окрема батарейна збірка або ж самостійний вихідний порт DC/DC-трансформатора.

Ключовими плюсами подібної інженерної компоновки є наявність стовідсоткового електромагнітного розділення між усіма каскадами, а також здатність мікроконтролера виконувати персональний пошук максимуму виробітку (MPPT) для різних груп фотоелементів. Найважливіше, що навіть якщо один міст раптово вийде з ладу, вся інша установка продовжить безпечно функціонувати у штатному режимі. Сумарне число генерованих сходинок вихідної синусоїди розраховується за наступною математичною залежністю: $N = 2m + 1$, де змінна m відповідає фізичній кількості встановлених Н-подібних мостів.



a)

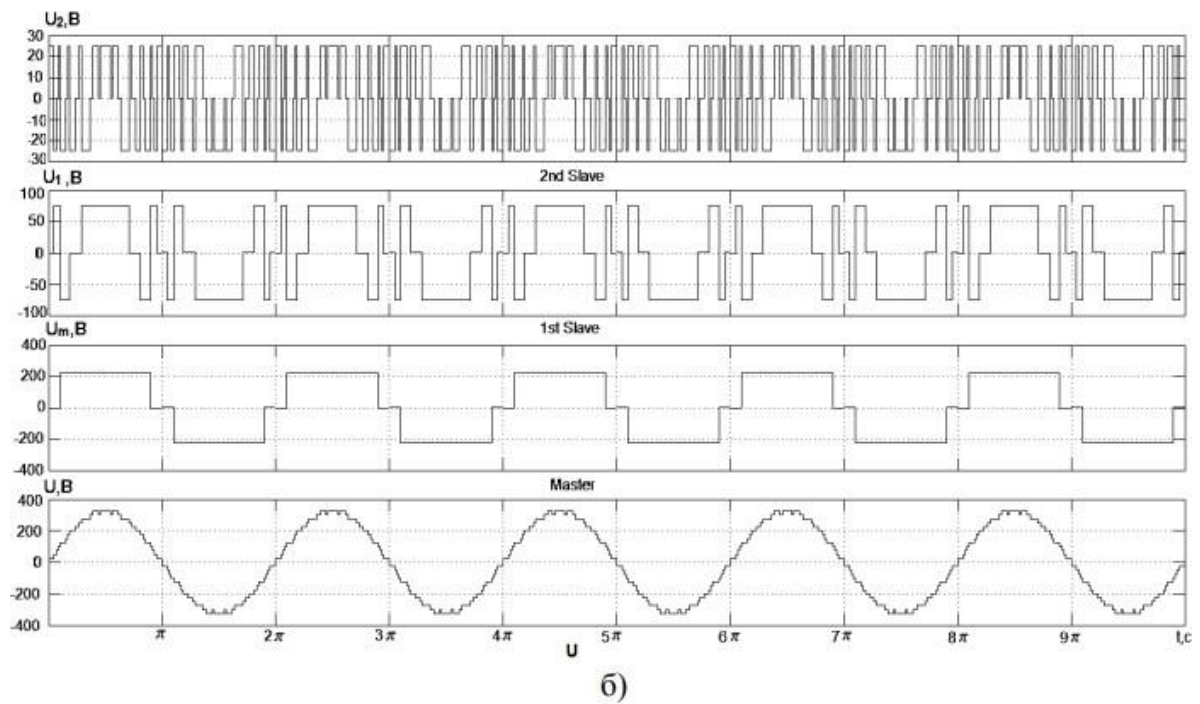


Рис. 7.8. Принципова схема ступінчастого перетворювача із трьома повністю ізольованими живлячими контурами.

Багатоступеневі перетворювальні пристрої, побудовані на основі діодної фіксації (відомі як Diode-Clamped) або топології "літаючих" ємностей (Flying Capacitor), функціонують від єдиної центральної шини постійного струму. Розподіл робочих потенціалів між наявними каскадами здійснюється завдяки інтеграції матриці розділювальних конденсаторів чи спеціалізованих напівпровідникових обмежувачів. Подібний схемотехнічний підхід гарантує суттєве зменшення фізичних габаритів обладнання та відчутну оптимізацію загальної собівартості виробництва. Проте варто зазначити, що керування "літаючими" конденсаторами вимагає значно складнішої мікропроцесорної бази.

Сьогодні найбільшої популярності на ринку набули триступеневі агрегати з фіксованою нульовою точкою (скорочена назва NPC). Вони здатні ефективно утримувати коефіцієнт нелінійних викривлень на позначці нижче п'яти відсотків, оперуючи в типовому частотному діапазоні перемикання від двох до десяти кілогерц. Задля ідеального вирівнювання вольтажу на накопичувачах вхідної ланки розробники застосовують високоінтелектуальні програмні сценарії керування

транзисторами (переважно IGBT або сучасними SiC MOSFET).

Традиційна технологія синусоїдального широтно-імпульсного керування (скорочено SPWM) відповідає за генерацію змінного струму з надзвичайно низьким вмістом паразитних частот. Що стосується складних багатокаскадних схем, тут доцільно впроваджувати глибоко модернізовані математичні інструменти: модуляцію з фазовим або рівневим зсувом (Phase-Shifted та Level-Shifted PWM відповідно). Крім того, надзвичайно ефективним є метод просторово-векторної модуляції (SVM), який дозволяє на 15% краще використовувати доступну напругу шини постійного струму.

Концепція вибіркового придушення вищих гармонік (у міжнародній літературі SHE-PWM) дає можливість точково нейтралізувати найбільш шкідливі частотні компоненти низького порядку. Ця інноваційна методика допомагає досягти феноменального показника спотворень (менше двох відсотків) навіть за повної відсутності масивних згладжуючих LC-фільтрів на виході інвертора. Водночас раціоналізовані алгоритми перемикання силових ключів радикально знижують обсяги теплових втрат кристалів, гарантуючи при цьому еталонну якість згенерованої синусоїдальної кривої.

Блочно-модульний принцип побудови ступінчастих перетворювачів стає бездоганним рішенням під час проєктування масштабних комерційних сонячних полів. На таких об'єктах виникає гостра потреба ефективно трансформувати колосальні обсяги енергії: починаючи від кількох сотень кіловат і закінчуючи десятками мегават. Гнучкість подібної архітектури дає змогу інвесторам поступово масштабувати генеруючі потужності, додаючи нові апаратні блоки паралельно із фактичним зростанням попиту підприємства на електрику.

Завдяки генерації практично ідеальної синусоїдальної кривої з мінімальними викривленнями, інженери можуть суттєво зекономити на встановленні громіздких та дорогих пасивних LC-фільтрів. Це безпосередньо впливає на преміальну якість струму, який експортується до об'єднаної магістралі. Крім того, вражаючий коефіцієнт корисної дії (який часто перевищує позначку 98,5 відсотка) разом із феноменальною апаратною стійкістю перетворюють ці комплекси на найбільш

раціональний вибір для великого енергетичного бізнесу.

Розглядаючи топологію із застосуванням єдиного централізованого живлячого вузла, варто зазначити ключову роль інтегрованих вихідних трансформаторів. Саме вони відповідають за точне формування потрібних номіналів напруги на кожному окремому каскаді складної перетворювальної установки.

Детальну структурну організацію такої електромеханічної системи продемонстровано на рисунку 7.9.

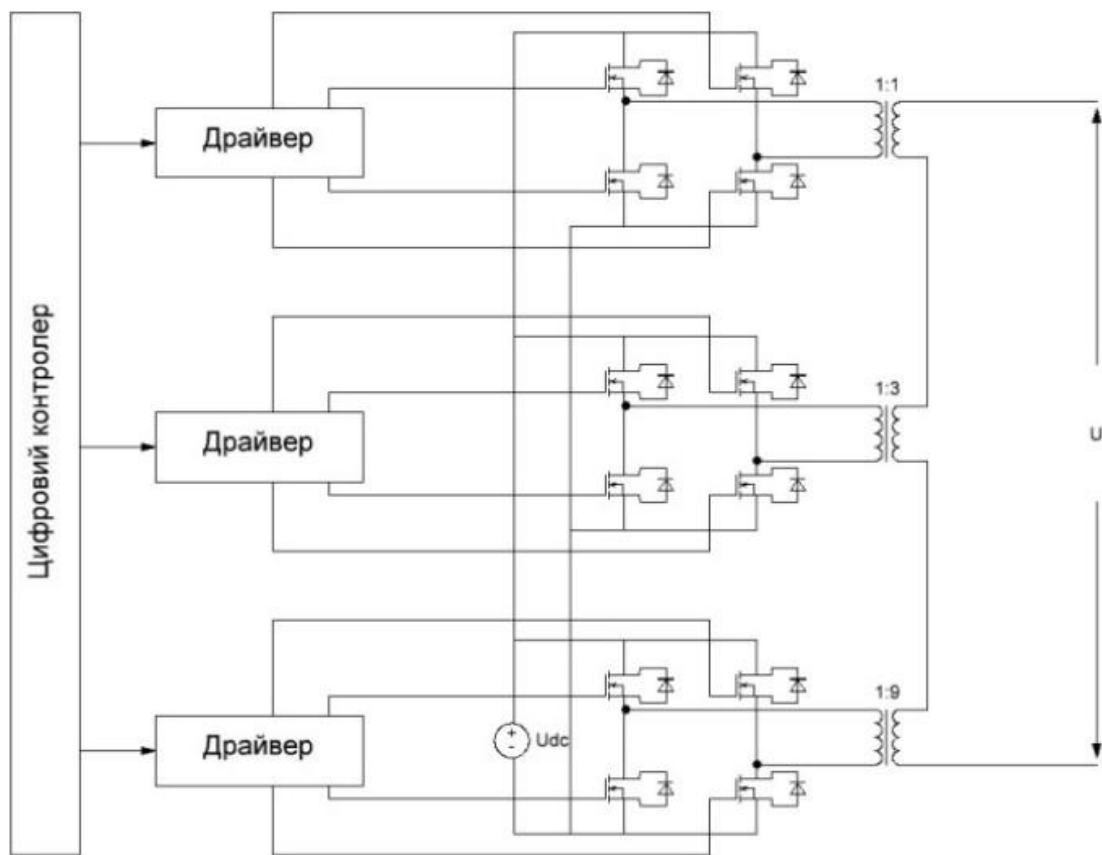


Рис. 7.9. Принципова схема багатоступеневого інвертора, оснащеного єдиною шиною постійного струму та каскадом вихідних трансформаторів

Головна лінія постійного струму (DC-шина) паралельно роздає живлення на цілий масив незалежних однофазних напівпровідникових мостів Н-типу. При цьому до виходу кожного такого силового модуля жорстко прив'язаний персональний трансформатор. Для досягнення максимальної ефективності показники трансформації розраховуються на базі суворої геометричної прогресії

(наприклад, 1:1, потім 1:2, далі 1:4 і так далі). Цей продуманий математичний підхід дозволяє згенерувати величезну кількість сходинок синусоїди, загальне число яких обчислюється за формулою 2^n (де параметр n відображає сумарну кількість залучених трансформаторних котушок).

Усі вторинні контури згаданих трансформаторів комутуються між собою у суворій послідовності. Це робиться задля того, щоб їхні індивідуальні потенціали безперешкодно підсумовувалися у фінальну вихідну напругу станції. Блискавично змінюючи полярність підключення конкретних обмоток за допомогою швидкісних IGBT-транзисторів, мікропроцесор майстерно "малює" багатоступеневу криву. Форма цієї хвилі настільки наближена до еталонного синуса, що вміст шкідливих високочастотних гармонік зводиться практично до нуля.

7.3 Проєктування та аналіз перетворювального обладнання для фотоелектричних комплексів

Сучасні масиви сонячних панелей концептуально поділяються на дві базові архітектурні категорії: повністю ізольовані від зовнішніх магістралей (Off-grid) та інтегровані в єдину державну енергосистему (On-grid). Установки автономного формату чудово справляються із прямим заживленням локального обладнання. Однак, щоб не втрачати безкоштовно згенеровані кіловати в моменти нульового споживання об'єктом, вони обов'язково комплектуються масштабними банками хімічних накопичувачів задля резервування заряду.

Конфігураціям без доступу до централізованої лінії властиві специфічні техніко-економічні недоліки. Серед ключових мінусів варто виділити відчутне падіння сумарного коефіцієнта корисної дії (через неминучі тепловтрати під час циклів заряду-розряду), колосальні капіталовкладення на придбання якісного батарейного парку, а також жорсткі фізичні ліміти щодо максимальної місткості збереженого ресурсу. Крім того, інженерам доводиться систематично проводити сервісний нагляд за станом комірок, експлуатаційний життєвий цикл яких вичерпується у кілька разів швидше, порівняно з гарантійним строком служби

самих кремнієвих фотомодулів.

З іншого боку, синхронні генераційні комплекси демонструють кардинально вищі показники загальної ефективності та рентабельності. Це легко пояснюється їхньою здатністю безперешкодно транслювати всі невикористані залишки виробленого струму безпосередньо у загальноміську мережу, повністю уникаючи етапу проміжного хімічного акумулювання. Завдяки спеціальним державним механізмам фінансового стимулювання, таким як класичний "Зелений тариф" або новітня модель чистого взаємозаліку (Net Billing), власники генеруючих потужностей можуть законно монетизувати кожен експортований кіловат.

Для безпечної реалізації такого транзиту застосовуються спеціалізовані мережеві інвертори (Grid-tie). Їхня мікропроцесорна база наділена складним програмним забезпеченням, яке відповідає за ідеальну мілісекундну синхронізацію формованої синусоїди із жорсткими магістральними стандартами. Така автоматика безперервно аналізує вхідний сигнал, щоб філігранно підлаштувати опорну частоту, амплітуду вихідної напруги та точний кут зсуву фаз перед тим, як пустити струм назовні.

Передові методики конструювання перетворювачів обов'язково базуються на принципах широтно-імпульсного керування (ШІМ). Цей складний математичний алгоритм перемикання транзисторів гарантує формування бездоганно чистої кривої змінного струму. Ключовим критерієм оцінки якості генерованої енергії залишається сумарний рівень нелінійних викривлень (широковідомий як THD або КГС). Відповідно до суворих глобальних електротехнічних нормативів, даний показник зобов'язаний жорстко триматися нижче п'ятивідсоткової позначки. Водночас загальна енергоефективність (ККД) топових промислових агрегатів сьогодні впевнено перетинає рубіж 95–98 відсотків, зводячи теплові втрати до мінімуму.

Принципову візуалізацію топології комутації фотоелектричних модулів продемонстровано на наступній ілюстрації.

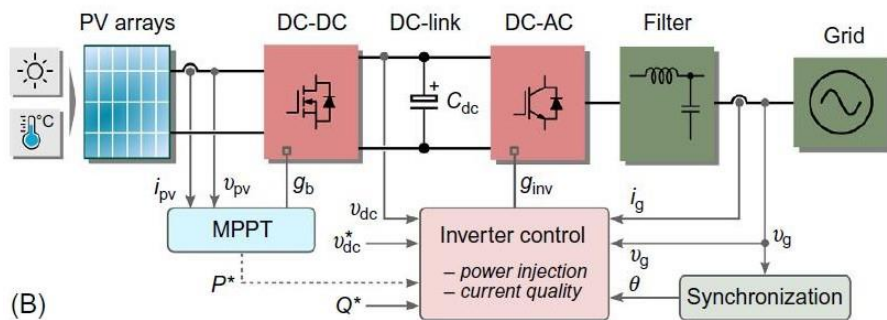


Рис.7.10. Архітектура електричного з'єднання сонячних батарей у генеруючий масив

У межах архітектури будь-якої сонячної станції первинним етапом обробки зібраної потужності завжди стає робота транзитних DC/DC перетворювачів постійного струму. Зважаючи на величезну різницю потенціалів між окремими силовими вузлами, яку інженерам доводиться постійно згладжувати, розробники впроваджують одразу кілька кардинально різних типів узгоджувальної електроніки.

Спеціалізовані вольтододаткові схеми (імпульсні Boost-конвертери) виконують роль помпи, значно піднімаючи рівень вихідної напруги відносно первинного джерела. Таке схемотехнічне рішення є критично необхідним задля ідеального узгодження відносно слабких сонячних стрінгів із високовольтними внутрішніми шинами (DC-link) головних перетворювачів. Крім того, саме ця апаратна ланка бере на себе надзвичайно важливе завдання: здійснення безперервного мікропроцесорного пошуку глобального максимуму виробітку (технологія MPPT) для кожного підключеного масиву фотоелементів.

Натомість знижувальні імпульсні плати (топологія Buck) виконують абсолютно дзеркальну функцію: вони цілеспрямовано зрізають зайвий вольтаж задля безпечного заживлення слабострумової апаратури або контролерів накопичувальних масивів. Їхня присутність є життєво необхідною переважно в ізольованих (острівних) мікромережах. Адже саме там регулярно виникає технічна необхідність трансформувати високу напругу сонячного поля у стандартні 12 В чи 24 В, які вимагаються для правильного та безпечного заряджання класичних свинцево-кислотних або літєвих батарей.

Універсальні інвертуючі каскади (відомі серед інженерів як архітектура

Buck-Boost) гарантують максимальну адаптивність генеруючого комплексу під час постійних змін рівня інсоляції. Це вкрай важливо, адже вольтаж на клеммах фотомодулів здатен динамічно коливатися у величезному діапазоні. На такі різкі перепади безпосередньо впливає не лише поточна яскравість сонячних променів, але й ступінь термічного нагрівання самих кремнієвих кристалів (на що безпосередньо вказує фізичний температурний коефіцієнт падіння напруги).

Передові мікропроцесорні трекери максимуму виробітку (MPPT) обов'язково спираються на складні математичні інструменти. Найчастіше розробники впроваджують класичний алгоритм збурення та подальшого спостереження (Perturb & Observe), або ж застосовують швидшу і точнішу логіку інкрементної провідності (Incremental Conductance). Подібні програмні сценарії допомагають миттєво витягувати абсолютний максимум потужності з масиву, демонструючи феноменальний показник ефективності перетворення на рівні дев'яноста дев'яти відсотків (за умови, що апаратура працює у штатному температурному коридорі).

Імпульсні перетворювальні плати (DC/DC) із вбудованим фізичним розділенням контурів монтуються спеціально заради створення надійного гальванічного бар'єра між розрізненими апаратними вузлами станції. Такий продуманий інженерний підхід кардинально підвищує загальні стандарти електробезпеки для сервісного персоналу, а також надзвичайно ефективно відсікає паразитні високочастотні шуми чи шкідливі електромагнітні наведення.

Наступна група графічних матеріалів (починаючи від ілюстрації 7.11 і закінчуючи 7.13) наочно розкриває схемотехнічну побудову та фізичну специфіку роботи вольтододаткового силового модуля.

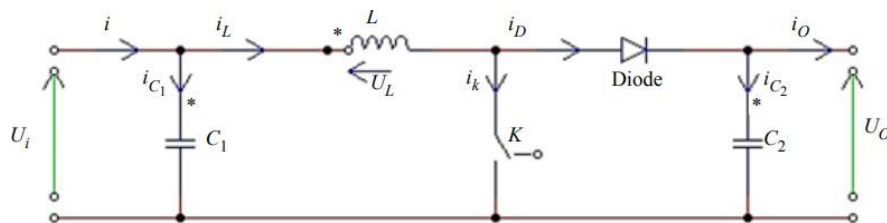


Рис. 7.11. Базова структурна модель імпульсного Boost-конвертера

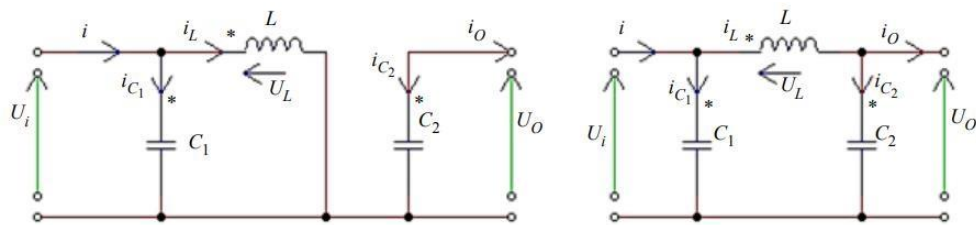


Рис. 7.12. Ключові експлуатаційні стани функціонування вольтододаткового каскаду.

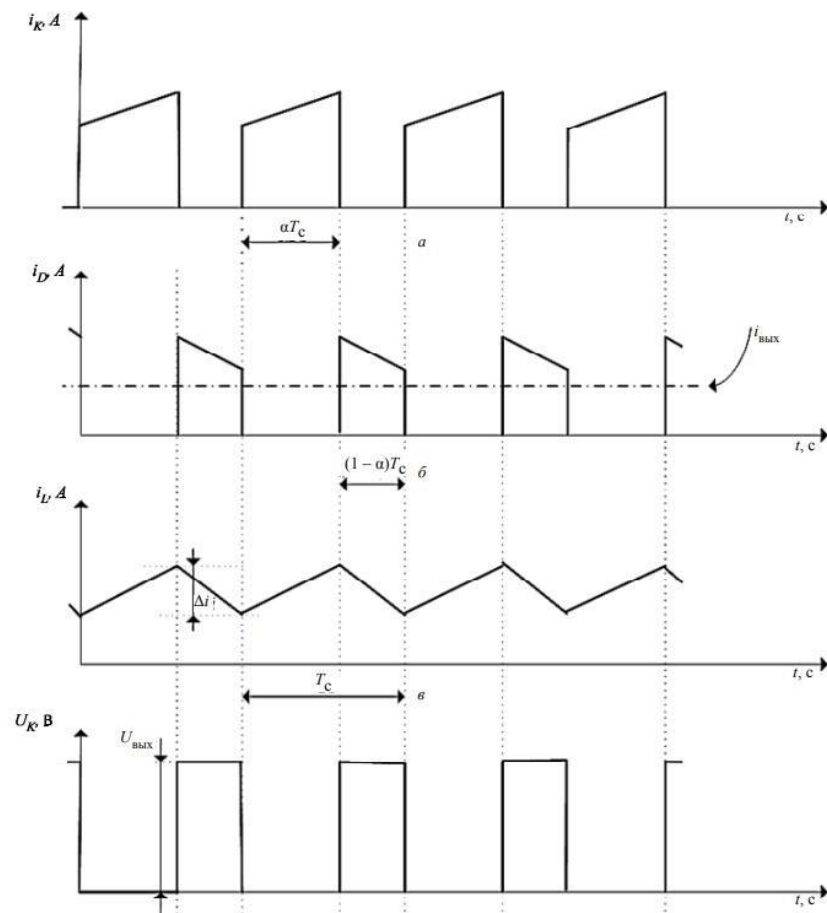


Рис. 7.13. Часові осцилограми перехідних процесів у підвищувальному блоці.

7.4 Моделювання роботи фотоелектричної станції

Графічна візуалізація цифрового двійника сонячного енергокомплексу, створеного за допомогою програмного середовища MATLAB із використанням пакету симулювання Simulink, демонструється на рисунку 7.14.

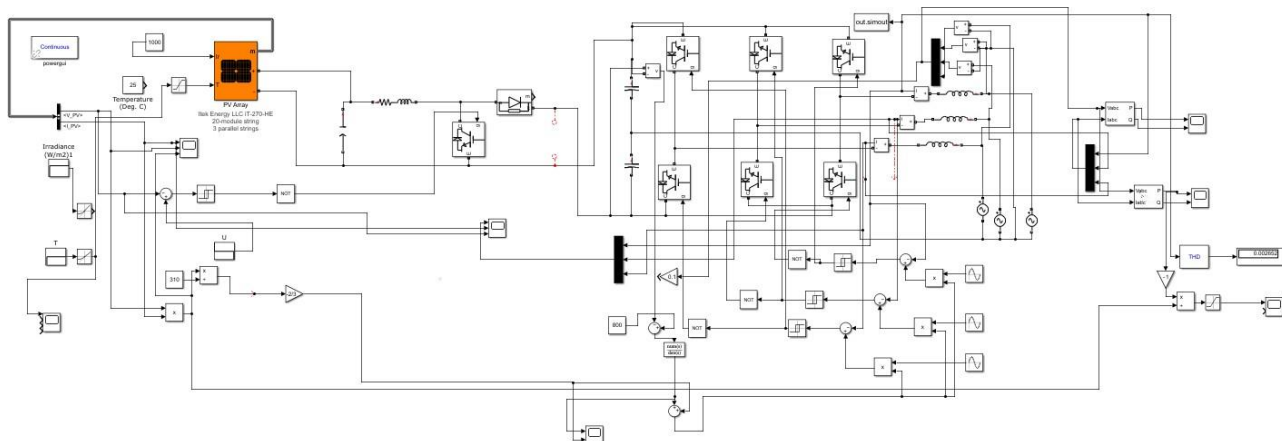


Рис. 7.14. Структурна схема віртуальної моделі фотоелектричної установки, імплементованої в програмному комплексі MATLAB/Simulink

Графіки залежностей генерованого струму від потенціалу, включно з кривими розподілу вихідної потужності відносно вольтажу для обраного кремнієвого елемента (за умови фіксованої інсоляції та змінного термічного навантаження), показано на наступній ілюстрації (схема 7.15).

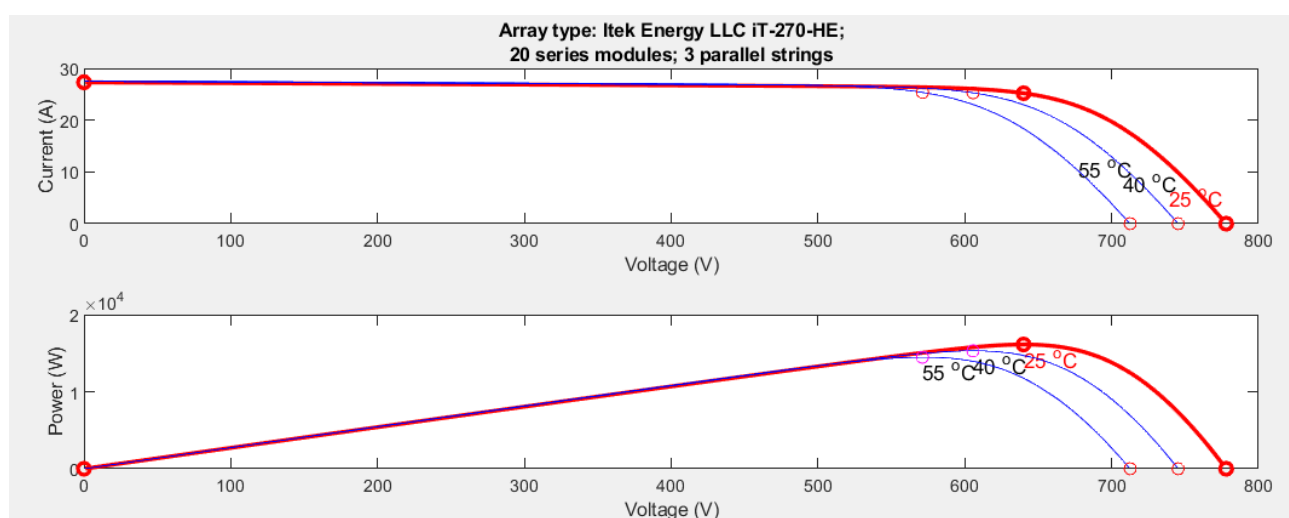


Рис. 7.15. Сімейство вольт-амперних та ват-вольтних кривих обраного сонячного модуля під час впливу різних температурних градієнтів

Детальне вивчення динаміки зміни вольт-амперних параметрів (ВАХ) переконливо доводить наявність сильної негативної кореляції між нагріванням напівпровідника та загальним рівнем його продуктивності. Під час підвищення теплового фону фіксується стрімке падіння показника напруги розімкнутого контуру (V_{oc}). Для традиційних пластин на базі кристалічного кремнію цей

температурний коефіцієнт деградації зазвичай дорівнює близько $-0,33\%$ при кожному додатковому градусі нагрівання за шкалою Цельсія (через зміну ширини забороненої зони напівпровідника).

Водночас ампераж під час короткого замикання (I_{sc}) демонструє зворотну тенденцію: він ледь помітно зростає (приблизно на $+0,05\%$ на кожен кельвін або градус Цельсія) через збільшення енергії носіїв заряду. Однак подібне мізерне збільшення провідності абсолютно не здатне перекрити суттєві втрати вольтажу. Як наслідок, глобальна пікова продуктивність модуля (точка P_{max}) невідворотно деградує. Сумарні енергетичні втрати становлять від $0,4\%$ до $0,5\%$ загальної генерації при кожному кроці зростання тепла вище нормативної базової позначки 25°C (яка строго регламентована міжнародними стандартами STC – Standard Test Conditions).

Глобальний екстремум виробітку (точка MPP) неминуче мігрує у бік менших значень вольтажу під час сильного нагрівання кристала. Тому виникає гостра необхідність у застосуванні динамічних мікропроцесорних сценаріїв відстеження максимуму потужності (MPPT), щоб гарантувати найвищий рівень генерації при будь-яких температурних флуктуаціях.

Параметр прямокутності кривої (відомий у світовій інженерній практиці як Fill Factor), який безпосередньо візуалізує якість вольт-амперної характеристики, також помітно деградує під час перегріву. Це пояснюється стрімким збільшенням паразитних термічних опорів усередині напівпровідникового p-n переходу. Для висококласних кремнієвих модулів цей метричний показник зазвичай коливається в межах від сімдесяти п'яти до вісімдесяти п'яти відсотків (за умови дотримання еталонних лабораторних норм).

Розуміння подібних теплових кореляцій відіграє вирішальну роль на етапі конструювання вентиляційних контурів інверторів та під час визначення ідеальних експлуатаційних параметрів сонячних електростанцій. Даний аспект набуває особливої значущості у тих географічних зонах, де спостерігається екстремальна спека в літні місяці.

Графічне відображення залежностей генерованого струму від потенціалу,

						77

включно з кривими розподілу вихідної потужності відносно робочої напруги для досліджуваного елемента (за умови фіксованого термічного фону та різної інтенсивності інсоляції), наведено на ілюстрації 7.16.

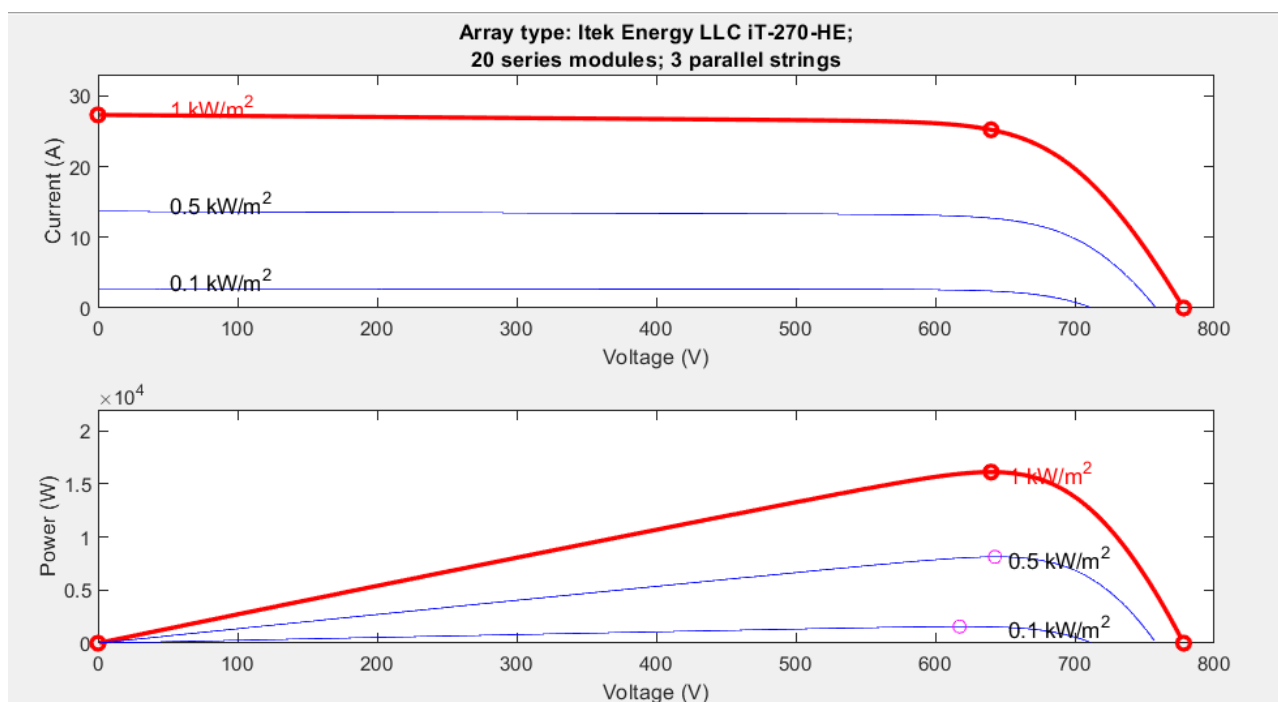


Рис. 7.16. Експлуатаційні характеристики фотомодуля за умов незмінної температури та змінного рівня освітленості

Глибокий аналіз впливу рівня інсоляції на робочі параметри кремнієвих пластин яскраво демонструє абсолютно пряму пропорційність між струмом короткого замикання та потужністю падаючого світла. Наприклад, якщо інтенсивність випромінювання падає з еталонних 1000 Вт/м² до позначки 200 Вт/м², робочий ампераж синхронно зменшується рівно вп'ятеро. Таке явище фізично підтверджує жорсткий зв'язок між кількістю поглинутих квантів світла (фотонів) та загальним обсягом вивільнених носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі.

Показник потенціалу розімкнутого контуру (V_{oc}) підпорядковується логарифмічному закону відносно потужності світлового потоку. Якщо порівнювати з динамікою амперажу, то падіння вольтажу внаслідок погіршення інсоляції відбувається значно повільніше. Наприклад, якщо інтенсивність сонячних променів скорочується у п'ять разів, робоча напруга просідає сумарно лише на

[illegible]

десять-п'ятнадцять відсотків від свого еталонного номіналу.

Що стосується пікової генерації енергії модулем (P_{max}), то вона практично прямо пропорційно реагує на кількість поглиненої радіації. Слід нагадати, що базові критерії випробувань (відомі як STC – Standard Test Conditions) спираються на суворо зафіксовані параметри: потужність випромінювання на рівні 1000 Вт/м², нагрівання кристала до 25°C та показник прозорості атмосфери AM1.5. Проте на практиці інтенсивність світла є вкрай нестабільною величиною. Вона здатна коливатися від скромних 100-200 Вт/м² під час щільної дощової хмарності до екстремальних 1200-1400 Вт/м² у безхмарні літні дні (завдяки ефекту оптичного лінзування атмосферою).

Параметр прямокутності вольт-амперної кривої (Fill Factor) суттєво деградує в умовах слабкого освітлення. Це негативне явище фізично пояснюється домінуванням паразитних шунтуючих опорів (струмів витоку) та стрімким зростанням масштабів рекомбінації носіїв заряду всередині напівпровідника. Зазначений фактор набуває критичної важливості тоді, коли генеруючий масив функціонує під дією відбитого чи розсіяного світла, або ж під час світанку та глибоких сутінків.

Передові мікропроцесори пошуку екстремуму генерації (MPPT) зобов'язані безперервно враховувати всі згадані вище нелінійні флуктуації. Лише завдяки складним математичним алгоритмам інвертор здатен філігранно знаходити та утримувати ідеальну робочу точку попри постійну зміну погоди, щільність хмар чи кут стояння сонця на небосхилі протягом доби.

Графічне зведення отриманих симуляційних даних представлено на ілюстрації 7.17.

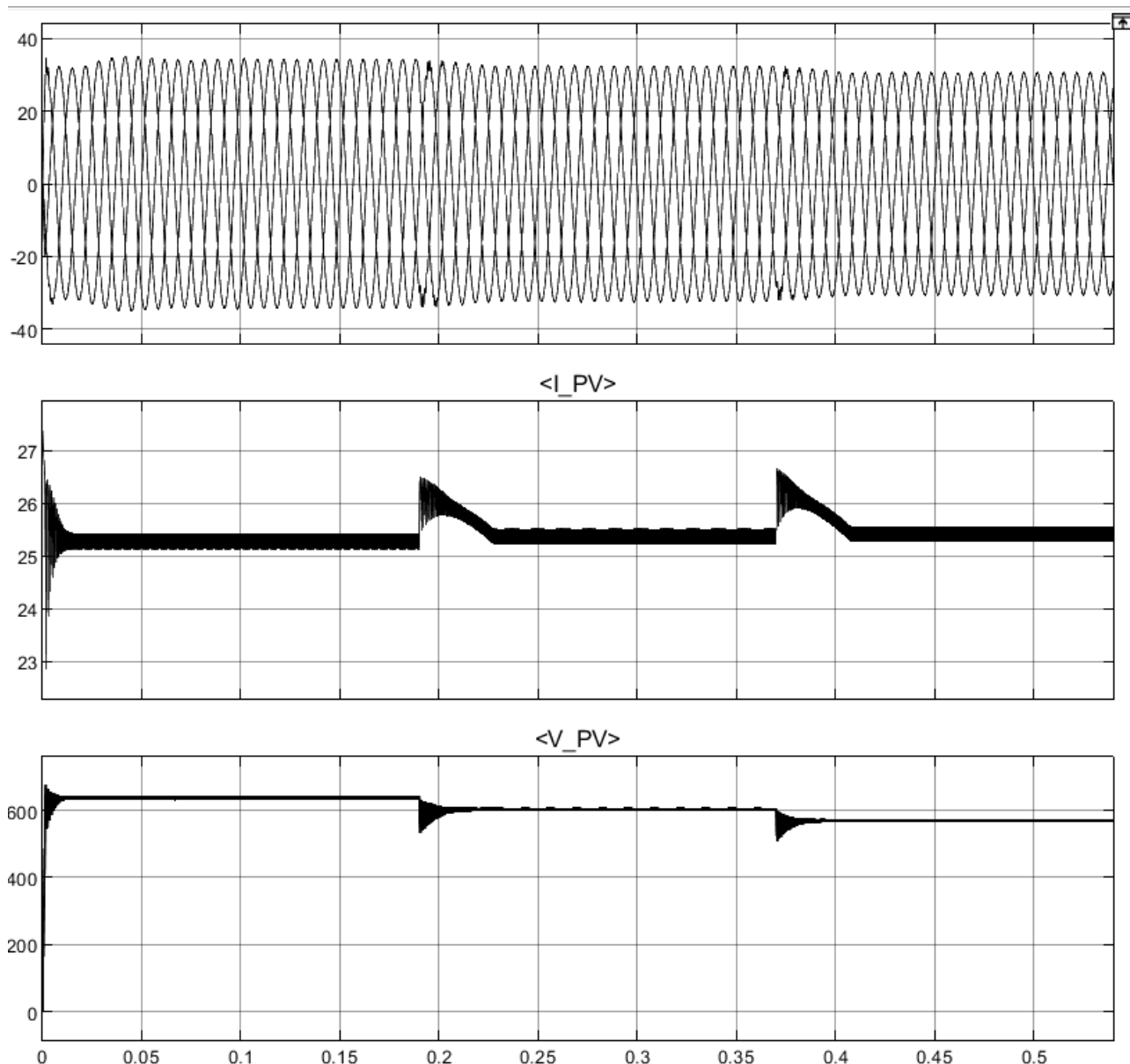


Рис. 7.17. Візуалізація підсумкових метрик віртуального моделювання роботи фотоелектричного генеруючого вузла.

Електрична енергія, яка експортується у загальну магістраль, характеризується ідеальною синусоїдальною кривою. Під час різких перепадів термічного фону довкілля мікропроцесорна автоматика блискавично перераховує оптимальні показники вольтажу задля вилучення абсолютної межі доступної генерації з масиву фотомодулів.

Проведене глибоке комп'ютерне симулювання чітко довело: незалежно від обраного формату навантаження, загальний індекс нелінійних викривлень (відомий як THD або КГС) стабільно фіксується на позначці 2,6 відсотка. Цей

чудовий результат беззаперечно відповідає найсуворішим нормативам, які регламентують експлуатаційну чистоту струму.

Отримання настільки мізерного значення паразитних спотворень слугує прямим підтвердженням бездоганної роботи вбудованих математичних моделей ШІМ-керування силовими ключами. Слід підкреслити, що глобальні директиви (зокрема стандарти ІЕС 61727 разом із сертифікацією ІЕЕЕ 519) обмежують максимально допустимі викривлення для мережевих перетворювачів п'ятьма відсотками. Отже, зафіксований нами показник формує колосальний технологічний резерв надійності.

Інтелектуальні контролери пошуку максимуму виробітку (MPPT) миттєво підлаштовуються під будь-які кліматичні флуктуації. Для досягнення цієї мети розробники імплементують складні механізми нечіткої логіки (Fuzzy Logic) або ж спираються на класичний алгоритм градієнтного спуску. Зазвичай процес повного перерахунку та фіксації нового глобального екстремуму займає від ста мілісекунд до однієї секунди, що прямо корелює із динамікою поведінки метаморфоз на вулиці.

Бездоганна плавність формованої хвилі стає можливою завдяки впровадженню ступінчастих (каскадних) схем трансформації струму. Альтернативним підходом є використання швидкісних імпульсних модуляцій, де транзистори інвертора перемикаються із надзвичайно високою частотою – від десяти до двадцяти кілогерц. Подібна архітектура практично обнуляє шкідливі високочастотні гармоніки, гарантуючи ідеальну електромагнітну сумісність (ЕМС) генеруючого вузла із чутливою технікою локальних абонентів.

Комплексний нагляд за параметрами згенерованої напруги обов'язково передбачає жорстке відстеження фактора потужності ($\cos \varphi$). Відповідно до актуальних інженерних норм, він зобов'язаний стабільно триматися вище позначки 0,9. Лише за таких умов вдається максимально раціонально завантажувати кабельні магістралі та трансформаторні підстанції, радикально скорочуючи обсяги шкідливих реактивних перетікань струму в загальній системі.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи було розроблено комплексну, надійну та техніко-економічно обґрунтовану систему електропостачання підприємства цементної промисловості. Процес проектування охопив повний цикл інженерних розрахунків: від визначення початкових електричних навантажень до вибору високовольтного комутаційного обладнання та дослідження інтеграції новітніх відновлюваних джерел енергії.

На основі проведених теоретичних досліджень та практичних обчислень можна зробити наступні ключові висновки:

За допомогою методу впорядкованих діаграм (коефіцієнта максимуму) було детально розраховано силові та освітлювальні навантаження для всіх структурних підрозділів заводу. Зведене розрахункове навантаження по підприємству склало понад 3950 кВт активної та 2580 квар реактивної потужності. Для мінімізації втрат напруги та зниження капітальних витрат на кабельну продукцію було побудовано картограму навантажень та обчислено координати умовного центру електроспоживання ($X=96,90$ м; $Y=46,55$ м). Це дозволило оптимально розмістити головний розподільний пункт підприємства безпосередньо поблизу найбільш енергоємних об'єктів (пічного цеху та відділення сировинних млинів). Крім того, були побудовані добові та річні графіки електроспоживання, що дало змогу визначити річні витрати електроенергії (близько 21,9 млн кВт·год) та час використання максимуму навантаження ($\tau = 3235$ год).

На етапі проектування зовнішньої мережі живлення було проведено глибокий техніко-економічний аналіз двох конкурентних варіантів: прокладання кабельної лінії (КЛ) 10 кВ та спорудження повітряної лінії (ПЛ) 35 кВ. Математичне моделювання приведених витрат довело беззаперечну перевагу першого варіанта. Зведені затрати для КЛ 10 кВ склали 2047,67 тис. грн, що майже вдвічі менше порівняно з ПЛ 35 кВ (3965,27 тис. грн), головним чином за рахунок менших капітальних інвестицій у трансформаторне обладнання та нижчих втрат електроенергії.

						82

Для внутрішньозаводської розподільчої мережі було обрано радіальну схему. Вона гарантує максимальну надійність живлення безперервних технологічних процесів, високу селективність релейного захисту та простоту локалізації можливих аварійних пошкоджень.

Оскільки підприємство характеризується значним споживанням реактивної енергії, було спроектовано багаторівневу систему її компенсації. З метою оптимізації капіталовкладень розглядалися три варіанти комплектації цехових підстанцій: з 9, 10 та 11 трансформаторами. Аналіз економічної ефективності підтвердив, що встановлення 9 трансформаторів забезпечує найменші приведені витрати (4742,96 тис. грн). Для підтримання нормативного коефіцієнта потужності та розвантаження мереж передбачено встановлення низьковольтних та високовольтних батарей статичних конденсаторів (БСК). Сумарна потужність низьковольтної компенсації склала 1925 квар, а високовольтної — 911 квар, що повністю покриває дефіцит реактивної потужності.

На базі отриманих значень розрахункової повної потужності та з урахуванням компенсації реактивної енергії було підібрано силові трансформатори для п'яти двотрансформаторних та однострансформаторних підстанцій. Вибір потужності (переважно апарати номіналом 630 кВА) здійснювався за умовою економічного завантаження в нормальному режимі ($K_{зав} \approx 0,7$) та здатності витримувати допустимі перевантаження (до 40%) в післяаварійних ситуаціях при виході з ладу одного з трансформаторів у двомодульній підстанції.

Для перевірки стійкості елементів мережі до аварійних струмів було розраховано струми короткого замикання в характерних точках (на шинах 10 кВ та 0,4 кВ). Наприклад, сумарний початковий надперехідний струм КЗ на шинах 10 кВ (I''_{K1}) з урахуванням підживлення від високовольтних асинхронних двигунів склав 3,14 кА, а ударний струм ($i_{уд}$) - 5,00 кА.

Опираючись на ці дані, було здійснено перевірку кабельних ліній на термічну стійкість (обрано надійні кабелі марки ААШв). Також підібрано сучасне високовольтне комутаційне обладнання: вакуумні вимикачі ВР2-10-20/630, що відрізняються високим комутаційним ресурсом, екологічністю та

						83

пожежобезпекою. Захист ізоляції від перенапруг забезпечується обмежувачами ОПН-10. Для живлення систем управління та захисту обрано трансформатор власних потреб ТМ-40/10. Все обране обладнання успішно пройшло перевірку на термічну та електродинамічну стійкість.

У науково-дослідному розділі проекту розглянуто актуальне питання підвищення енергетичної автономності промислового об'єкта шляхом інтеграції систем гарантованого енергозабезпечення на базі фотоелектричних установок та накопичувачів енергії. Доведено ефективність застосування інверторів з алгоритмами MPPT (Maximum Power Point Tracking) для максимізації генерації. Розглянуто режими використання літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторних батарей для управління графіком навантаження, зокрема реалізацію стратегій «Load Shifting» (тимчасове зсування споживання) та «Peak Shaving» (зрізання піків потужності). Використання інтелектуальних систем енергоменеджменту (EMS) дозволяє створити стійку мікромережу (microgrid), що в умовах сучасних викликів та нестабільності об'єднаної енергосистеми України є критично важливим кроком для забезпечення безперебійної роботи підприємства.

Запропонована в бакалаврській роботі система електропостачання відповідає чинним нормативним документам (ПВЕ, ДБН, стандартам якості електроенергії). Спроектована мережа характеризується високим рівнем безпеки, безперебійності, економічної доцільності та готовності до впровадження сучасних Smart-технологій і відновлюваних джерел енергії. Отримані результати можуть бути використані при реальному проектуванні або реконструкції електромереж підприємств будівельної чи важкої промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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