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
“___“ _____2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Проєктування електротехнічної системи електроспоживання цементного заводу»

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ЕЕ–21,
ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Владислав КРИКОТНЕНКО
«____»_____2025 р.

Керівник роботи
професор, канд. техн. наук
_____Лариса ВІХРОВА
«_____»_____2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *будівництва, транспорту та енергетики*
Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*
Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*
Галузь знань *14 «Електрична інженерія»*
Спеціальність *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*
Освітньо-професійна програма *«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ
_____Петро ПЛЄШКОВ
«_____»_____2025 р.

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

Крикотненка Владислава Геннадійовича
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи *Проєктування електротехнічної системи електроспоживання цементного заводу*
Design of the electrical system for electricity consumption of a cement plant
2. Керівник роботи *Віхрова Лариса Григорівна, канд. техн. наук, професор*
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту *03.06.2025 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. *Метою роботи є розробка системи електропостачання цементного заводу. 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
Спеціальний розділ	*доцент Н.Ю. Гарасьова*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Розрахунок електричних навантажень*	*03.02-19.02*	
2	*Картограма електричних навантажень*	*20.02-28.02*	
3	*Техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання*	*01.03-12.03*	
4	*Режими реактивної потужності системи електропостачання*	*13.03-01.04*	
5	*Вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства*	*2.04-12.04*	
6	*Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання*	*13.05-01.05*	
7	*Спеціальний розділ*	*02.05-20.05*	
8	*Оформлення презентаційної частини БКР*	*21.05-26.05*	
9	*Оформлення пояснювальної записки БКР*	*27.05-02.06*	

Дата видачі завдання
«____» _____2025 р.

Підпис керівника _____ Лариса ВІХРОВА

Завдання прийнято до виконання
«____» _____2025 р.

Підпис здобувача _____ Владислав КРИКОТНЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 79 с.; 21 рис.; 26 табл.; 5 джерел

Крикотненко В. Г. Проєктування електротехнічної системи електроспоживання цементного заводу. – Рукопис.

Бакалаврська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025 рік.

Дана робота була присвячена розв'язанню завдання проектування комплексної системи енергозабезпечення для цементного виробництва.

У процесі виконання проекту було здійснено детальний аналіз електричних навантажень підприємства. Проведено обчислення основних параметрів графіків споживання електроенергії, що дозволило визначити пікові та базові режими роботи обладнання. Особлива увага приділялась дослідженню режимів реактивної потужності, оскільки цементні заводи характеризуються значним споживанням реактивної енергії через наявність великої кількості асинхронних двигунів та трансформаторів.

Додатково виконано комплексний аналіз можливих режимів короткого замикання в електричній мережі підприємства. Ці розрахунки є критично важливими для правильного вибору комутаційного обладнання та налаштування релейного захисту.

На підставі отриманих розрахунків було здійснено обґрунтований вибір всіх компонентів високовольтної електричної мережі виробництва.

Ключові слова: розрахункові навантаження, електрична мережа, графіки навантажень

ABSTRACT

Qualification work: 79 p.; 21 Fig.; 26 tables; 5 sources

Krykotnenko V. Design of the electrical system for electricity consumption of a cement plant. – 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, 2025.

This work was devoted to solving the problem of designing a comprehensive power supply system for cement production.

During the project implementation, a detailed analysis of the electrical loads of the enterprise was carried out. The main parameters of the electricity consumption schedules were calculated, which made it possible to determine the peak and base operating modes of the equipment. Particular attention was paid to the study of reactive power modes, since cement plants are characterized by significant consumption of reactive energy due to the presence of a large number of asynchronous motors and transformers.

Additionally, a comprehensive analysis of possible short-circuit modes in the enterprise's electrical network was performed. These calculations are critically important for the correct selection of switching equipment and setting of relay protection.

Based on the obtained calculations, a reasonable selection of all components of the high-voltage electrical network of the production was made.

Keywords: design loads, electrical network, load graphs

ЗМІСТ

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ 8
1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ 8
1.2 Освітлювальні електричні навантаження 9
1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ 10
1.4 Графіки електричних навантажень заводу 15

РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ 20

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ 22
3.1 Схема зовнішнього електропостачання 22
3.2 Схема внутрішнього електропостачання 25

РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ 27
4.1 Баланс реактивної потужності 27
4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв 28

РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА 31

РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ 32
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень 32
6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ 39
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги 41
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб 42

РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ 44
7.1 Системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії 44
7.2 Класифікація інверторів для систем електропостачання з фотовольтаїчними модулями 57
7.3 Розробка й дослідження інверторних пристроїв для сонячних електростанцій 65
7.4 Комп’ютерне моделювання сонячної електростанції 72

ВИСНОВКИ 78

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 79

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ		
Зм.	*Арк.*	*№ докум.*	*Підпис*	*Дата*			
Розроб.		*Крикотненко В.*			Проєктування електротехнічної системи електроспоживання цементного заводу Design of the electrical system for electricity consumption of a cement plant	*Літ.*	*Аркуш* 6 / *Аркушів* 79
Перев.		*Віхрова Л.Г.*					
Н. контр.		*Віхрова Л.Г.*				*ЦНТУ гр. ЕЕ-21*	
Затвер.		*Плєшков П.Г.*					

ВСТУП

Дана праця зосереджена на проектуванні електроенергетичної системи для підприємства з виробництва цементу.

Забезпечення енергетичних потреб промислового комплексу має критичне значення в сучасних умовах функціонування. Електроенергія становить основу для ефективної роботи різноманітного технологічного устаткування та виробничих процесів. З огляду на це, надійне та безаварійне постачання електричної енергії виступає фундаментальною умовою досягнення високих показників продуктивності та максимальної операційної ефективності виробничого об'єкта.

Цементна промисловість характеризується особливо високим енергоспоживанням, що пов'язано зі специфікою технологічних процесів. Виробництво цементу включає декілька енергоємних етапів: подрібнення сировинних матеріалів, випалювання клінкеру у обертових печах при температурах до 1450°C, та фінальне перемелювання готової продукції. Обертальні печі, млини, компресори, вентилятори та транспортуюче обладнання споживають значні обсяги електричної енергії.

Система електропостачання цементного підприємства повинна забезпечувати живлення електродвигунів потужністю від кількох кіловат до декількох мегават. Особливу увагу необхідно приділити забезпеченню безперервності технологічного процесу, оскільки раптові зупинки можуть призвести до застигання матеріалу в печах та дорогого ремонту обладнання.

Сучасні цементні заводи все частіше впроваджують системи рекуперації енергії, використовуючи тепло відхідних газів для генерації електроенергії. Це дозволяє знизити загальне енергоспоживання на 15-30% та покращити економічні показники виробництва. Крім того, важливим аспектом є інтеграція відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій, які можуть покривати частину потреб підприємства у денний час.

РОЗДІЛ 1
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Силові електричні навантаження до 1 кВ

Приклад розрахунку силових електричних навантажень до 1000 В пічного цеху приведений нижче.

$$m = \frac{P_{н.max}}{P_{н.min}} = \frac{50}{3} = 17$$

$$P_{зм} = P_{\Sigma} K_{в} = 368 \cdot 0,7 = 257,6 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} tg\varphi = 257,6 \cdot 0,62 = 159,65 \text{ квар}$$

$$n_{еф} = \frac{2\sum P_{н}}{P_{н.max}} = \frac{2 \cdot 368}{50} \approx 15$$

Згідно [1] значення $K_р$ = 1,16.

Отже, розрахункові навантаження пічного цеху:

$$P_р = P_{зм} K_р = 257,6 \cdot 1,16 = 298,28 \text{ кВт}$$

$$Q_р = Q_{зм} = 159,65 \text{ квар}$$

Результати розрахунків зведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Силові навантаження до 1000 В

№	Назва цеху	$N_{спож}$ шт	P одн.сп. min, кВт	P одн.сп. max, кВт	$P_{сум}$, кВт	m	$K_в$	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав. $P_{зм}$, кВт	Сер. зм. нав. $Q_{зм}$, квар	$n_{еф}$	$K_р$	Розрах. навант. $P_{розр}$, кВт	Розрах. навант. $Q_{розр}$, квар	Розрах. навант. $S_{розр}$, кВА
1	Пічний цех (холодна половина)	26	3	50	368	17	0,70	0,850	0,620	257,60	159,65	15	1,16	298,28	159,65	338,32
2	Пічний цех (гаряча половина)	30	3	50	465	17	0,80	0,950	0,330	372,00	122,27	19	1,00	372	122,27	391,58
3	Матеріальний склад	16	3	50	165	17	0,55	0,850	0,620	90,75	56,24	7	1,41	128,38	61,86	142,51
4	Склад сировини	5	8	20	270	2,5	0,25	0,650	1,170	67,50	78,92	5	2,12	142,79	86,81	167,11
5	Відділення сировинних млинів	50	10	50	2100	5	0,70	0,750	0,880	1470,00	1296,42	50	1,08	1586,5	1296,4	2048,86
6	Склад клінкера	10	2	25	150	13	0,30	0,700	1,020	45,00	45,91	10	1,62	72,95	50,5	88,72
7	Відділення цементних млинів	15	20	100	480	5	0,70	0,750	0,880	336,00	296,32	10	1,20	403,65	325,95	518,82
8	Сушильне відділення	18	20	75	423	3,7	0,60	0,800	0,750	253,80	190,35	11	1,27	322,79	190,35	374,74
9	Цементні силоси	17	5	40	235	8	0,30	0,700	1,020	70,50	71,92	12	1,56	109,71	71,92	131,18
10	Насосна	4	28	28	112	1	0,60	0,700	1,020	67,20	68,56	4	1,53	102,62	75,42	127,35
11	Автогараж	4	1	10	15	10	0,4	0,7	1,02	6	6,12	3	2,1	12,62	6,73	14,3
12	Заводоуправління	8	2	8	50	4	0,75	0,9	0,48	37,5	18,16	8	1,18	44,12	19,98	48,43
13	Їдальня	12	2	6	56	3	0,60	0,900	0,480	33,60	16,27	12	1,26	42,27	16,27	45,29
	Всього	**215**	**1**	**100**	**4889**	**100**	**0,6**	**0,79**	**0,78**	**3107,5**	**2427,11**	**98**	**1,07**	**3324**	**2427**	**4115,7**

1.2 Освітлювальні електричні навантаження

Приклад розрахунку освітлювальних навант. для пічного цеху наведено нижче.

$$P_{вст} = FP_0 \cdot 10^{-3} = 1772 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 28,35 \text{ кВт}$$

$$P_р = K_п K_1 P_{вст} = 0,95 \cdot 1,0 \cdot 28,35 = 26,93 \text{ кВт}$$

$$Q_р = P_р tg\varphi = 26,93 \cdot 0,2 = 5,47 \text{ квар}$$

Результати інших розрахунків приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Освітлювальні навантаження

№	Назва цеху	F, м^2	p_0, Вт/м^2	$P_{вст}$, кВт	$K_п$	K_1	cosφ	tgφ	$P_р$, кВт	$Q_р$, квар	$S_р$, кВА
1	Пічний цех (холодна половина)	1772	16	28,35	0,950	1,00	0,98	0,2	26,93	5,47	27,48
2	Пічний цех (гаряча половина)	1948	16	31,17	0,950	1,00	0,98	0,2	29,61	6,01	30,21
3	Матеріальний склад	1764	12	21,17	0,950	1,00	0,98	0,2	20,11	4,08	20,52
4	Склад сировини	680	12	8,16	0,950	1,00	0,98	0,2	7,75	1,57	7,91
5	Відділення сировинних млинів	2160	14	30,24	0,950	1,00	0,98	0,2	28,73	5,83	29,32
6	Склад клінкера	1816	12	21,79	0,950	1,00	0,98	0,2	20,7	4,2	21,12
7	Відділення цементних млинів	2484	14	34,78	0,950	1,00	0,95	0,33	33,04	10,9	34,78
8	Сушильне відділення	4052	15	60,78	0,950	1,00	0,98	0,2	57,74	11,7	58,92
9	Цементні силоси	2484	16	39,74	0,950	1,00	0,98	0,2	37,75	7,66	38,52
10	Насосна	648	12	7,78	0,600	1,00	0,98	0,2	4,67	0,95	4,77
11	Автогараж	652	12	7,82	0,950	1,00	0,98	0,2	7,43	1,51	7,58
12	Заводоуправління	904	18	16,27	0,950	1,00	0,98	0,2	15,46	3,14	15,78
13	Їдальня	876	6	5,26	0,950	1,00	0,98	0,2	5	1,02	5,1
14	Територія заводу	85860	0,1	8,59	1,000	1,00	0,98	0,2	8,59	1,74	8,76
	Всього			**321,9**					**303,5**	**65,8**	**310,6**

1.3 Силові електричні навантаження вище 1 кВ

Результати розрахунків навантажень вище 1 кВ приведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	$N_{спож}$ шт	P одн.сп.		$P_{сум}$, кВт	m	$K_в$	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		$n_{еф}$	$K_р$	Розрах. навантаж.		
		min, кВт	max, кВт						$P_{зм}$, кВт	$Q_{зм}$, квар			$P_{розр}$, кВт	$Q_{розр}$, квар	$S_{розр}$, кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ТП1, 2															
Пічний цех (холодна половина)															
силове:	26	3	50	368	16,7	0,70	0,85	0,62	257,6	159,65	15	1,16	298,28	159,65	338,32
освітлювальне:									28,35				26,93	5,47	
Всього:									285,95	159,65			325,21	165,12	364,73
Пічний цех (гаряча половина)															
силове:	30	3	50	465	16,7	0,80	0,95	0,33	372	122,27	19	1,00	372	122,27	391,58
освітлювальне:									31,17				29,61	6,01	
Всього:									403,17	122,27			401,61	128,28	421,6
Склад клінкера															
силове:	10	2	25	150	12,5	0,30	0,70	1,02	45	45,91	10	1,62	72,95	50,5	88,72
освітлювальне:									21,79				20,7	4,2	
Всього:									66,79	45,91			93,65	54,7	108,45
Автогараж															
силове:	4	1	10	15	10,0	0,40	0,70	1,02	6	6,12	3	2,10	12,62	6,73	14,3
освітлювальне:									7,82				7,43	1,51	
Всього:									13,82	6,12			20,05	8,24	21,68
Заводоуправління															
силове:	8	2	8	50	4,0	0,75	0,90	0,48	37,5	18,16	8	1,18	44,12	19,98	48,43
освітлювальне:									16,27				15,46	3,14	
Всього:									53,77	18,16			59,58	23,12	63,91
Їдальня															
силове:	12	2	6	56	3,0	0,60	0,90	0,48	33,6	16,27	12	1,26	42,27	16,27	45,29
освітлювальне:									5,26				5	1,02	
Всього:									38,86	16,27			47,27	17,29	50,33
Сушильне відділення															
силове:	18	20	75	423	3,7	0,60	0,80	0,75	253,8	190,35	11	1,27	322,79	190,35	374,74
освітлювальне:									60,78				57,74	11,72	
Всього:									314,58	190,35			380,53	202,07	430,85

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Територія заводу															
освітлювальне:									8,59				8,59	1,74	
Всього:									8,59	0			8,59	1,74	8,76
Всього по ТП1, 2:															
силове:	108	1	75	1527	75,0	0,66	0,87	0,56	1005,5	558,73	41	1,10	1110,78	558,73	1243,39
освітлювальне:									180,03				171,46	34,81	
БК 0,4 кВ										-450				-450	
Всього 0.4 кВ ТП1, 2:									1185,53	108,73			1282,24	143,54	1290,25
Втрати в ТП:													15,67	117,73	
Nтр: 3 шт.															
Sтр, кВА: 630															
Кз = 0,68															
Всього 10 кВ ТП1, 2:													1297,91	261,27	1323,94
ТП3															
Матеріальний склад															
силове:	16	3	50	165	16,7	0,55	0,85	0,62	90,75	56,24	7	1,41	128,38	61,86	142,51
освітлювальне:									21,17				20,11	4,08	
Всього:									111,92	56,24			148,49	65,94	162,47
Відділення цементних млинів															
силове:	15	20	100	480	5,0	0,70	0,75	0,88	336	296,32	10	1,20	403,65	325,95	518,82
освітлювальне:									34,78				33,04	10,87	
Всього:									370,78	296,32			436,69	336,82	551,49
Цементні силоси															
силове:	17	5	40	235	8,0	0,30	0,70	1,02	70,5	71,92	12	1,56	109,71	71,92	131,18
освітлювальне:									39,74				37,75	7,66	
Всього:									110,24	71,92			147,46	79,58	167,56
Насосна															
силове:	4	28	28	112	1,0	0,60	0,70	1,02	67,2	68,56	4	1,53	102,62	75,42	127,35
освітлювальне:									7,78				4,67	0,95	
Всього:									74,98	68,56			107,29	76,37	131,69
Всього по ТП3:															

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
силове:	52	3	100	992	33,3	0,57	0,75	0,87	564,45	493,04	20	1,21	682,32	493,04	841,81
освітлювальне:									103,47				95,57	23,56	
БК 0,4 кВ										-200				-200	
Всього 0.4 кВ ТП3:									667,92	293,04			777,89	316,6	839,85
Втрати в ТП:													10,11	76,71	
Nтр: 2 шт.															
Sтр, кВА: 630															
Кз = 0,67															
Всього 10 кВ ТП3:													788	393,31	880,7
ТП4, 5															
Склад сировини															
силове:	5	8	20	270	2,5	0,25	0,65	1,17	67,5	78,92	5	2,12	142,79	86,81	167,11
освітлювальне:									8,16				7,75	1,57	
Всього:									75,66	78,92			150,54	88,38	174,57
Відділення сировинних млинів															
силове:	50	10	50	2100	5,0	0,70	0,75	0,88	1470	1296,42	50	1,08	1586,54	1296,42	2048,86
освітлювальне:									30,24				28,73	5,83	
Всього:									1500,24	1296,42			1615,27	1302,25	2074,84
Всього по ТП4, 5:															
силове:	55	8	50	2370	6,2	0,65	0,75	0,89	1537,5	1375,34	55	1,09	1678,81	1375,34	2170,24
освітлювальне:									38,4				36,48	7,4	
БК 0,4 кВ										-1250				-1250	
Всього 0.4 кВ ТП4, 5:									1575,9	125,34			1715,29	132,74	1720,42
Втрати в ТП:													20,89	156,99	
Nтр: 4 шт.															
Sтр, кВА: 630															
Кз = 0,68															
Всього 10 кВ ТП4, 5:													1736,18	289,73	1760,19
Всього по об'єкту															
силове:	215	1	100	4889	100	0,64	0,99	0,17	3107,45	527,11	98	1,07	3323,87	527,11	3365,41
освітлювальне:									321,9				303,51	65,77	
Всього:									3429,35	527,11			3627,38	592,88	3675,51
Потужність КП 0,4 кВ:										-1900				-1900	

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Втрати в ТП:													46,67	351,43	
Всього по об'єкту:													3674,05	944,31	3793,46
Високовольтне навантаження															
АД1, 2	2	600	600	1200		0,7	0,9	0,48	840	406,83			840	406,83	933,33
Всього високовольтного навантаження:													840	406,83	933,33
Всього по об'єкту 10 кВ:													4514,05	1351,14	4711,92
КП 10 кВ:														-900	
Всього 10 кВ з КП:													4514,05	451,14	4536,54
tgf = 0,1															

1.4 Графіки електричних навантажень заводу

Результати розрахунків графіків ел. навантажень наведено нижче.

Таблиця 1.4. Дані для розрахунку параметрів графіків

№	Роб. дні		Вих.дні	
	P, %	Q, %	P, %	Q, %
1	50	42	40	70
2	35	34	40	70
3	37	42	40	70
4	37	41	40	70
5	56	55	40	70
6	56	47	40	70
7	89	61	40	70
8	87	74	40	70
9	100	100	20	51
10	100	100	20	51
11	94	71	20	51
12	80	62	20	51
13	92	75	20	51
14	100	73	20	51
15	100	78	20	51
16	95	68	20	51
17	91	77	20	51
18	80	60	40	70
19	52	41	40	70
20	57	57	40	70
21	41	46	40	70
22	46	44	40	70
23	54	47	40	70
24	52	49	40	70

Таблиця 1.5. Результати розрахунків доб. графіків

№	Зим.дні						Літн. дні					
	Роб. дні			Вих.і дні			Роб. дні			Вих.і дні		
	$P_д$, кВт	$Q_д$, квар	$S_д$, кВА	$P_д$, кВт	$Q_д$, квар	$S_д$, кВА	$P_д$, кВт	$Q_д$, квар	$S_д$, кВА	$P_д$, кВт	$Q_д$, квар	$S_д$, кВА
1	2256	284	2274	1805	474	1866	1918	242	1933	1534	403	1586
2	1580	230	1597	1805	474	1866	1343	196	1357	1534	403	1586
3	1670	284	1694	1805	474	1866	1419	242	1439	1534	403	1586
4	1670	278	1693	1805	474	1866	1419	236	1438	1534	403	1586
5	2527	372	2554	1805	474	1866	2148	316	2171	1534	403	1586
6	2527	318	2547	1805	474	1866	2148	270	2165	1534	403	1586
7	4017	413	4038	1805	474	1866	3414	351	3432	1534	403	1586
8	3926	501	3958	1805	474	1866	3337	426	3364	1534	403	1586
9	4513	677	4563	903	345	967	3836	575	3879	767	293	821
10	4513	677	4563	903	345	967	3836	575	3879	767	293	821
11	4242	481	4269	903	345	967	3606	409	3629	767	293	821
12	3610	420	3634	903	345	967	3069	357	3090	767	293	821
13	4152	508	4183	903	345	967	3529	432	3555	767	293	821
14	4513	494	4540	903	345	967	3836	420	3859	767	293	821
15	4513	528	4544	903	345	967	3836	449	3862	767	293	821
16	4287	460	4312	903	345	967	3644	391	3665	767	293	821
17	4107	521	4140	903	345	967	3491	443	3519	767	293	821
18	3610	406	3633	1805	474	1866	3069	345	3088	1534	403	1586
19	2347	278	2363	1805	474	1866	1995	236	2009	1534	403	1586
20	2572	386	2601	1805	474	1866	2187	328	2211	1534	403	1586
21	1850	311	1876	1805	474	1866	1573	265	1595	1534	403	1586
22	2076	298	2097	1805	474	1866	1765	253	1783	1534	403	1586
23	2437	318	2458	1805	474	1866	2071	270	2089	1534	403	1586
24	2347	332	2370	1805	474	1866	1995	282	2015	1534	403	1586

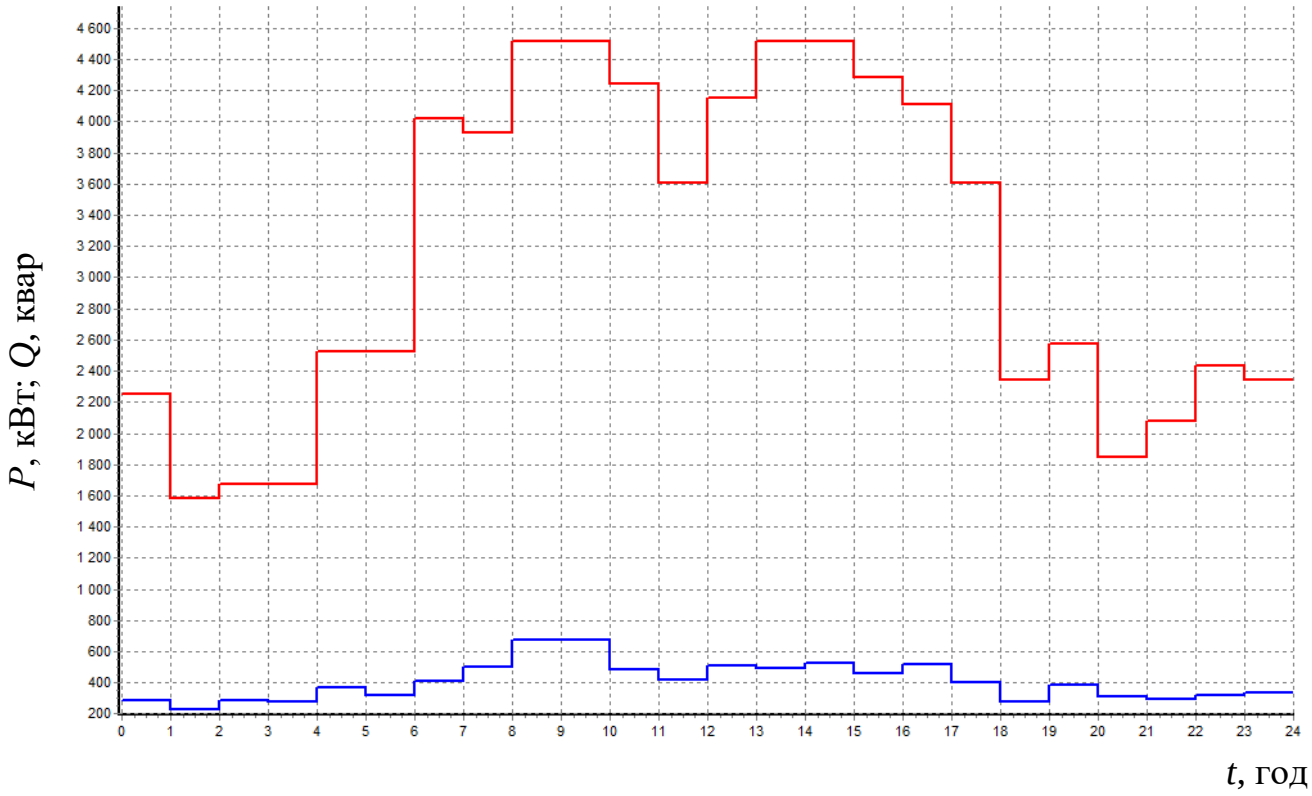


Рис. 1.1. Добові графіки (з. р.)

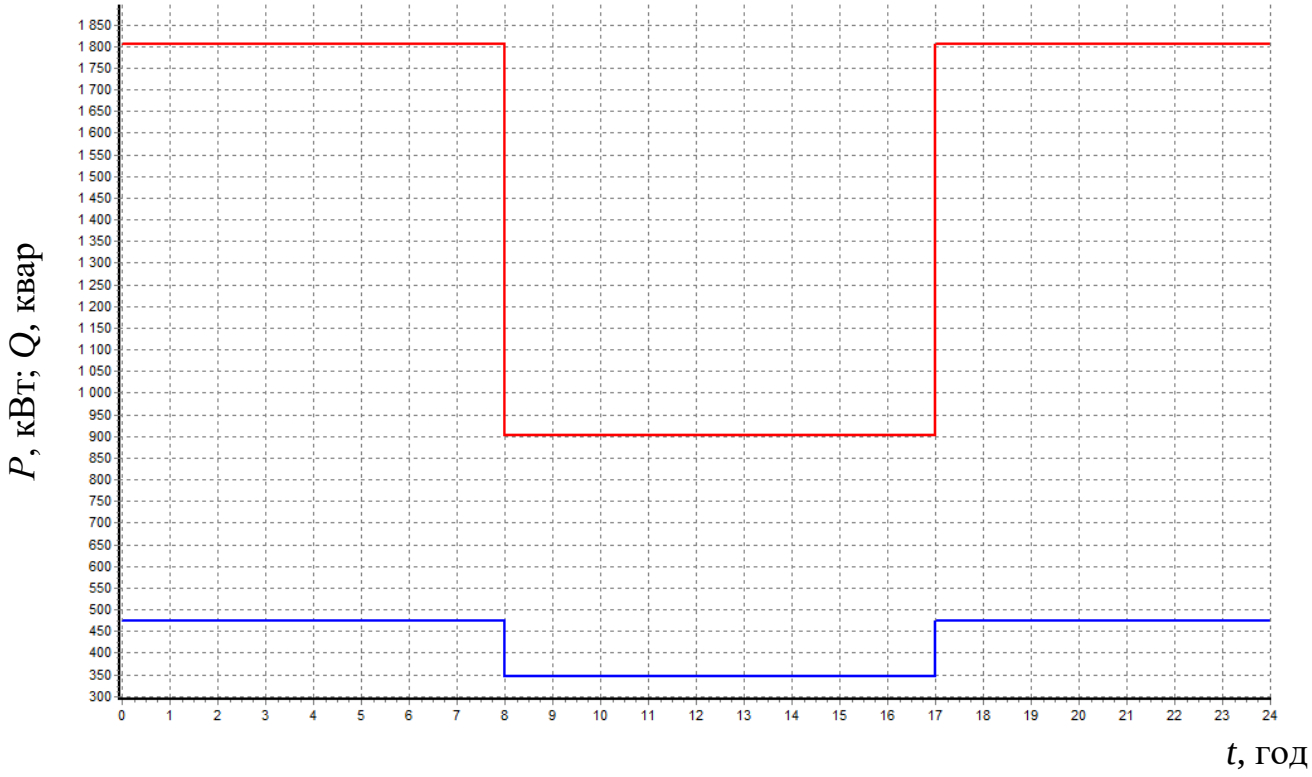


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (з.в.)

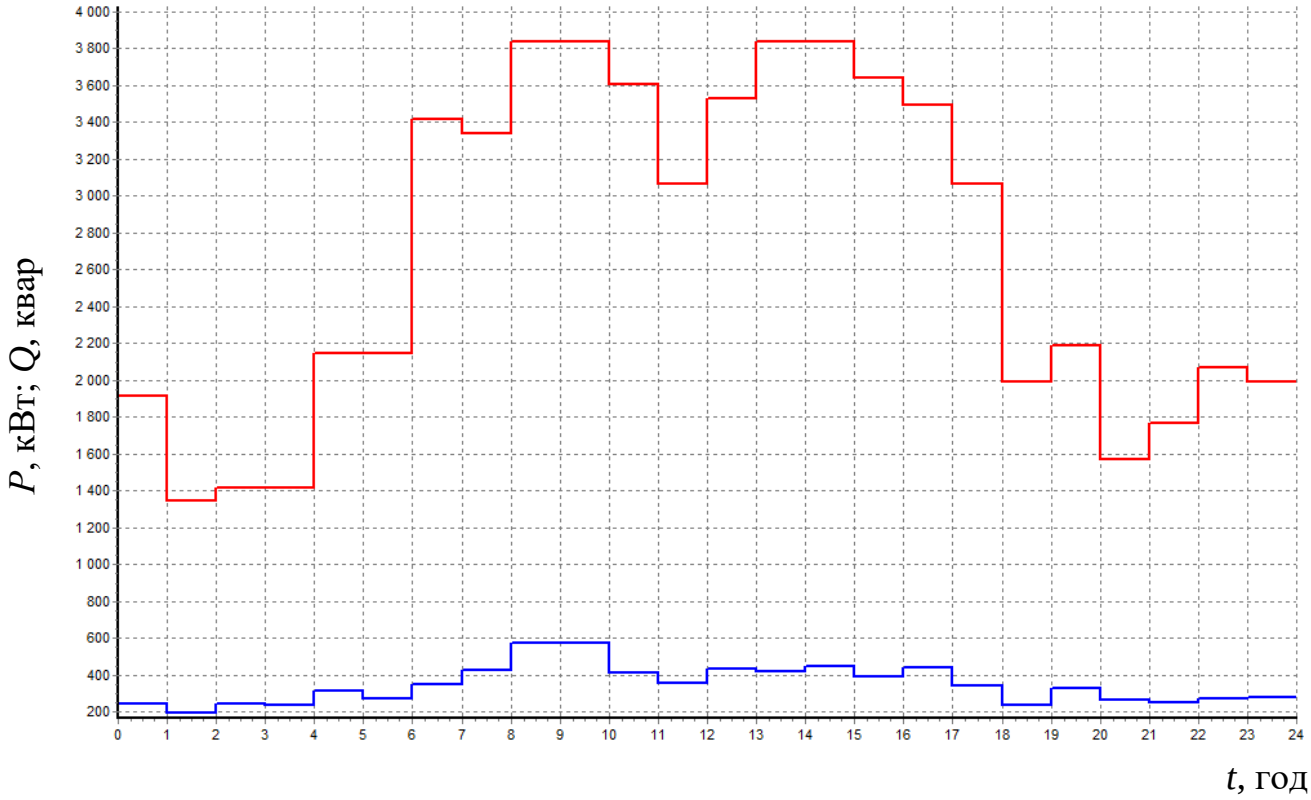


Рис. 1.3. Добові графіки (л.р.)

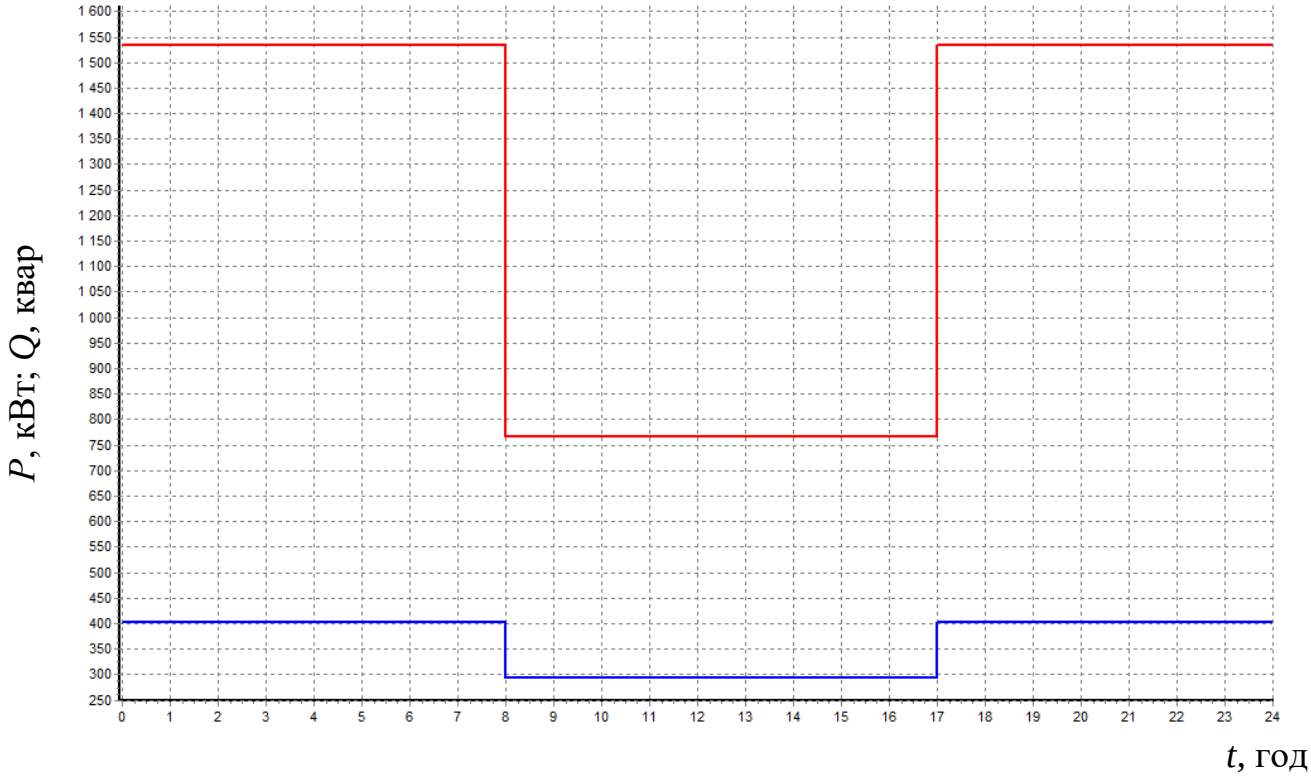


Рис. 1.4 Добові графіки (л.в.)

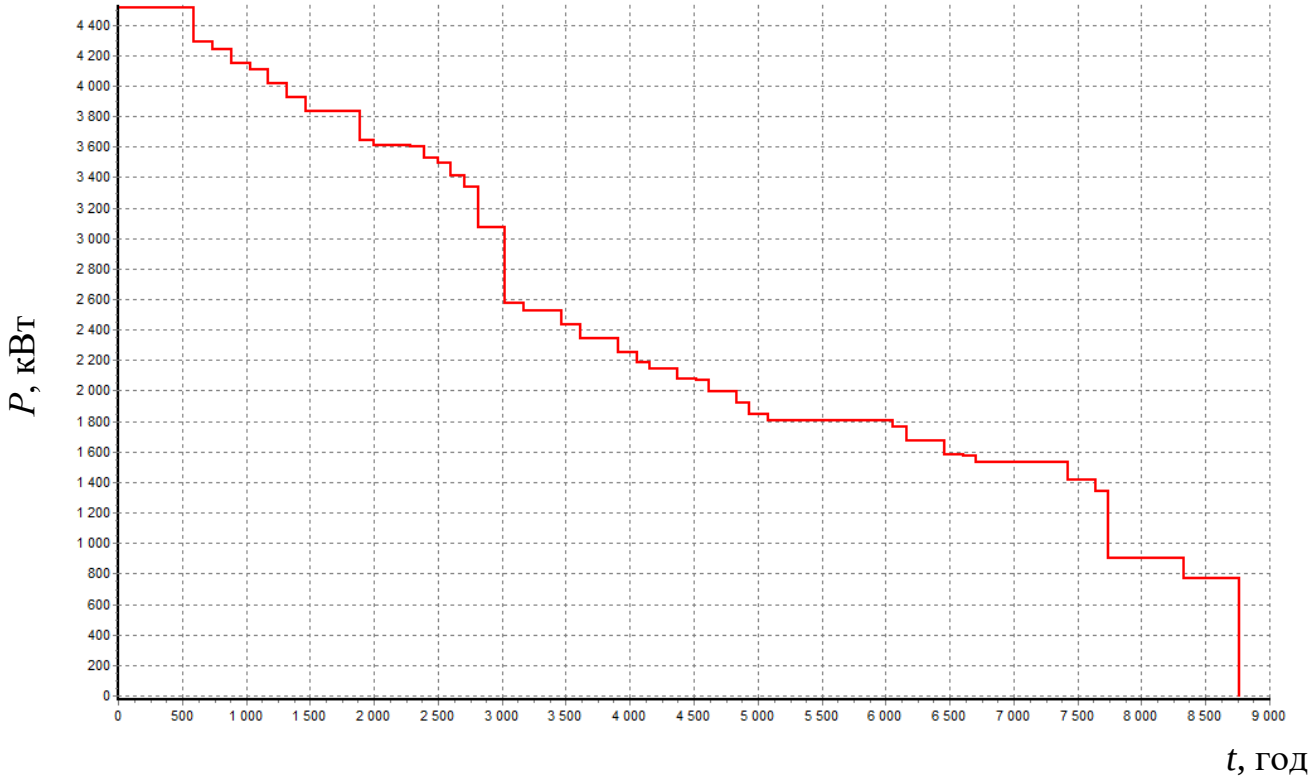


Рис. 1.5. Річний графік за тривалістю (Р)

Таблиця 1.6. Результати розрах. параметрів графіків

№	Назва параметру	Знач.	Од. вим.
1	$S_{розр}$	4563,5	МВА
2	$W_{з.р.}$	11151714	кВт·год
3	$V_{з.р.}$	1436925	квар·год
4	$W_{з.в.}$	2288130	кВт·год
5	$V_{з.в.}$	663975	квар·год
6	$W_{л.р.}$	6770820	кВт·год
7	$V_{л.р.}$	872445	квар·год
8	$W_{л.в.}$	1435824	кВт·год
9	$V_{л.в.}$	416736	квар·год
10	$W_{річн.}$	21646488	кВт·год
11	$V_{річн.}$	3390081	квар·год
12	$T_{м}$	4801	год
13	$\tau_{м}$	3197	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розрахунок картограми пічного цеху:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_{осв} + P_{сил}}{\pi m}} = \sqrt{\frac{298 + 27}{3,14 \cdot 0,2}} = 22,7 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{осв} \cdot 360}{P_{сил} + P_{осв}} = \frac{27 \cdot 360}{298 + 27} = 29,8^{\circ}$$

Розрахунок для інших цехів приведено в таблиці 2.1.

Центр електричних навантажень:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^{m} X_j P_j}{\sum_{j=1}^{m} P_j} = \frac{457898,37}{4782,23} = 95,75 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^{m} Y_j P_j}{\sum_{j=1}^{m} P_j} = \frac{219998,33}{4782,23} = 46 \text{ м}$$

Таблиця 2.1. Картограма ел. навантажень

№	Назва цеху	$P_{сил}$, кВт	$P_{осв}$, кВт	P_1, кВт	m	R, мм	а, град	x, м	y, м	$P_1 \cdot x$, кВт·м	$P_1 \cdot y$, кВт·м
1.	Пічний цех (холодна половина)	298	27	325,21	0,2	22,75	29,81	17,00	132,00	5528,57	42927,72
2.	Пічний цех (гаряча половина)	372	30	401,61	0,2	25,28	26,54	152,00	132,00	61044,72	53012,52
3.	Матеріальний склад	128	20	148,49	0,2	15,37	48,75	69,00	11,00	10245,81	1633,39
4.	Склад сировини	143	8	150,54	0,2	15,48	18,53	158,00	7,00	23785,32	1053,78
5.	Відділення сировинних млинів										
	а) 0,4 кВ	1587	29	1615,27	0,2	50,70	6,40	115,00	12,00	185756,05	19383,24
	б) 10,5 кВ (АД)	840	0	840,00	0,2	36,56	0,00	115,00	12,00	96600,00	10080,00
6.	Склад клінкера	73	21	93,65	0,2	12,21	79,57	12,00	104,00	1123,80	9739,60
7.	Відділення цементних млинів	404	33	436,69	0,2	26,36	27,24	16,00	49,00	6987,04	21397,81
8.	Сушильне відділення	323	58	380,53	0,2	24,61	54,62	88,00	112,00	33486,64	42619,36
9.	Цементні силоси	110	38	147,46	0,2	15,32	92,16	24,00	16,00	3539,04	2359,36
10.	Насосна	103	5	107,29	0,2	13,07	15,67	85,00	49,00	9119,65	5257,21
11.	Автогараж	13	7	20,05	0,2	5,65	133,41	162,00	49,00	3248,10	982,45
12.	Заводоуправління	44	15	59,58	0,2	9,74	93,41	162,00	104,00	9651,96	6196,32
13.	Їдальня	42	5	47,27	0,2	8,67	38,08	137,00	47,00	6475,99	2221,69
14.	Територія заводу	0	9	8,59	0,2	3,70	360,00	152,00	132,00	1305,68	1133,88
	Всього по заводу	**4479**	**304**	**4782,23**						**457898,37**	**219998,33**

РОЗДІЛ 3
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАВОДУ

3.1 Схема зовнішнього електропостачання

Завод може живитись від підстанції 35/10 кВ, на відстані 5,7 км. Розглянемо такі 2 варіанти:

1. КЛ 10 кВ (рис. 3.1 а).
2. ПЛ 35 кВ (рис. 3.1 б).

Варіант 1. КЛ 10 кВ.

Розрах. струм КЛ:

$$I_{\text{р}} = \frac{S_{\text{розр}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{4564}{\sqrt{3}\cdot 10} = 263{,}50$$

Обираємо 2 шт. КЛ АСБ-10(3х120).

Перевірка КЛ:

$$I_{\text{н.р.}} = 131{,}75 \text{ А} \le K_{\text{п}} I_{\partial} = 0{,}92 \cdot 240 = 220{,}8 \text{ А}$$

$$I_{\text{ав.р.}} = 2I_{\text{н.р}} = 2 \cdot 131{,}75 = 263{,}5 \text{ А} \le K_{\text{а.п.}} K_{\text{п}}' I_{\text{д}} = 1{,}25 \cdot 1 \cdot 240 = 300 \text{ А}$$

КЛ задовольняє умовам перевірки.

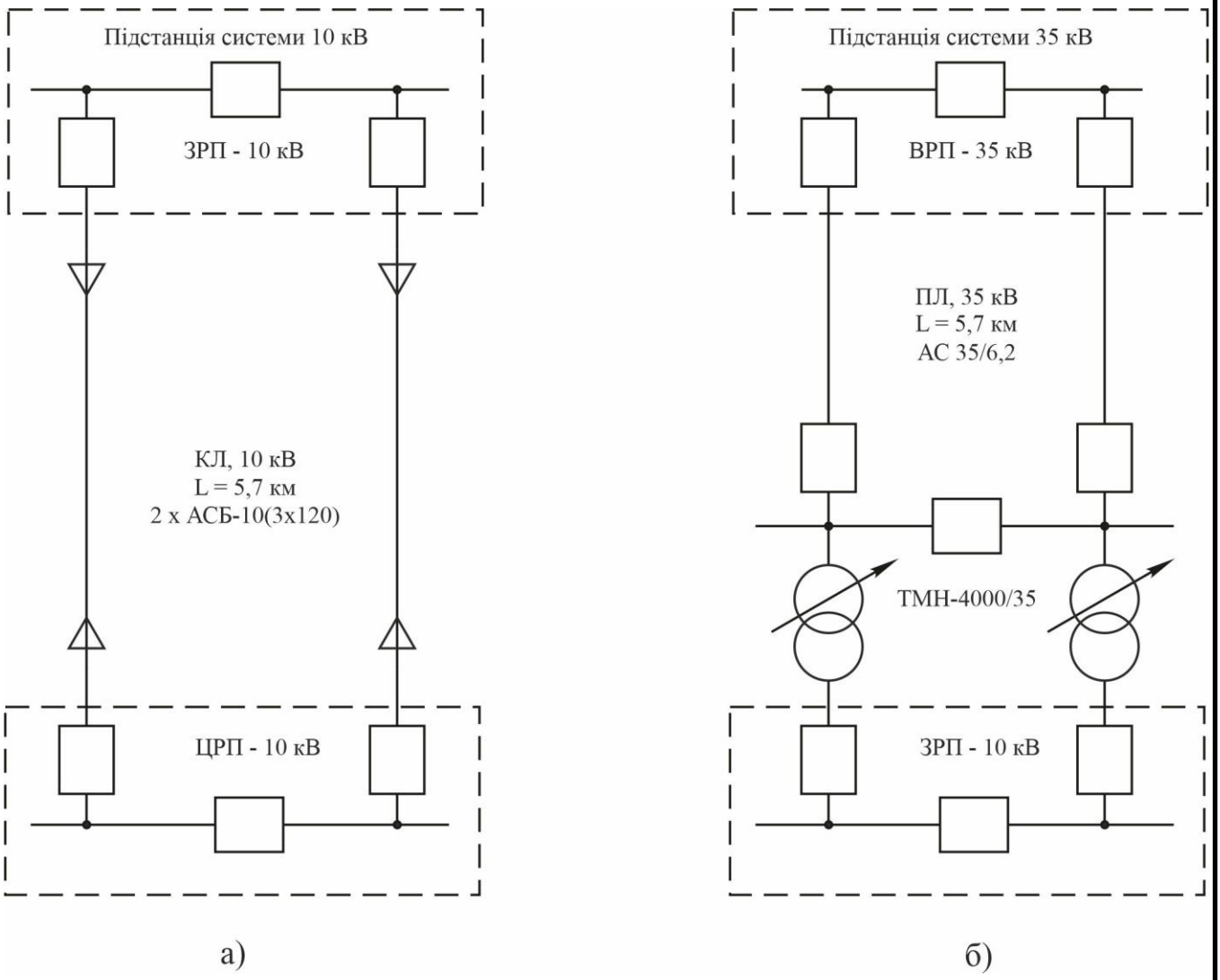


Рис. 3.1. Схеми зовн. електропостач.

$$K_{зав} = \frac{I_р}{I_{доп}} = \frac{131,8}{240} = 0,55$$

$$\Delta P_л = \Delta P_{1км} l_{сум} K_{зав}^2 = 18 \cdot 11,4 \cdot 0,3025 = 62,07 \quad кВт$$

$$\Delta W_{кл} = \Delta P_{кл} \tau = 62,07 \cdot 3196,85 = 198428,48 \quad кВт·год.$$

$$C_{втр.кл} = \Delta W_{сум} C_0 = 198428,48 \cdot 8,87 \cdot 0,001 = 1760,06 \quad тис.грн$$

Таблиця 3.1. Розрахунок капвкладень

№	Назва	Од.	К-сть	Вартість	Всього
1	КЛ 10 кВ	км	11,4	50	570
2	Траншея	км.	5,7	14,3	81,51
3	Шафи КРП	шт.	2	10,7	21,4
Всього					932,71

Таблиця 3.2. Поточні витрати

№	Назва	K_j	P_{aj}	C_{aj}.	P_{ej}	C_{ej}.	C_j
1	КЛ 10 кВ	570	5	28,5	5	28,5	57
2	Траншея	81,51	5	4,0755	5	4,0755	8,151
3	Шафи КРП	21,4	15	3,21	5	1,07	4,28
Всього							69,43

Розрахунок збитку від недовідпуску електроенергії наведено нижче.

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 0{,}004 + 0{,}456 = 0{,}46 \quad 1/\text{рік}$$

$$T_{\text{відн}} = \frac{\sum \lambda_i T_{\text{відн}.i}}{\lambda} = \frac{(0{,}004 \cdot 0{,}00045 + 0{,}456 \cdot 0{,}000399)}{0{,}46} = 0{,}00039944 \quad \text{рік}$$

$$K_{\text{пр}} = 1{,}2 K_{\text{прmax}} = 1{,}2 \cdot 0{,}002 = 0{,}0024$$

$$K_{\text{а.п}} = \lambda T_{\text{відн}} = 0{,}46 \cdot 0{,}00039944347826087 = 0{,}000183744$$

$$K_{\text{а.пр}} = 0{,}5 \lambda K_{\text{пр}}^2 = 0{,}5 \cdot 0{,}46 \cdot 0{,}00000576 = 0{,}0000013248$$

$$K_{\text{а.пр}}^{(2)} = K_{\text{а.п}}^2 + 2K_{\text{а.пр}} = 0{,}00000003376186 + 2 \cdot 0{,}0000013248 = 0{,}0000026834$$

$$T_{ав} = K_{а.пр}^{(2)} \cdot 8760 = 0{,}0000026834 \cdot 8760 = 0{,}02351$$

$$З\delta = З\delta_0 P_{ср} T_{ав} = 26{,}61 \cdot 2{,}47 \cdot 0{,}02351 = 1{,}55$$

Зведені витрати:

$$З = E_н K + C + C_{втр} + З\delta = 0{,}12 \cdot 672{,}91 + 69{,}431 + 1760{,}06 + 1{,}55 = 1911{,}79$$

Таблиця 3.3. Результати порівняння схем зовн. електропостачання

Назва показника	Варіант	
	1	2
Капітальні вкладення	672,91	2052,05
Поточні витрати	69,431	374,7
Вартість втрат електричної енергії	1760,06	3295,01
Збиток	1,55	2,29
Зведені витрати	*1911,79*	*3918,25*

Як видно, для І вар-ту схеми зведені витрати менші, тому обираємо саме його.

3.2 Схема внутрішнього електропостачання

Для внутрішньої схеми електропостачання обираємо радіальну схему, так як вона має ряд переваг:

- більша надійність: у радіальній схемі кожна лінія живить групу споживачів. Якщо трапляється пошкодження на одній лінії, воно не впливає на інші, тоді як у магістральній схемі аварія може знеструмити всіх споживачів «за місцем пошкодження».

- простота експлуатації та обслуговування: радіальна схема має просту конфігурацію, що полегшує пошук місця пошкодження та проведення ремонтних робіт. Персонал швидше орієнтується в схемі та може ефективніше усувати неполадки.

- гнучкість нарощування потужності: при зростанні навантаження можна легко додати нові радіальні лінії без серйозної реконструкції існуючої мережі. У магістральній схемі може знадобитися заміна основної магістралі на більш потужну.

- менші втрати при аваріях: оскільки кожна лінія незалежна, відключення однієї не призводить до каскадних відключень, як це може статися в магістральній мережі.

- кращий контроль навантаження: радіальна схема дозволяє більш точно контролювати та розподіляти навантаження між окремими лініями, що важливо для оптимізації режимів роботи мережі.

Однак варто зазначити, що радіальна схема потребує більшої кількості обладнання та може бути дорожчою у спорудженні порівняно з магістральною.

РОЗДІЛ 4
РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Баланс реактивної потужності

Розрахунки балансу РП згідно [1] наведено нижче.

$$P_p = P_н + \Delta P_т + P_в = 3942 + 45,48 + 840 = 4827,48 \text{ кВ:}$$

$$Q_p = Q_н + \Delta Q_т + Q_в = 2550 + 345,09 + 407 = 3302,09 \text{ кВАр}$$

$$Q_в = P_p \cdot tg\varphi_c = 4827,48 \cdot 0,15 = 724,12 \text{ кВАр}$$

$$Q_{КП} = Q_p - Q_в = 3302,09 - 724,12 = 2577,97 \text{ кВАр}$$

Мін. к-сть трансформаторів:

$$N_0 = \frac{P_н}{\beta \cdot S_{ном}} = \frac{3942}{0,7 \cdot 630} = 8,94 \approx 9 \text{ шт.}$$

Варіант 1. N = 9 шт.

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{ном})^2 - P_н^2} = \sqrt{(9 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 3942^2} = 462,17 \text{ кВАр}$$

$$Q_{КН} = Q_н - Q_1 = 2550 - 462,17 = 2087,83 \text{ кВАр}$$

$$Q_{КВ} = Q_р - Q_{КН} - Q_е = 3302,09 - 2087,83 - 724,12 = 490,14 \text{ кВАр}$$

Таблиця 4.1. Розрахунки балансу реакт. потужн. підприємства

№ вар.	К-сть трансформ.	Потужн. Q_1, квар	Потужність $Q_{КН}$, квар	Потужність $Q_{КВ}$, квар
1	9	462,17	2087,83	490,14
2	10	1977,05	572,95	2005,02
3	11	2827,16	0	2577,97

4.2 Вибір кількості, потужності та місця встановлення компенсуючих пристроїв

Розрахунки з вибору КП наведені нижче.

Таблиця 4.2. Результати вибору КП ($N_т$ = 9 шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{розр}$, кВт	$Q_{розр}$, квар	$Q_{проп}$, квар	$Q_{комп}$, квар	К-сть БСК	$Q_{БКсум}$, квар	$Q_{кп}$ - $Q_{бк}$, *квар*	$K_{зав}$	$S_{розр}$, кВА
ТП1,2	3	1297,77	710,56	257,14	453,42	3·150;	450	3,42	0,7	1323,67
ТП3	2	787,04	588,14	398,11	190,03	2·100;	200	-9,97	0,7	877,545
ТП4,5	4	1736,09	1539,27	312,55	1226,72	4·112,5; 4·200;	1250	-23,28	0,7	1760,02

БК 0,4 кВ: 1900 квар.; БК 10 кВ: 900 квар.

Таблиця 4.3. Результати вибору КП ($N_т$ = 10 шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{розр}$, кВт	$Q_{розр}$, квар	$Q_{проп}$, квар	$Q_{комп}$, квар	К-сть БСК	$Q_{БКсум}$, квар	$Q_{кп}$ - $Q_{бк}$, *квар*	$K_{зав}$	$S_{розр}$, кВА
ТП1,2	4	1297,77	710,56	1194,78	0		0	0	0,59	1479,56
ТП3	2	787,04	588,14	398,11	190,03	2·100;	200	-9,97	0,7	877,545
ТП4,5	5	1736,09	1539,27	1359,42	179,85	4·50;	200	-20,15	0,7	2192,64

БК 0,4 кВ: 850 квар.; БК. 10 кВ: 1800 квар.

Таблиця 4.4. Результати вибору КП ($N_т$ = 11 шт.)

№ ТП	К-сть тр.	$P_{розр}$, кВт	$Q_{розр}$, квар	$Q_{проп}$, квар	$Q_{комп}$, квар	К-сть та потужн. батарей конд., шт.·кВАр	$Q_{БКсум}$, квар	$Q_{кп}$-$Q_{бк}$, *квар*	$K_{зав}$	$S_{розр}$, кВА
1,2	5	2420,54	2222,84	2528,04	0		0	0	0,66	3286,34
3,4,5, 6	9	5449,87	4077,1	3160,52	916,58	8·100; 1·112,5;	912,5	4,08	0,7	6302,045
7	2	1244,49	790,6	641,28	149,32	2·67;	134	15,32	0,7	1407,082

БК 0,4 кВ: 400 квар.; БК. 10 кВ: 2250 квар.

Втрати потужності:

$$\Delta P_{БКн} = P_{пит}^{БКн} \cdot Q_{БКн} = 0{,}0045 \cdot 1900 = 8{,}55 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{БКв} = P_{пит}^{БКв} \cdot Q_{БКв} = 0{,}003 \cdot 900 = 2{,}7 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_т = \frac{P_н^2 + Q_1^2}{U_{ном}^2} R_{тр} \cdot 10^{-3} = \frac{3942^2 + 462{,}17^2}{10^2} \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}001 = 28{,}36 \text{ кВт}$$

Вартість КП:

$$K_{БКн} = \sum_{i=1}^{n} N_{БКн\,i} K_{БКн\,i} = 2 \cdot 26{,}46 + 4 \cdot 28{,}08 + 3 \cdot 33{,}93 + 4 \cdot 38{,}34 = 420{,}39 \text{ тис.грн.}$$

$$K_{БКв} = \sum_{i=1}^{n} N_{БКв\,i} K_{БКв\,i} = 2 \cdot 116{,}0064 = 232{,}01 \text{ тис.грн}$$

Вартість ТП:

$$K_{ТП} = N_{ТП2} K_{ТП2} + N_{ТП1} K_{ТП1} = 4 \cdot 6380 + 1 \cdot 3375 = 28895 \text{ тис.грн.}$$

Приведені витрати:

$$З = E_H\left(K_{БКн} + K_{БКв} + K_{ТП}\right) + C_0\tau\left(\Delta P_{БКн} + \Delta P_{БКв} + \Delta P_{ТП}\right) =$$
$$= 0{,}12 \cdot (420{,}39 + 232{,}01 + 28895) + 8{,}87 \cdot 3197 \cdot (8{,}55 + 2{,}7 + 28{,}36) \cdot 10^{-3} =$$
$$= 4668{,}92 \text{ тис.грн.}$$

В табл. 4.5 приведені розрахунки для інших варіантів

Таблиця 4.5. Розрахунок привед. витрат на КП

№	$Q_{БКн}$, кВАр	$DP_{БКн}$ кВт	$Q_{БКв}$, квар	$DP_{БКв}$ кВт	$N_т$, шт.	$R_е$, Ом	$S_{проп}$, кВА	$DP_т$, кВт	$K_{БКн}$, тис. грн.	$K_{БКв}$, тис. грн.	$K_{тп}$, тис. грн.	З, тис. грн.
1	1900	8,55	900	2,7	9	0,18	3969	28,36	420,39	232,01	28895	4669
2	850	3,83	1800	5,4	10	0,16	4410	31,12	249,03	353,43	32270	5089
3	400	1,8	2250	6,75	11	0,15	4851	35,3	147,24	469,44	35275	5550

Таким чином, приймаємо 1-й варіант.

РОЗДІЛ 5
ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Вибір силового трансформатора ТП-1:

$$K_{зав} = \frac{S_{розр}}{n_{тр} S_{ном\ тр}} = \frac{882,45}{2 \cdot 630} = 0,7$$

$$S_{ном\ тр} = 2 \cdot 630 = 1260 \geq \frac{S_{розр}}{K_1} = \frac{882,45}{1,08} = 817$$

$$S_{ном\ тр} = 630 \geq \frac{S_{розр}}{K_2} = \frac{882,45}{1,4} \approx 630$$

Вибір інших трансформаторів наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Результати вибору цехових трансформаторів

№	К-сть тр.	$S_{розр}$, кВА	$K_{зав}$	$S_{ном} > S_{розр}/K_1$	$S_{ном} > S_{розр}/K_2$
ТП-1	2	882,45	0,70	817	630
ТП-2	1	441,22	0,70	409	315
ТП-3	2	877,54	0,70	813	627
ТП-4	2	880,01	0,70	815	629
ТП-5	2	880,01	0,70	815	629

РОЗДІЛ 6
РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

Розрахункова схема та схема заміщення мережі наведені на рис. 6.1, 6.2.

Опори елементів мережі:

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

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

$$R_{кл} = \frac{r_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0{,}258 \cdot 5{,}7}{1} = 1{,}4706 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = \frac{x_0 \cdot l}{n_{кл}} = \frac{0{,}081 \cdot 5{,}7}{1} = 0{,}46 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X_c + X_{кл} = 1{,}103 + 0{,}46 = 1{,}563 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R_c + R_{кл} = 0{,}044 + 1{,}4706 = 1{,}515 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{1{,}515^2 + 1{,}563^2} = 2{,}177 \text{ Ом}$$

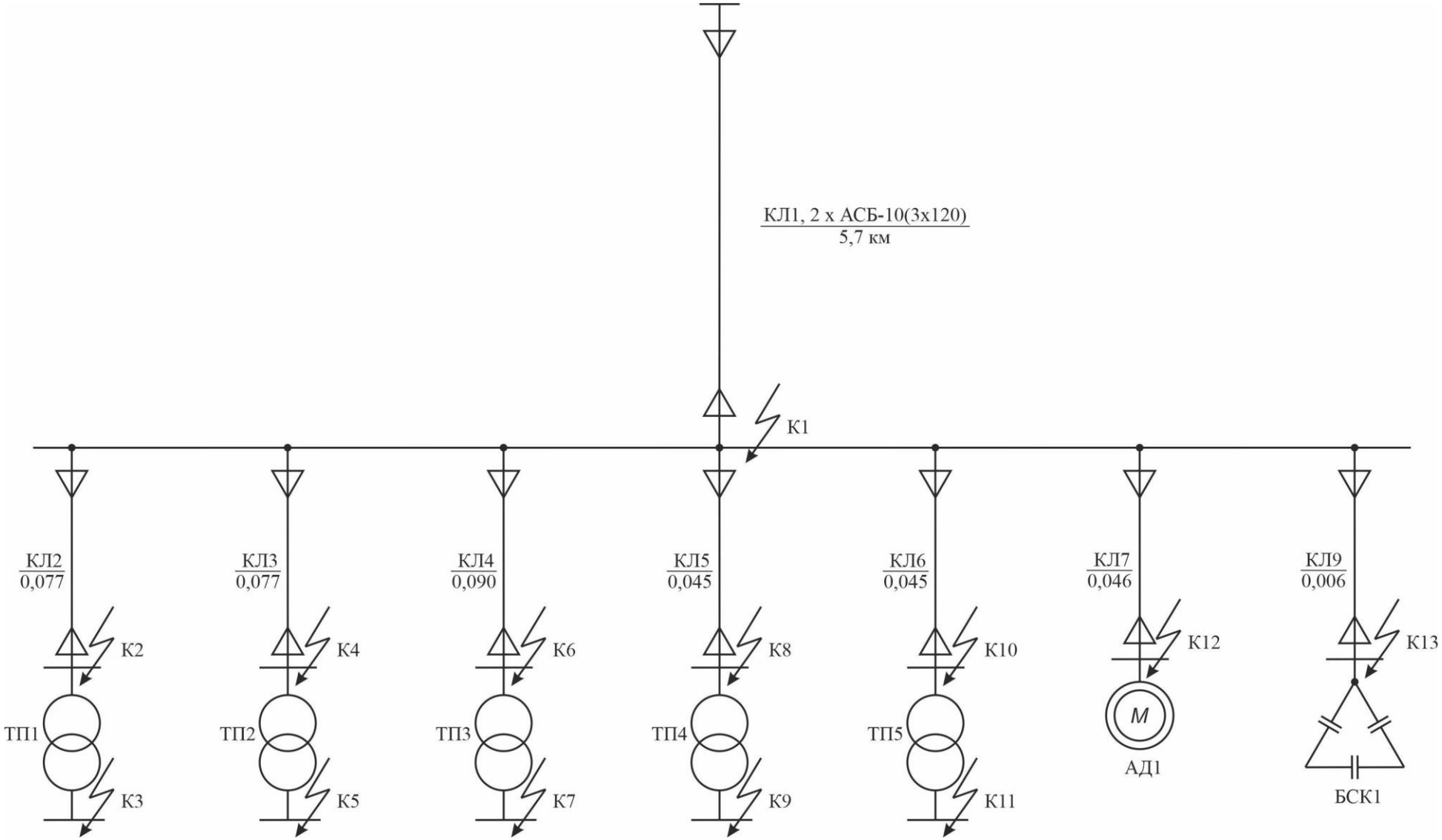


Рис. 6.1. Розрахункова схема

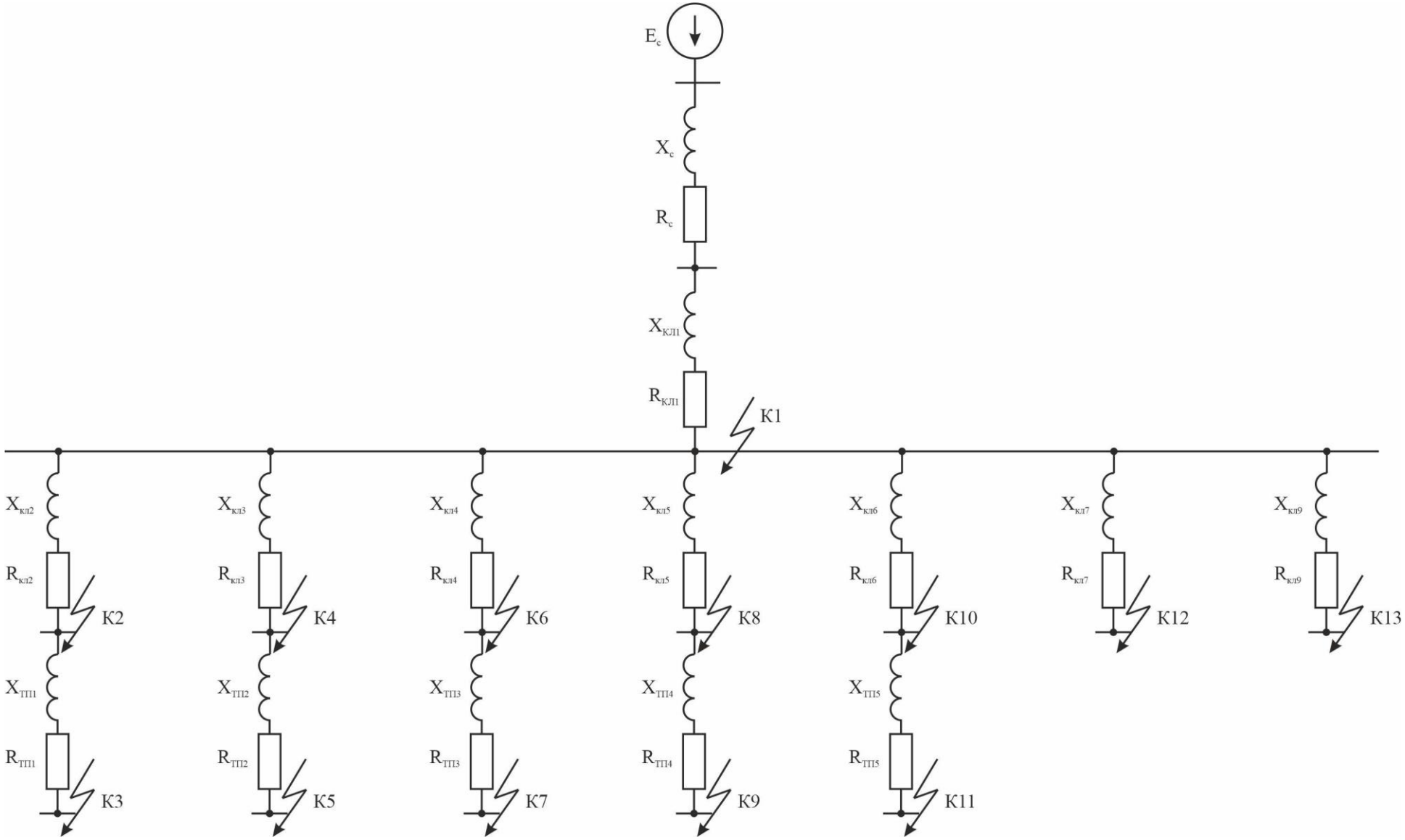


Рис. 6.2. Схема заміщення

Параметри струму к.з. в т. К1:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{ср.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,177} = 2,78 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega R_{K1}} = \frac{1,563}{314 \cdot 1,515} = 0,0033 \text{ с}$$

$$k_{уд1} = 1 + e^{\frac{-0.01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0033}} = 1,048$$

$$i_{уд1(c)} = \sqrt{2}k_{уд}I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,048 \cdot 2,78 = 4,12 \text{ кА}$$

Струм підживлення від АД 10 кВ:

$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\cos\varphi_{ном} \cdot \eta} = \frac{0,6}{0,9 \cdot 0,92} = 0,725 \text{ МВА}$$

$$X_{АД} = \frac{1}{I_{пуск}} \frac{U^2_{ср.ном}}{S_{ном}} = \frac{10,5^2}{5,2 \cdot 0,725} = 29,24 \text{ Ом}$$

$$I''_{K1(АД)} = n_{АД} \frac{E_* \cdot U_{ср.ном}}{\sqrt{3}X_{АД}} = 2 \cdot \frac{0,9 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 29,24} = 0,37 \text{ кА}$$

$$i_{уд1(АД)} = \sqrt{2}k_{уд(АД)}I''_{K1(АД)} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 0,37 = 0,89 \text{ кА}$$

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(АД)} = 2,78 + 0,37 = 3,15 \text{ кА}$$

$$i_{уд1} = i_{уд1(с)} + i_{уд1(АД)} = 4{,}12 + 0{,}89 = 5{,}01 \text{ кА}$$

Параметри вибору КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{ср.ном}} = \frac{882{,}4}{2 \cdot 1{,}73 \cdot 10{,}5} = 24{,}26 \text{ А}$$

$$B_к = I''^2_{К1}\left(t_{р.з.\min} + T_a\right) = 3{,}15^2(1{,}365 + 0{,}0033) = 13{,}58 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{\min} = \frac{1}{C}\sqrt{B_к} = \frac{1}{94}\sqrt{13{,}58} \cdot 10^3 = 39{,}2 \text{ мм}^2$$

Обираємо кабель ААШв-10(3 х 50).

Опір КЛ1:

$$R_{кл} = r_0 \cdot l_{кл} = 0{,}62 \cdot 0{,}077 = 0{,}048 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = x_0 \cdot l_{кл} = 0{,}09 \cdot 0{,}077 = 0{,}007 \text{ Ом}$$

Опори інших ліній наведено в табл. 6.1.

Параметри струму к.з. в т. К2:

$$X_{К2} = X_{К1} + X_{кл} = 1{,}563 + 0{,}007 = 1{,}57 \text{ Ом}$$

$$R_{К2} = R_{К1} + R_{кл} = 1{,}515 + 0{,}048 = 1{,}563 \text{ Ом}$$

$$Z_{К2} = \sqrt{R^2_{К2} + X^2_{К2}} = \sqrt{1{,}563^2 + 1{,}57^2} = 2{,}215 \text{ Ом}$$

Таблиця 6.1. Розрахунок опорів КЛ

№	Довжина l, км	Пит. опір r_0, Ом/км	Пит. опір x_0, Ом/км	Опір R, Ом	Опір X, Ом
1	5,700	0,258	0,081	1,471	0,462
2	0,077	0,620	0,090	0,048	0,007
3	0,077	0,620	0,090	0,048	0,007
4	0,090	0,620	0,090	0,056	0,008
5	0,045	0,620	0,090	0,028	0,004
6	0,045	0,620	0,090	0,028	0,004
7,8	0,046	0,620	0,090	0,029	0,004
9, 10	0,006	0,620	0,090	0,004	0,001

$$I''_{K2} = \frac{U_{ср.ном.}}{\sqrt{3}Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 2,215} = 2,74 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega R_{K2}} = \frac{1,57}{314 \cdot 1,563} = 0,0032 \text{ с}$$

$$k_{уд2} = 1 + e^{\frac{-0.01}{T_{a2}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0032}} = 1,044$$

$$i_{уд2} = \sqrt{2} k_{уд} I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,044 \cdot 2,74 = 4,05 \text{ кА}$$

Опір трансформатора ТМ-630/10:

$$R_{тр} = \frac{\Delta P_к U^2_{ср.ном}}{S^2_{ном}} = \frac{6,5 \cdot 10,5^2}{630^2} \cdot 10^3 = 1,806 \text{ Ом}$$

$$X_{тр} = \frac{U_{к,\%} U^2_{ср.ном}}{S_{ном}} = \frac{5{,}5 \cdot 10{,}5^2}{630} \cdot 10 = 9{,}625 \text{ Ом}$$

Параметри струму к.з. в т. К3:

$$X_{К3} = \left(X_{К2} + X_{тр}\right)\left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}}\right)^2 = (1{,}57 + 9{,}625)\left(\frac{0{,}4}{10{,}5}\right)^2 = 0{,}0162 \text{ Ом}$$

$$R_{К3} = \left(R_{К2} + R_{тр}\right)\left(\frac{U_{нн}}{U_{вн}}\right)^2 = (1{,}563 + 1{,}806)\left(\frac{0{,}4}{10{,}5}\right)^2 = 0{,}0049 \text{ Ом}$$

$$Z_{К3} = \sqrt{R^2_{К3} + X^2_{К3}} = \sqrt{0{,}0049^2 + 0{,}0162^2} = 0{,}0169 \text{ Ом}$$

$$I''_{К3} = \frac{U_{ср.ном.}}{\sqrt{3} Z_{К3}} = \frac{0{,}4}{\sqrt{3} \cdot 0{,}0169} = 13{,}67 \text{ кА}$$

$$T_{а3} = \frac{X_{К3}}{\omega R_{К3}} = \frac{0{,}0162}{314 \cdot 0{,}0049} = 0{,}0105 \text{ с}$$

$$k_{уд3} = 1 + e^{\frac{-0.01}{T_{а3}}} = 1 + e^{\frac{-0{,}01}{0{,}0105}} = 1{,}386$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} k_{уд} I''_{К3} = \sqrt{2} \cdot 1{,}386 \cdot 13{,}67 = 26{,}79 \text{ кА}$$

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

Таблиця 6.2. Розрахунок струмів к.з.

№	Опір R, Ом	Опір X, Ом	Струм $I_к^{"}$, кА	Постійна часу $T_а$, с	Ударний коеф. $k_{уд}$	Ударний струм $i_{уд}$, кА
1	1,5150	1,5630	3,15	0,0033	1,048	5,01
2	1,5630	1,5700	2,74	0,0032	1,044	4,05
3	0,0049	0,0162	13,67	0,0105	1,386	26,79
4	1,5630	1,5700	2,74	0,0032	1,044	4,05
5	0,0049	0,0162	13,67	0,0105	1,386	26,79
6	1,5710	1,5710	2,73	0,0032	1,044	4,03
7	0,0049	0,0162	13,67	0,0105	1,386	26,79
8	1,5430	1,5670	2,76	0,0032	1,044	4,07
9	0,0049	0,0162	13,67	0,0105	1,386	26,79
10	1,5430	1,5670	2,76	0,0032	1,044	4,07
11	0,0049	0,0162	13,67	0,0105	1,386	26,79
12	1,5440	1,5670	2,76	0,0032	1,044	4,07
13	1,5190	1,5640	2,78	0,0033	1,048	4,12

6.2 Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ

Параметри вибору КЛ до ТП1:

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{ср.ном}} = \frac{882.4}{2 \cdot 1,72 \cdot 10,5} = 24,26 \text{ А}$$

Обираємо 2 х ААШв-10(3х50).

$$I_p = 24,26 \text{ А} \le K_n \cdot I_{доп} = 0,9 \cdot 140 = 126 \text{ А}$$

$$I_{ав} = 48,52 \text{ А} \le K_{ап} \cdot K_n^{'} \cdot I_{доп} = 1,35 \cdot 1 \cdot 140 = 189 \text{ А}$$

$$B_к = I_{К1}^{"2}\left(t_{р.з.min} + T_а\right) = 3,15^2(1,365 + 0,0033) = 39,2 \text{ кА}^2\text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C}\sqrt{B_к} = \frac{1}{94}\sqrt{13,58 \cdot 10^3} = 39,2 \text{ мм}^2$$

В табл. 6.3 наведено результати вибору КЛ.

Таблиця .6.3. Вибір КЛ

№	$n_{КЛ}$, шт	$S_{розр}$, МВА	$I_{р}$, А	$I_{р.ав.}$, А	$B_{к}$, кА^{2}с	F_{min}, мм^2	Марка КЛ	$I_{доп}$, А	$K_{п}$	$K_{п}I_{доп}$, А	$K_{ап}$	$K'_{п}$	$K_{ап}K'_{п}I_{доп}$, А
1	2	4537	124,74	249,48	13,58	39,2	2 х АСБ-10(3 х 120)	240	0,9	216	1,35	1	324
2	2	882,4	24,26	48,52	13,58	39,2	2 х ААШв-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
3	1	441,2	24,26	-	13,58	39,2	1 х ААШв-10(3х50)	140	1	140	-	-	-
4	2	877,5	24,12	48,24	13,58	39,2	2 х ААШв-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
5	2	880	24,19	48,38	13,58	39,2	2 х ААШв-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
6	2	880	24,19	48,38	13,58	39,2	2 х ААШв-10(3х50)	140	0,9	126	1,35	1	189
7,8	1	600	32,99	-	13,58	39,2	1 х ААШв-10(3х50)	140	1	140	-	-	-
9, 10	1	450	24,74	-	13,58	39,2	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

Назва параметру	Умова	Розрах. значення
Номінальна напруга, кВ	$U_{вст} \le U_{ном}$	$10 \le 10$
Довготр. струм, кА	$I_{р.ф.} \le I_{ном}$	$261{,}94 \le 630$
Відключаюча здатність: - симетр. струм: - аперіод. склад.: - повний струм:	 $I_{п\tau} \le I_{в.н.}$ $i_{a\tau} \le \sqrt{2}\beta_{ном} I_{в.н.}$ $\sqrt{2} I_{п\tau} + i_{a\tau} \le$ $\le \sqrt{2} I_{н.в.}(1+\beta_{ном})$	 $3{,}15 \le 20$ $0 \le 11{,}31$ $1{,}41 \cdot 3{,}15 + 0 <$ $< 1{,}41 \cdot 20 \cdot (1 + 0{,}4)$ $4{,}45 \le 39{,}6$
Динамічна стійкість: - симетр. струм: - уд. струм:	 $I'' \le I_{д.ст.}$ $i_у \le 1{,}8\sqrt{2} I_{д.ст.}$	 $3{,}15 \le 52$ $5{,}01 \le 132{,}37$
Термічна стійкість	$B_к \le I^2_{т.ном} t_{т.ном}$	$12{,}36 \le 1200$

$$\tau = t_{рз.\min} + t_{с.в} = 0{,}5 + 0{,}042 = 0{,}542 \text{ с}$$

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} I'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = 1{,}41 \cdot 3{,}15 \cdot e^{\frac{-0{,}542}{0{,}0033}} = 0 \text{ кА}$$

$$B_к = I''^2 \left(t_{с.в.} + t_{рз.\max} + T_a\right) = 3{,}15^2 \ (0{,}042 + 1{,}2 + 0{,}0033) = 12{,}36 \ \text{кА}^2\text{с}$$

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

Схема приєднання ТВП до мережі наведена на рис. 6.3.

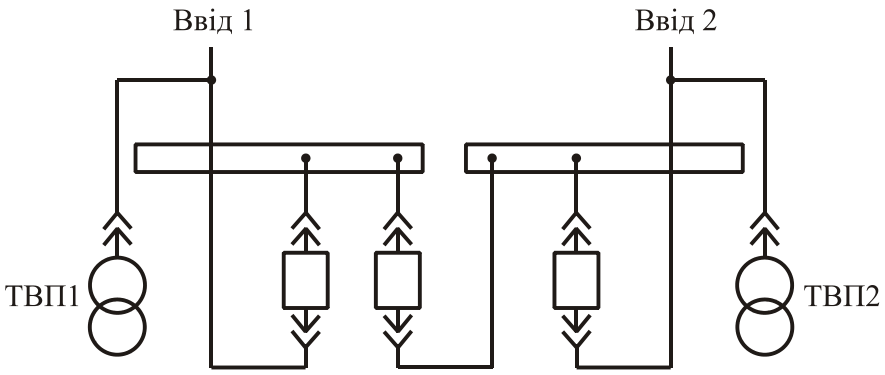


Рис. 6.3. Схема приєднання ТВП до мережі

Таблиця 6.5. Розрахунок електр. навант. ТВП

№	Назва споживача	$P_н$, кВт	n, шт.	P_Σ, кВт	cosφ	tgφ	$P_{вст}$, кВт	$Q_{вст}$, квар
1.	Пристрої підігріву комірок КРП	0,6	22	13,2	0,97	0,25	13,2	3
2.	Приміщення персоналу	6	3	18	0,97	0,25	18	5
3.	Зовнішнє освітлення	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
4.	Оперативні кола	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
Всього							67,2	18

Сумарне електр. навант. ТВП:

$$S_{вст} = \sqrt{P_{вст}^2 + Q_{вст}^2} = \sqrt{67{,}2^2 + 18^2} = 69{,}57 \text{ кВА}$$

$$S_{розр} = K_п S_{вст} = \ 0{,}8 \cdot 69{,}57 = 55{,}66 \text{ кВА}$$

Обираємо ТМ-40/10.

$$K_{зав} = \frac{S_{розр}}{n_т S_{н.т.}} = \frac{55{,}66}{2 \cdot 40} = 0{,}7$$

РОЗДІЛ 7
СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

7.1 Системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії

Комплекс гарантованого енергозабезпечення (КГЕ) розроблено для стабільного постачання споживачів першої категорії електричною енергією в умовах систематичних довготривалих перебоїв централізованого електропостачання. Фотовольтаїчні установки забезпечують користувачів стабільною напругою високих параметрів якості під час її коливань, короткочасних і довготривалих вимкнень електроенергії в районах із "ненадійним енергопостачанням".

Центральна електромережа в подібних конфігураціях може функціонувати як головне чи допоміжне джерело залежно від параметрів якості підключеної електроенергії та функціонального призначення енергетичного комплексу. Сонячні панелі можуть застосовуватися для отримання додаткової потужності за умов встановлених обмежень електроспоживання для живлення окремих ліній навантаження, а також генерування доходу від реалізації надлишкової фотовольтаїчної електроенергії енергопостачальним компаніям.

Сучасні гібридні системи електропостачання часто включають інвертори з технологією MPPT (Maximum Power Point Tracking), які забезпечують максимальну ефективність перетворення сонячної енергії. Акумуляторні батареї, зокрема літій-іонні, дозволяють накопичувати енергію в денний час та використовувати її вночі або під час пікових навантажень.

Розумні системи управління енергією (EMS) автоматично переключають між різними джерелами живлення, оптимізуючи використання сонячної енергії, мережевого електропостачання та накопичувальних систем. Такі рішення особливо актуальні в Україні, де нестабільність енергосистеми через військові дії потребує надійних резервних джерел живлення.

Мікроінвертори та оптимізатори потужності підвищують ефективність кожної окремої сонячної панелі, мінімізуючи втрати від затінення або несправностей окремих модулів. Моніторингові системи забезпечують дистанційний контроль роботи всіх компонентів та своєчасне виявлення неполадок.

Схема сонячної електростанції наведена рис. 7.1.

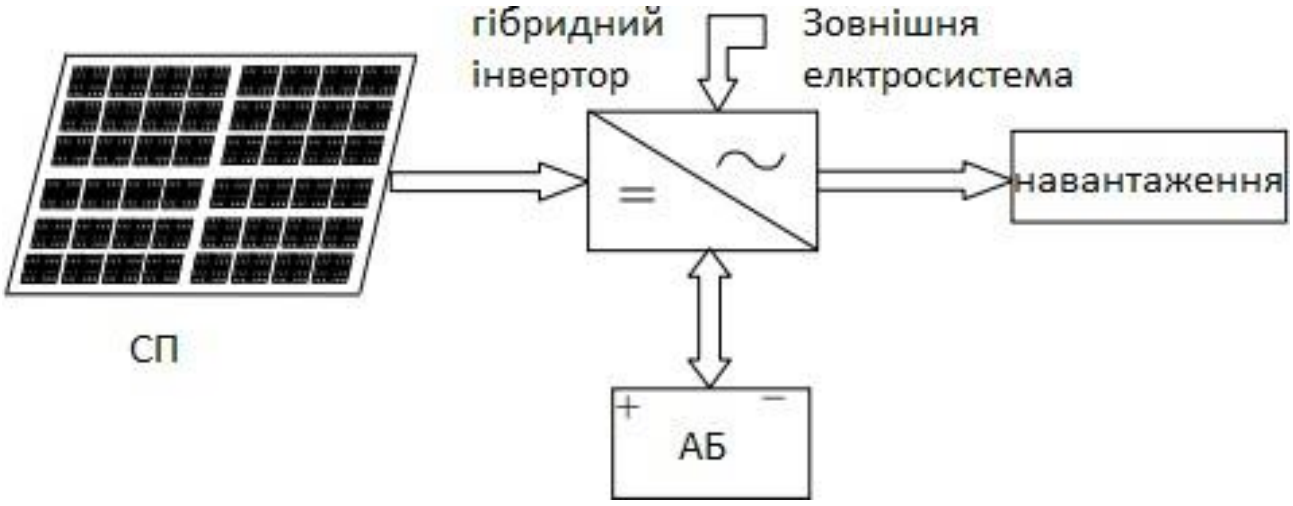


Рис. 1.1. Схема сонячної електростанції

В основі роботи такого комплексу закладено принцип оптимізації енергоспоживання: за наявності достатньої кількості сонячного випромінювання підключення до центральної електромережі деактивується, а живлення забезпечується фотовольтаїчними панелями з одночасним підзарядом акумуляторних батарей (автономний режим функціонування). Проте глибина розрядження АБ обмежується межами 25–30% для збереження резерву на випадок несподіваного відключення зовнішнього електропостачання.

Коли акумуляторні системи розряджаються до встановленого порогового значення, автоматично активується зовнішня електромережа, що забезпечує безперервне живлення споживачів та відновлює заряд батарей спільно з сонячними батареями, якщо останні продовжують генерувати електроенергію. У випадку припинення подачі напруги від централізованої мережі навантаження переходить на живлення від акумуляторних систем, ємність яких розраховується на

максимальний період автономної роботи (зимовий сезон, несприятливі погодні умови).

Контролер заряду з PWM або MPPT технологією забезпечує оптимальне управління потоками енергії та захист акумуляторів від перезаряду. Автоматичний перемикач навантаження (ATS) здійснює миттєве переключення між джерелами живлення без переривання електропостачання критично важливих споживачів.

Система моніторингу в реальному часі відстежує параметри роботи всіх компонентів: рівень заряду батарей, потужність генерації сонячних панелей, споживання навантаження та стан мережевого підключення. Це дозволяє оптимізувати енергетичний баланс та прогнозувати необхідність переключення режимів роботи.

Захисні функції включають захист від короткого замикання, перенапруги, глибокого розряду та перегріву компонентів. Літій-залізо-фосфатні батареї (LiFePO4) забезпечують до 6000 циклів заряду-розряду при дотриманні рекомендованих параметрів експлуатації.

Енергозберігаючий алгоритм дозволяє скоротити споживання електроенергії з централізованої мережі на 60-80% протягом сонячного періоду року та забезпечити повну автономність протягом 2-5 діб залежно від ємності акумуляторного блоку.

Номінальна потужність фотовольтаїчних модулів визначається здатністю забезпечити повноцінний заряд акумуляторних систем протягом двох діб у весняно-осінній період. Проте за умов тривалих перебоїв електропостачання в зимові місяці відновлення заряду батарей стає неможливим без залучення додаткових генеруючих потужностей. Оптимальним варіантом є інтеграція вітроенергетичних установок, тоді як менш ефективним рішенням стають бензинові, дизельні чи газопоршневі електростанції.

На сьогодні визнаним технологічним рішенням фотовольтаїчних енергокомплексів є створення автономних внутрішніх електромереж на основі силового устаткування компанії SMA Solar Technology AG (Федеративна Республіка Німеччина). Подібні конфігурації призначені для забезпечення

стабільного електропостачання змінним струмом високих якісних характеристик споживачам будь-якої номінальної потужності за умов неякісних параметрів електричної енергії від централізованої електромережі. В таких комплексах обладнання останнього технологічного покоління підтримує алгоритми виробництва електроенергії від відновлюваних джерел з максимальним коефіцієнтом корисної дії перетворення та підвищеними перевантажувальними властивостями.

Інвертори SMA серії Sunny Island та Sunny Boy Storage забезпечують ефективність перетворення до 98% та можливість роботи в острівному режимі без підключення до мережі. Технологія OptiTrac Global Peak дозволяє відстежувати глобальний максимум потужності навіть за умов часткового затінення панелей.

Гібридні контролери заряду підтримують одночасну роботу з декількома типами генерації: сонячними панелями, вітрогенераторами та резервними генераторами. Система автоматично визначає пріоритетність джерел енергії залежно від їх доступності та ефективності.

Модульна архітектура дозволяє масштабувати систему від 3 кВт для приватних будинків до мегаватних комплексів для промислових об'єктів. Паралельне підключення інверторів забезпечує резервування та підвищення загальної надійності системі.

Інтелектуальне управління навантаженням автоматично відключає некритичні споживачі при недостатній генерації, зберігаючи енергію для пріоритетного обладнання. Прогнозування погодних умов дозволяє оптимізувати режими заряду-розряду акумуляторів на декілька днів наперед.

Розроблений виробником інтернет-портал забезпечує відстеження функціонування енергетичного комплексу в режимі реального часу, акумулювання статистичних даних щодо генерації та енергоспоживання для оптимізації експлуатаційних параметрів. Платформа надає можливість вибору оптимального алгоритму роботи системи для максимального використання сонячної енергії або передачі "надлишкової" електроенергії назад до зовнішньої електромережі за преференційним тарифом при лібералізації роздрібного ринку електричної енергії.

Система SMA Sunny Portal або аналогічні рішення забезпечують віддалений доступ до всіх параметрів роботи через мобільні додатки та веб-інтерфейс. Користувачі можуть відстежувати миттєві значення генерації, споживання, рівень заряду батарей та прогнози виробництва енергії на основі метеорологічних даних.

Аналітичні інструменти дозволяють оцінювати ефективність інвестицій, розраховувати термін окупності та прогнозувати економічну віддачу від системи. Автоматичні звіти генеруються щомісячно для контролю продуктивності та виявлення потенційних неполадок.

В умовах "зеленого" тарифу споживачі можуть отримувати компенсацію за надлишкову електроенергію, що подається до мережі. Механізм net-metering дозволяє "банкувати" енергію в мережі протягом дня та використовувати її в нічний час.

Алгоритми самоспоживання (self-consumption) оптимізують використання власної генерації, мінімізуючи закупівлю електроенергії з мережі в години пікових тарифів. Система може автоматично активувати енергоємні пристрої (бойлери, кондиціонери, зарядки електромобілів) в періоди максимальної сонячної генерації.

Прогнозні алгоритми на основі штучного інтелекту аналізують історичні дані споживання, погодні прогнози та тарифні зони для автоматичної оптимізації енергетичного балансу. Це дозволяє досягти економії на електроенергії до 70-90% порівняно з традиційним мережевим підключенням.

Фотовольтаїчний енергетичний комплекс, що включає автономну внутрішню електромережу, складається з основних інверторів (I1 та I2), реверсивного інвертора (PI), до якого інтегровано високопотужний зарядний пристрій акумуляторних батарей від мережі 220В (схема 7.2).

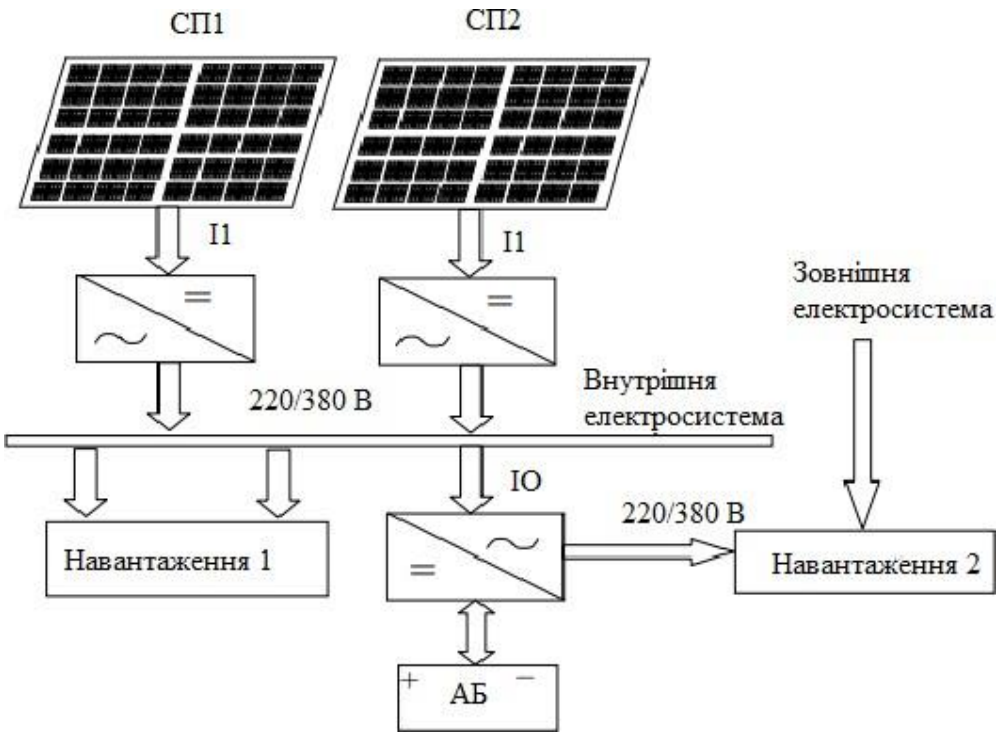


Рис. 7.2. Структура СЕС з внутрішньою мережею

У алгоритм функціонування системи інтегровано енергозберігаючий режим, принцип дії якого полягає в наступних аспектах. Замовник визначає групу критичних споживачів (першої категорії), які повинні безперервно забезпечуватися електричною енергією, додаткових споживачів, що можуть функціонувати від централізованої мережі або фотовольтаїчної енергосистеми за наявності надлишкової сонячної енергії, а також третю категорію потужних споживачів, які працюють виключно від електромережі.

Основні інвертори I1 та I2 забезпечують перетворення постійного струму від сонячних панелей у змінний струм промислової частоти 50 Гц. Потужність кожного інвертора може варіюватися від 5 до 100 кВт залежно від потреб об'єкта. Паралельна робота інверторів забезпечує резервування та можливість нарощування потужності системи.

Реверсивний інвертор виконує подвійну функцію: перетворення постійного струму батарей у змінний для живлення навантаження та зворотне перетворення змінного струму мережі в постійний для заряду акумуляторів. Вбудований зарядний пристрій може забезпечувати струм заряду до 200А при напрузі 48В або 100А при 96В.

Критичні споживачі першої категорії включають системи безпеки, освітлення, холодильне обладнання, медичну апаратуру. Ці навантаження мають найвищий пріоритет і живляться безперервно незалежно від стану зовнішньої мережі.

Споживачі другої категорії – це кондиціонери, водонагрівачі, пральні машини, які автоматично підключаються при достатній генерації сонячної енергії. Інтелектуальна система управління навантаженням відстежує баланс генерації та споживання.

Силові споживачі третьої групи – промислове обладнання, зварювальні апарати, потужні електродвигуни – підключаються лише до мережевого живлення через окремі контактори для уникнення перевантаження автономної системи.

Споживачі першої категорії забезпечуються електроенергією від чотирьох альтернативних джерел генерації: фотовольтаїчних батарей, акумуляторних систем, зовнішньої централізованої електромережі або за її відсутності - бензинових, газових, дизельних чи газопоршневих генераторних установок. У такому енергетичному комплексі здійснюється повноцінне перерозподілення сонячної енергії першочергово до пріоритетних споживачів та акумулювання в батареях. Надлишкові потужності можуть забезпечувати додаткові навантаження, що автоматично активуються, або через реверсивний інвертор перетікати до лінії живлення силових навантажень, а за можливості - передаватися до електромережі з отриманням економічної вигоди.

У такому енергетичному комплексі реверсивний інвертор PI у випадку виходу з ладу електромережі забезпечує навантаження не лише від акумуляторних батарей, але й від інверторів I1 та I2 протягом денного періоду, лише доповнюючи енергією від АБ. Коли електропостачання здійснюється від зовнішньої централізованої мережі вдень - споживає з неї тільки різницю між загальним споживанням та сонячною генерацією, таким чином реалізується енергоощадний режим експлуатації.

Контролер енергоменеджменту автоматично визначає оптимальний розподіл потужностей між джерелами залежно від поточних умов. Алгоритм пріоритизації

забезпечує максимальне використання безкоштовної сонячної енергії з мінімальним залученням мережевого електропостачання.

Система моніторингу в реальному часі відстежує ефективність кожного джерела генерації та автоматично переключає на резервні джерела при виявленні неполадок. Функція плавного переключення (seamless transfer) забезпечує безперебійність живлення критичних навантажень протягом перехідних процесів.

Економічна ефективність досягається завдяки зменшенню споживання дорогої мережевої електроенергії в денні години та можливості продажу надлишків за "зеленим" тарифом. Інтелектуальне прогнозування дозволяє планувати режими роботи енергоємного обладнання на періоди максимальної сонячної генерації.

Резервне дизель-генераторне обладнання автоматично запускається при тривалих перебоях електропостачання та низькому рівні заряду батарей, забезпечуючи повну автономність об'єкта на необмежений термін.

На сьогоднішній день розрізняють три основні типи енергетичних систем надійного електропостачання, реалізованих із застосуванням сонячних фотоелектричних установок (СФЕУ): автономні; гібридні (комбіновані); інтелектуальні.

"Автономна" енергетична система формується з двох самостійних підсистем: джерела безперебійного живлення з акумуляторним блоком та незалежного джерела електричної енергії. Акумуляторні батареї мають енергетичний запас, зазвичай на 30 хвилин для забезпечення безперервного електропостачання навантажень першої категорії під час короткочасних перебоїв, а за тривалого відключення (понад 20 хвилин) - гарантувати живлення навантажень протягом періоду запуску автономної генераторної установки. Активація здійснюється блоком АВР (автоматичного введення резерву) з таймером затримки запуску (схема 7.3).

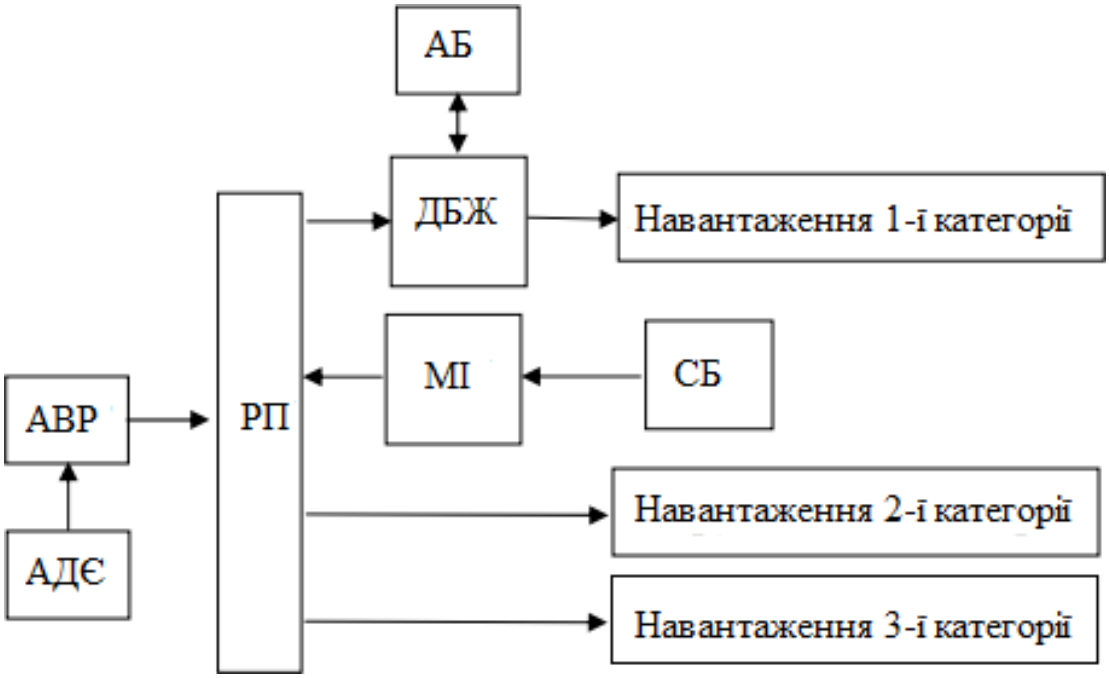


Рис. 7.3. Схема автономної енергосистеми

Блок безперебійного живлення (ББЖ) забезпечує миттєве переключення на резервне живлення протягом 4-10 мілісекунд, що критично важливо для чутливого електронного обладнання. Акумуляторні системи типу VRLA або літій-іонні забезпечують надійність роботи протягом 5-10 років експлуатації.

Пристрій автоматичного введення резерву контролює параметри мережевої напруги та при виявленні відхилень активує резервний генератор з програмованою затримкою. Час запуску дизель-генераторів становить 10-15 секунд, газових генераторів - 20-30 секунд.

Сонячні фотоелектричні установки в автономних системах працюють як основне джерело енергії в денний час, забезпечуючи заряд акумуляторів та живлення поточних навантажень. Контролери заряду типу MPPT оптимізують відбір енергії від панелей навіть за умов змінної освітленості.

Повна незалежність від централізованого електропостачання дозволяє забезпечувати критично важливі об'єкти в віддалених районах. Модульна структура спрощує обслуговування та модернізацію окремих компонентів без зупинки всієї системи.

Висока надійність досягається завдяки резервуванню на рівні підсистем - вихід з ладу одного компоненту не впливає на функціонування інших. Можливість роботи в жорстких кліматичних умовах робить такі системи ідеальними для телекомунікаційних вишок, метеостанцій та віддалених промислових об'єктів.

Сонячні батареї підключаються до мережевого інвертора, який має два входи для їх приєднання та трифазний вихід. Принцип функціонування такого інвертора полягає у тому, що вся потужність, генерована фотовольтаїчними панелями, подається до загальної мережі споживача виключно за присутності вхідної якісної електричної енергії. У випадку відхилень (зниження або коливання) напруги в будь-якій фазі або зміни форми напруги через ввімкнення/вимкнення реактивних навантажень інвертор автоматично відключається. За умов роботи генераторної установки вихід сонячного інвертора повинен бути деактивований.

"Гібридна" енергетична система формується з двох трифазних гібридних інверторів (ГІ), що мають інтегровані зарядні пристрої для відновлення заряду акумуляторних батарей від зовнішньої електромережі та вбудованих інверторних модулів (схема 7.4).

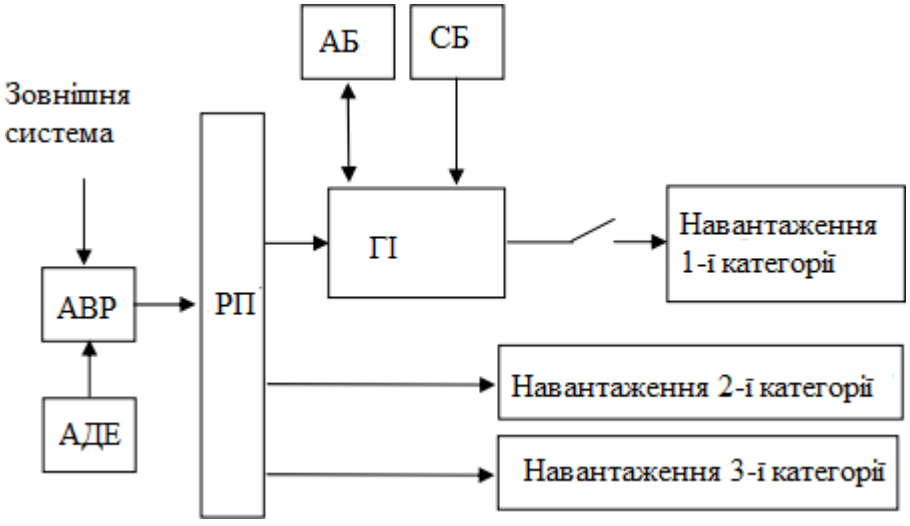


Рис. 7.4. Гібридна енергосистема

Функція Grid-tie забезпечує синхронізацію з параметрами мережі: частотою 50 Гц, напругою 380В та фазовим зсувом. Система anti-islanding автоматично відключає інвертор при зникненні мережевої напруги для безпеки обслуговуючого персоналу.

Контролери максимальної потужності (MPPT) забезпечують ефективність до 99% при перетворенні постійного струму панелей. Кожен вхід має незалежний MPPT-трекер, що дозволяє підключати панелі різної потужності або орієнтації.

Захисні функції включають контроль ізоляції, захист від перенапруги постійного та змінного струму, температурний захист та моніторинг опору заземлення. Дисплей відображає миттєві параметри роботи та накопичені дані генерації.

Двонаправлена функціональність дозволяє як перетворювати енергію панелей для мережі, так і заряджати батареї від мережевого живлення в нічний час за низьким тарифом. Вбудований блок безперебійного живлення забезпечує критичні навантаження при аваріях мережі.

Паралельна робота декількох гібридних інверторів збільшує загальну потужність системи та забезпечує резервування. Інтелектуальне управління розподіляє навантаження між модулями для оптимальної ефективності.

Можливість роботи в режимі peak-shaving дозволяє зменшувати споживання з мережі в години пікових тарифів, використовуючи накопичену в батареях енергію. Система автоматично переключається між режимами залежно від тарифних зон та рівня заряду акумуляторів.

Гібридні інвертори функціонують у наступних режимах:.

1. Пріоритет фотовольтаїчної енергії: заряд акумуляторних батарей та електропостачання навантажень здійснюють сонячні батареї, якщо енергії для споживачів достатньо - живлення реалізується від АБ, а при розряді до встановленого рівня, наприклад 30%, електропостачання навантажень забезпечується від інверторів. За такого режиму ємність акумуляторних систем повинна бути розрахована на підтримку при недостачі сонячної енергії протягом короткотривалого періоду (хмарна погода, короткочасні опади), наприклад, на 1 годину. Надлишкова енергія перенаправляється через шунт.

2. Основна робота як джерело безперебійного живлення з підтримкою від фотовольтаїчних батарей. Система функціонує як UPS з додатковою підзарядкою від сонячних панелів для продовження автономності.

3. Автономний режим експлуатації: повна відсутність електропостачання від зовнішньої централізованої мережі з функціонуванням виключно від власних джерел генерації.

"Інтелектуальна" енергетична система характеризується підвищеною надійністю функціонування завдяки застосуванню сучасних технологій управління та моніторингу.

Штучний інтелект та машинне навчання аналізують патерни споживання енергії, погодні умови та тарифні зони для автоматичної оптимізації енергетичного балансу. Система самостійно адаптується до змін у поведінці споживачів та сезонних коливань генерації.

Предиктивна аналітика прогнозує потреби в електроенергії на основі історичних даних та метеорологічних прогнозів. Алгоритми глибокого навчання оптимізують циклі заряду-розряду батарей для максимального збільшення їх ресурсу.

Розподілена система управління з резервуванням контролерів забезпечує безвідмовність роботи навіть при виході з ладу окремих компонентів. Blockchain-протоколи гарантують безпеку даних та автоматизують розрахунки за "зелену" електроенергію.

Інтеграція з IoT-пристроями дозволяє керувати розумним будинком, автоматично включаючи енергоємні прилади в періоди максимальної сонячної генерації. Мобільний додаток забезпечує дистанційний контроль та налаштування всіх параметрів системи.

Система самодіагностики виявляє потенційні несправності на ранніх стадіях та автоматично викликає сервісну службу. Цифрові двійники компонентів дозволяють моделювати різні сценарії роботи для оптимізації продуктивності.

Схема інтелектуальної системи зображена на рис. 7.5.

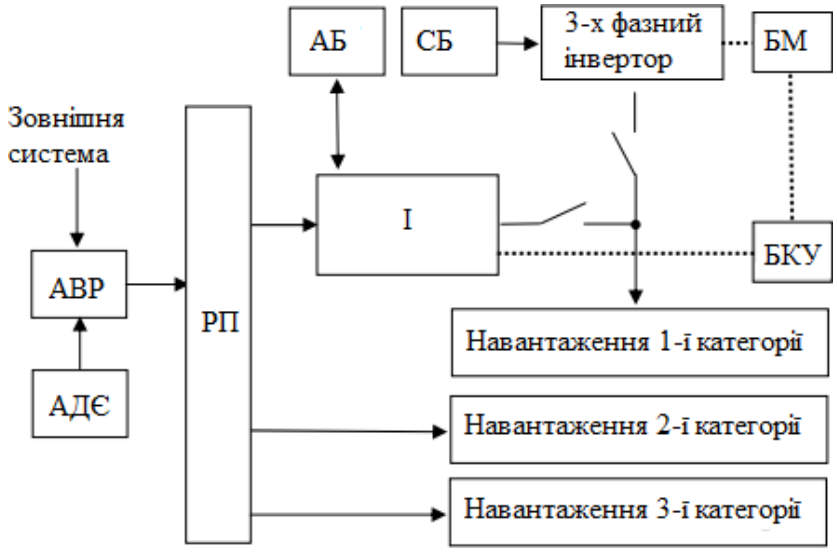


Рис.7.5. Схема інтелектуальної системи

Виходи всіх інверторів з'єднуються паралельно, що дозволяє створити власну внутрішню електричну мережу для забезпечення навантажень першої категорії високоякісною напругою в денний період незалежно від якісних характеристик вхідної напруги. За умов надлишку фотовольтаїчної енергії для електропостачання навантажень першої категорії та повністю заряджених акумуляторних батарей "надлишкова" енергія через входи реверсивних інверторів подається до загальної електричної мережі живлення споживачів, наприклад, житлового будинку, або може витрачатися на електропостачання силових навантажень, що підключаються дистанційно через радіоканал.

Синхронізація фаз між інверторами забезпечується спеціальними контролерами, які підтримують ідентичні параметри вихідної напруги: амплітуду, частоту та фазовий кут. Протокол CAN-BUS або RS485 забезпечує обмін даними між модулями для координації їх роботи.

Система розподілу навантаження автоматично балансує потужність між інверторами залежно від їх номінальних характеристик та поточного стану. Алгоритм droop control забезпечує пропорційний розподіл активної потужності між паралельно працюючими модулями.

Гальванічна розв'язка від зовнішньої мережі захищає чутливе обладнання від перенапруг, провалів напруги та електромагнітних завад. Стабілізація параметрів електроенергії забезпечує THD менше 3% та відхилення напруги не більше ±1%.

Безперервність електропостачання критичних споживачів гарантується навіть при повному відключенні зовнішньої мережі. Час переключення між режимами не перевищує 10 мілісекунд, що відповідає вимогам для медичного та комп'ютерного обладнання.

Радіокерування навантаженнями реалізується через протоколи LoRaWAN, Zigbee або Wi-Fi з дальністю дії до 10 км в умовах прямої видимості. Розумні реле автоматично активують енергоємні пристрої (насоси, електронагрівачі, зарядні станції) при наявності надлишкової генерації.

Система пріоритизації навантажень дозволяє встановлювати черговість підключення споживачів залежно від їх важливості та поточного енергетичного балансу. Мобільний додаток забезпечує дистанційний контроль стану всіх підключених пристроїв та можливість ручного керування.

Алгоритми машинного навчання аналізують патерни споживання для автоматичного планування роботи силового обладнання в періоди максимальної сонячної генерації, що дозволяє досягти коефіцієнта самоспоживання до 95%.

7.2 Класифікація інверторів для систем електропостачання з фотовольтаїчними модулями

Систематизація перетворювачів електричної енергії, що застосовуються в комплексах електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії, представлена на схемі 7.6.

Автономні (stand-alone) інвертори призначені для роботи в ізольованих системах без підключення до централізованої електромережі. Ці пристрої забезпечують перетворення постійного струму від сонячних панелей та акумуляторних батарей у змінний струм стандартних параметрів для живлення локальних споживачів.

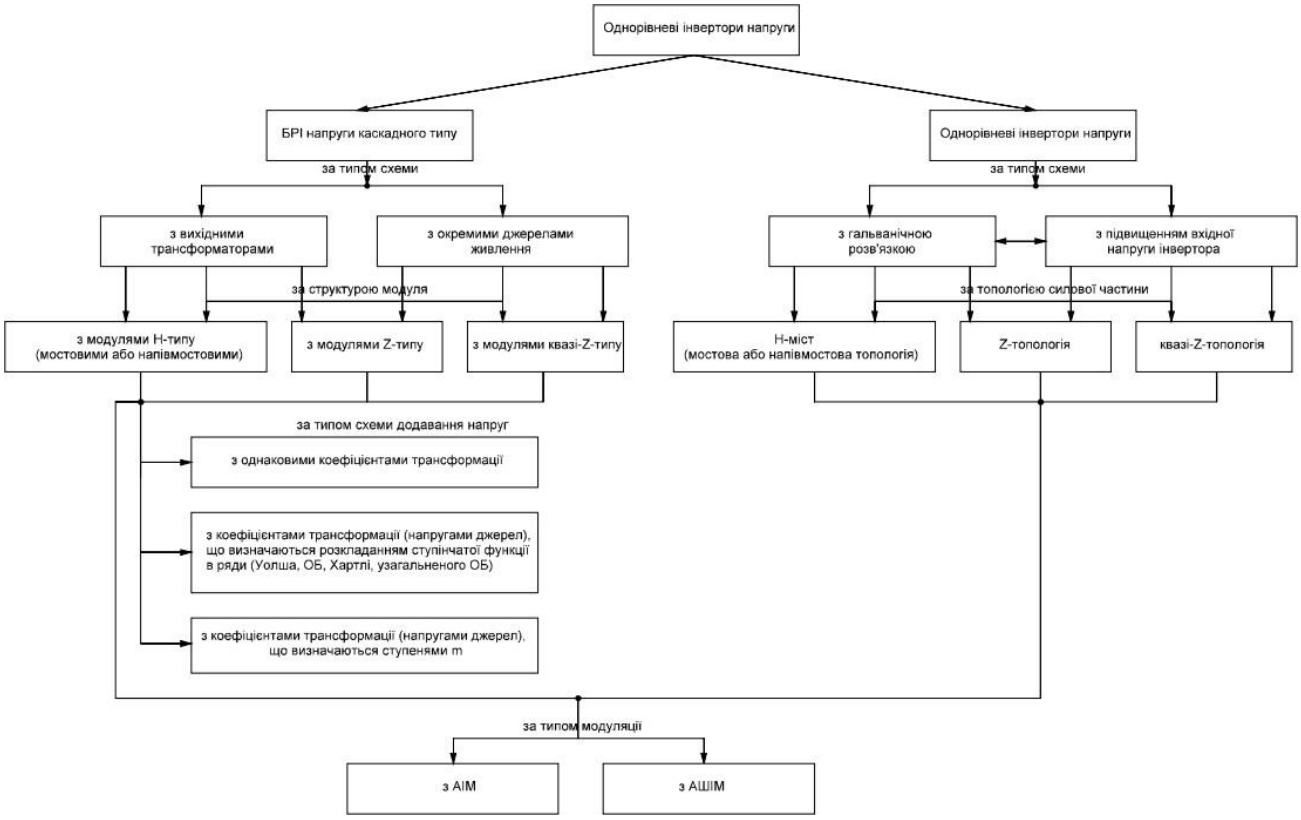


Рис. 7.6. Класифікація перетворювачів електричної енергії, що застосовуються в комплексах електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії

Мережеві (grid-tie) інвертори функціонують виключно при наявності зовнішньої електромережі, синхронізуючись з її параметрами та подаючи вироблену енергію безпосередньо до загальної мережі. Такі пристрої не мають можливості автономної роботи та автоматично відключаються при зникненні мережевої напруги.

Гібридні (multi-mode) інвертори поєднують функціональність автономних та мережевих типів, забезпечуючи можливість роботи як з підключенням до мережі, так і в автономному режимі з використанням акумуляторних систем накопичення енергії.

Мікроінвертори встановлюються безпосередньо на кожну сонячну панель, забезпечуючи індивідуальну оптимізацію потужності та мінімізацію втрат від затінення окремих модулів. Потужність таких пристроїв зазвичай становить 200-400 Вт з ефективністю до 96%.

Стрінгові інвертори підключають послідовно з'єднані панелі (стрінги) та забезпечують перетворення для групи модулів загальною потужністю від 1 до 100 кВт. Вони мають нижчу вартість у перерахунку на ват встановленої потужності порівняно з мікроінверторами.

Центральні інвертори використовуються у великих фотовольтаїчних електростанціях потужністю від 100 кВт до декількох мегават. Такі пристрої мають найвищу ефективність (до 98,5%) та найнижчу питому вартість, але потребують централізованого обслуговування.

Оптимізатори потужності встановлюються на рівні окремих панелей для максимізації вихідної потужності кожного модуля, працюючи в парі зі струнговими інверторами. Це рішення забезпечує переваги мікроінверторів при збереженні економічності струнгової архітектури.

Інвертори з функцією реактивної потужності можуть компенсувати реактивне навантаження в мережі, покращуючи коефіцієнт потужності та стабільність електропостачання. Деякі моделі підтримують режим статичного компенсатора (STATCOM) для стабілізації параметрів мережі.

За архітектурним принципом серед однорівневих топологій можна виокремити конфігурації з застосуванням підвищувальних перетворювачів навколо схеми інвертора та присутністю гальванічної ізоляції, яка може реалізовуватися у вигляді вихідного трансформатора, підключеного до виходу інвертора, аналогічно багаторівневій топології, що використовує єдине джерело живлення та вихідні трансформатори, або шляхом гальванічної інтеграції ізоляції як компонента перетворювача вхідної напруги, коли необхідно одночасно реалізувати обидва схемотехнічні рішення. Варто підкреслити, що ця категорія підходить для інверторів, які застосовуються в установках, що використовують фотовольтаїчні батареї як альтернативне джерело електричної енергії.

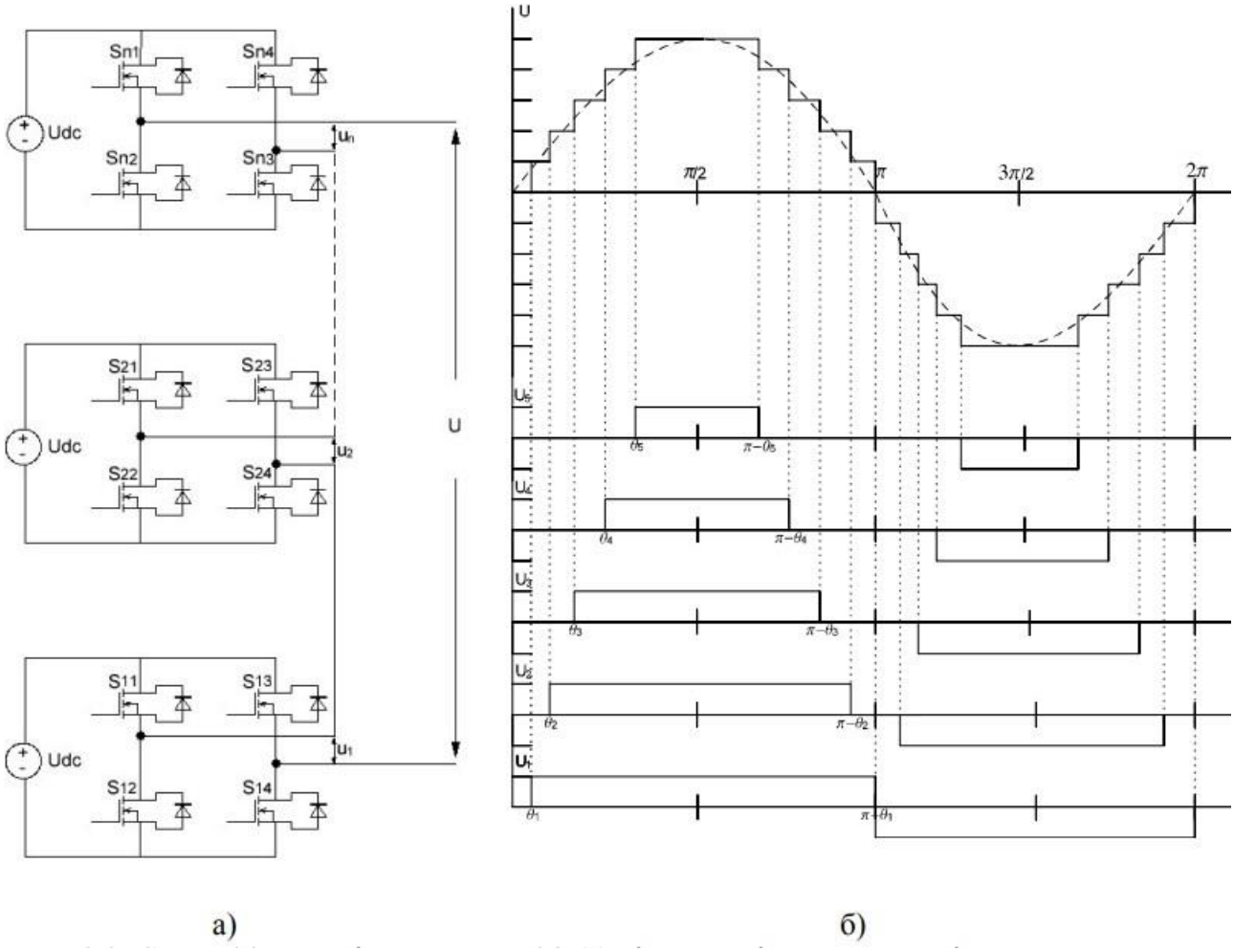


Рис. 7.7. Схема багаторівневого рівневого інвертора з 5 джерелами живлення (а) та графіки вихідної напруги (б)

Підвищувальні перетворювачі (boost converters) інтегруються для узгодження низької напруги сонячних панелей (зазвичай 12-48В) з високою напругою DC-ланки інвертора (300-800В). Застосування MPPT-контролерів у складі підвищувальних каскадів забезпечує максимальне відбирання потужності від фотовольтаїчних модулів за різних умов освітленості.

Гальванічна ізоляція виконує кілька критично важливих функцій: забезпечує електробезпеку персоналу, захищає від синфазних перешкод, дозволяє заземлення як DC, так і AC частин системи. Трансформаторна ізоляція може реалізовуватися на промисловій частоті (50 Гц) або високій частоті (20-100 кГц).

Високочастотна трансформаторна ізоляція забезпечує значне зменшення габаритів та ваги магнітних компонентів порівняно з промислово-частотними трансформаторами. Ефективність таких систем досягає 95-97% завдяки зниженим

втратам у меншому магнітопроводі.

Багаторівневі топології (multilevel) дозволяють формувати вихідну напругу з покращеними гармонічними характеристиками, зменшуючи коефіцієнт гармонічних спотворень до 2-3%. Каскадні H-bridge інвертори забезпечують модульність та резервування на рівні окремих силових модулів.

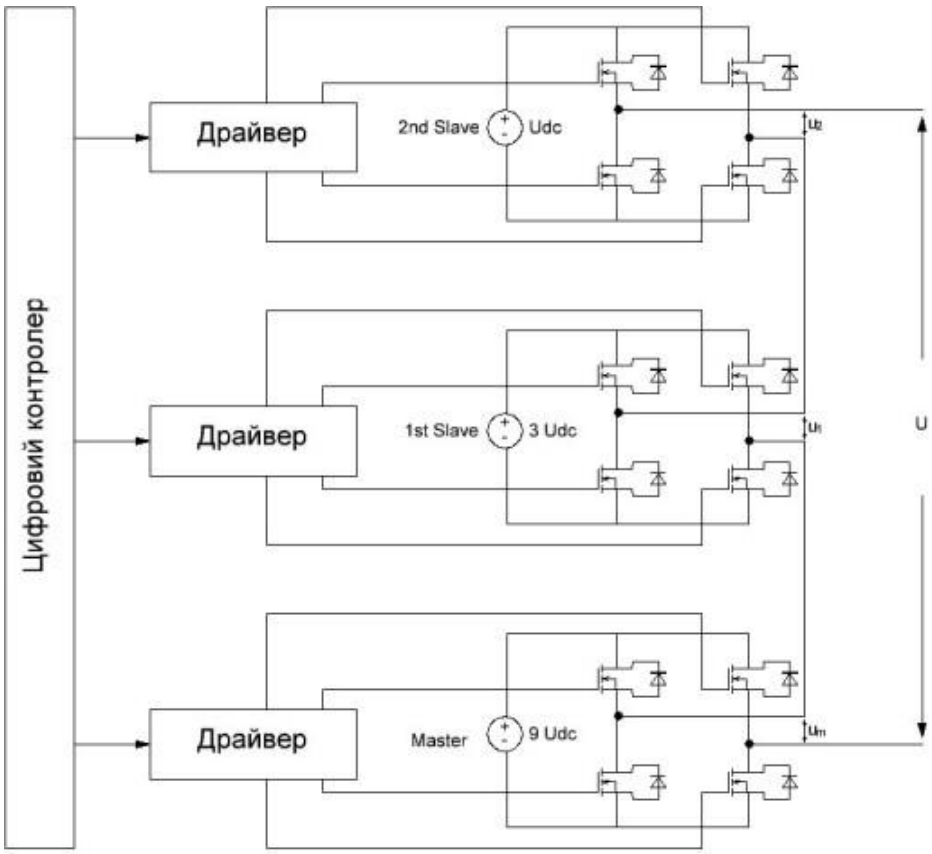
Широкий діапазон вхідної напруги (MPPT range) від 150 до 800В дозволяє оптимально конфігурувати струнги панелей залежно від архітектури об'єкта. Двонаправлені перетворювачі забезпечують можливість як генерації в мережу, так і заряду накопичувачів від мережевого живлення.

Алгоритми активного PFC (Power Factor Correction) підтримують коефіцієнт потужності на рівні 0,99 навіть при змінній генерації сонячних панелей. Система anti-islanding захищає мережу від неконтрольованого живлення при аваріях, відключаючи інвертор протягом 0,1-2 секунд після зникнення мережевої напруги.

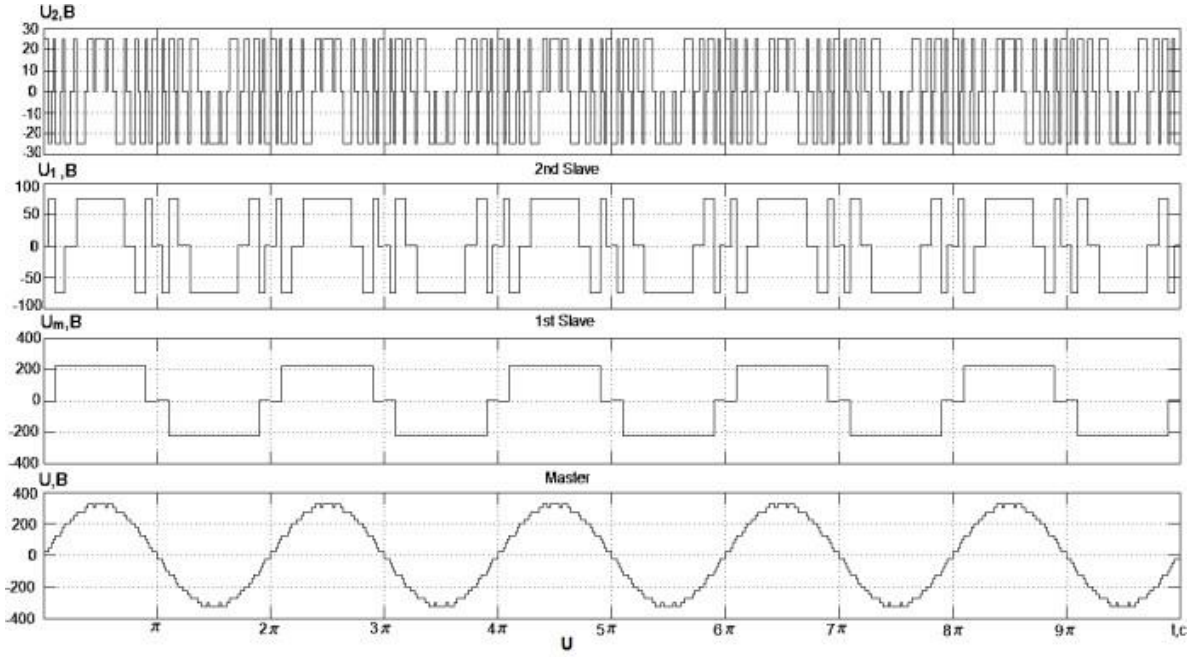
Серед численних інверторів, побудованих на з'єднанні Н-мостових модулів з коефіцієнтом трансформації m, розрізняють конфігурації: з індивідуальними джерелами живлення для модулів та з єдиним спільним джерелом.

Каскадні багаторівневі інвертори (Cascaded H-Bridge MLI) з індивідуальними джерелами живлення для кожного Н-мостового модуля забезпечують найвищу гнучкість та надійність системи. Кожен модуль підключається до власного DC-джерела, що може бути окремою струнгою сонячних панелів, акумуляторним блоком або ізольованим виходом DC/DC перетворювача.

Перевагами такої архітектури є повна гальванічна ізоляція між рівнями, можливість незалежного MPPT-трекінгу для кожної струнги панелей та продовження роботи системи навіть при виході з ладу окремих модулів. Кількість рівнів вихідної напруги визначається за формулою: $N = 2m + 1$, де m - кількість Н-мостів.



а)



б)

Рис. 7.8. Каскадний інвертор з 3-ма відокремленими джерелами живлення

Диодно-зафіксовані (Diode-Clamped) та конденсаторно-зафіксовані (Flying Capacitor) багаторівневі інвертори використовують єдине DC-джерело з розподілом напруги між рівнями за допомогою конденсаторних дільників або діодних кліперів. Така архітектура забезпечує більш компактне конструктивне виконання та нижчу вартість.

Трирівневі NPC (Neutral Point Clamped) інвертори є найпоширенішими представниками цієї категорії, забезпечуючи THD менше 5% при промисловій частоті комутації 2-10 кГц. Балансування напруг конденсаторів DC-ланки здійснюється спеціальними алгоритмами модуляції.

Синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція (SPWM) забезпечує формування вихідної напруги з мінімальними гармонічними спотвореннями. Для багаторівневих топологій застосовуються модифіковані алгоритми: Phase-Shifted PWM, Level-Shifted PWM та Space Vector Modulation.

Селективна елімінація гармонік (SHE-PWM) дозволяє цілеспрямовано усувати найбільш критичні гармонічні складові, досягаючи THD менше 2% без застосування вихідних фільтрів. Алгоритми оптимального керування мінімізують комутаційні втрати при збереженні якості вихідної напруги.

Модульна архітектура багаторівневих інверторів ідеально підходить для великих фотовольтаїчних електростанцій, де необхідно обробляти потужності від сотень кіловат до мегават. Можливість поетапного нарощування потужності дозволяє розвивати проекти відповідно до зростання енергетичних потреб.

Покращені гармонічні характеристики зменшують вимоги до фільтрувального обладнання та підвищують якість електроенергії, що подається в мережу. Висока ефективність (до 98,5%) та надійність роблять такі системи оптимальним вибором для комерційних сонячних проектів.

У конфігурації з одним джерелом живлення вихідні трансформатори забезпечують необхідні значення напруги для кожного рівня багаторівневого інвертора (схема 7.9).

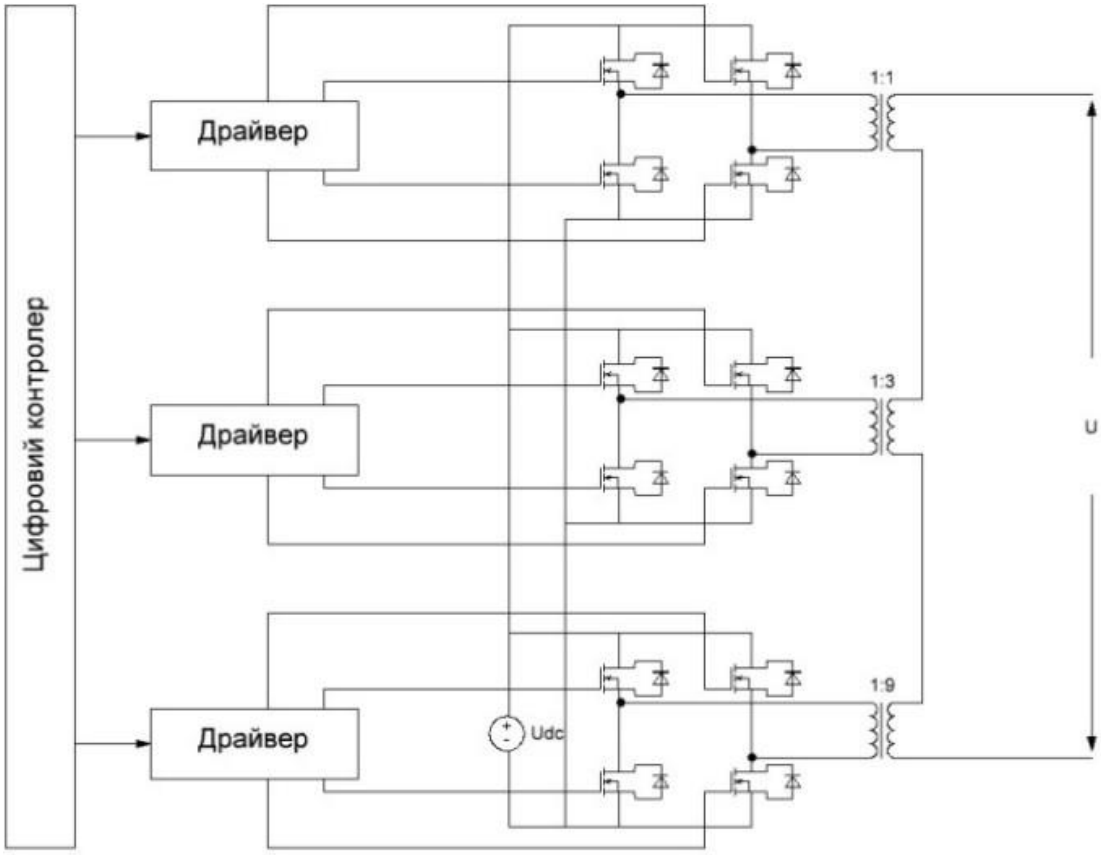


Рис. 7.9. Багаторівневий перетворювач з 1 джерелом постійної напруги і вихідними трансформаторами

Єдине DC-джерело живлення підключається до групи однофазних H-мостових інверторів, кожен з яких працює з власним вихідним трансформатором. Коефіцієнти трансформації обираються за геометричною прогресією: 1:1, 1:2, 1:4, що дозволяє формувати 2^n рівнів вихідної напруги при використанні n трансформаторів.

Вторинні обмотки трансформаторів з'єднуються послідовно для отримання сумарної вихідної напруги. Різні комбінації полярності підключення обмоток дозволяють формувати ступінчасту синусоїдальну напругу з мінімальними гармонічними спотвореннями.

Гальванічна ізоляція між первинною та вторинною сторонами забезпечує електробезпеку та можливість заземлення як DC, так і AC частин системи. Трансформатори також виконують функцію узгодження рівнів напруги між низьковольтною DC-ланкою та високовольтним AC-виходом.

Модульність конструкції дозволяє легко нарощувати кількість рівнів напруги шляхом додавання нових Н-мостів з відповідними трансформаторами. Вихід з ладу одного модуля не призводить до повної зупинки системи - інші модулі продовжують працювати з дещо гіршою якістю вихідної напруги.

Високочастотні трансформатори (20-100 кГц) забезпечують значне зменшення габаритів та ваги порівняно з промислово-частотними аналогами. Застосування феритових або аморфних сердечників мінімізує втрати в магнітопроводі.

Синхронізація роботи всіх Н-мостів забезпечується єдиним контролером, який формує зсунуті у фазі сигнали керування для кожного модуля. Алгоритм Phase-Shifted PWM розподіляє комутаційні перешкоди в часі, зменшуючи загальний рівень EMI.

Така архітектура особливо ефективна для середньовольтних інверторів (6-35 кВ) великих сонячних електростанцій, де необхідно забезпечити пряме підключення до розподільчих мереж без додаткових підвищуючих трансформаторів. Можливість регулювання вихідної напруги в широких межах спрощує інтеграцію з різними типами електричних мереж.

Покращена якість електроенергії (THD < 3%) дозволяє відмовитися від громіздких пасивних фільтрів, що знижує загальну вартість та габарити електростанції. Висока надійність досягається завдяки резервуванню на рівні окремих силових модулів.

7.3 Розробка й дослідження інверторних пристроїв для сонячних електростанцій

Фотоелектричні установки класифікуються на незалежні та підключені до електромережі. Незалежні сонячні генератори ефективно забезпечують живлення споживачів, проте для накопичення електроенергії під час відсутності навантаження необхідні акумуляторні батареї.

Автономному типу притаманні певні обмеження: понижений коефіцієнт корисної дії, значна вартість систем накопичення та обмежений об'єм збереження електричної енергії. Додатково варто зазначити, що такі установки потребують регулярного технічного обслуговування батарей і мають порівняно коротший термін експлуатації накопичувачів.

Мережеві фотоелектричні системи, навпаки, характеризуються вищою ефективністю завдяки можливості передачі надлишкової енергії в загальну електромережу. Вони використовують механізм "зеленого тарифу", що дозволяє власникам отримувати компенсацію за відданну електроенергію. Інвертори для таких систем повинні забезпечувати синхронізацію з параметрами мережі, включаючи частоту, напругу та фазу.

Сучасні інверторні технології включають використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що забезпечує високу якість вихідної синусоїдальної напруги. Важливими параметрами є коефіцієнт гармонічних спотворень (КГС), який не повинен перевищувати 5% згідно міжнародних стандартів, та ККД інвертора, що досягає 95-98% у найсучасніших моделях.

На рисунку 7.10 показана схема приєднання сонячних панелей

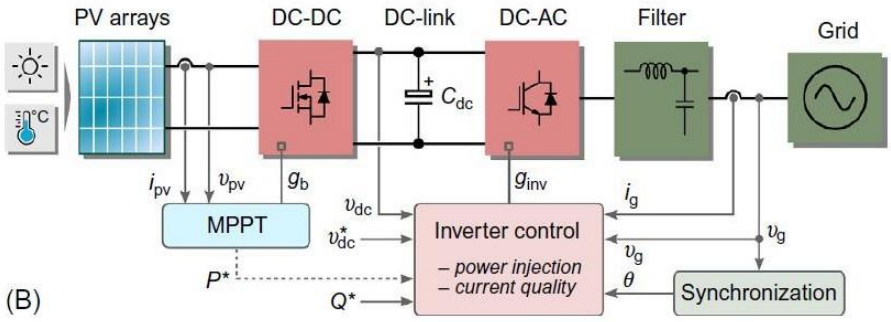


Рис. 7.10. Схема приєднання сонячних панелей

Для фотоелектричних установок початковою стадією трансформації електричної енергії виступають DC/DC конвертори. Враховуючи вольтажні характеристики, що потребують координації, застосовуються різноманітні види перетворювальних пристроїв.

Підвищувальні (boost) конвертори збільшують вихідну напругу порівняно з вхідною, що критично важливо для узгодження низьковольтних сонячних модулів із високовольтними інверторами. Такі пристрої забезпечують ефективне відслідковування точки максимальної потужності (MPPT) панелей.

Знижувальні (buck) перетворювачі зменшують напругу для живлення низьковольтних споживачів або акумуляторних систем. Вони особливо актуальні в автономних установках, де необхідно заряджати 12В або 24В батареї від вищої напруги фотомодулів.

Підвищувально-знижувальні (buck-boost) конвертори забезпечують гнучкість роботи за різних умов освітлення, коли напруга панелей може коливатися в широких межах залежно від інтенсивності сонячного випромінювання та температури.

Сучасні MPPT-контролери інтегрують алгоритми перетурбації та спостереження (P&O) або інкрементальної провідності для максимізації енерговіддачі. Ефективність таких систем досягає 99% у оптимальних умовах експлуатації.

Ізольовані DC/DC конвертори застосовуються для забезпечення гальванічної розв'язки між різними частинами системи, що підвищує безпеку та знижує вплив електромагнітних завад.

На рисунку 7.11 – 7.13 показані схеми та діаграми, що ілюструють режим роботи підвищуючого перетворювача.

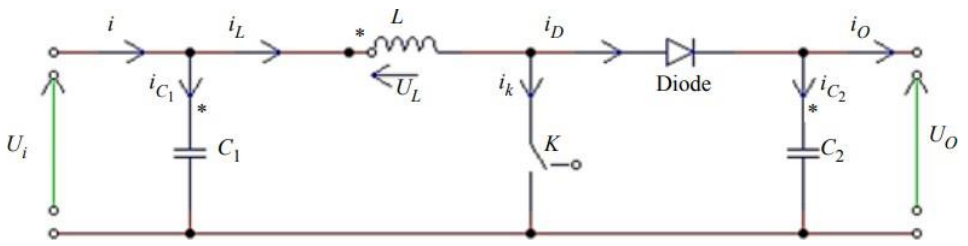


Рис. 7.11.Схема підвищувального перетворювача

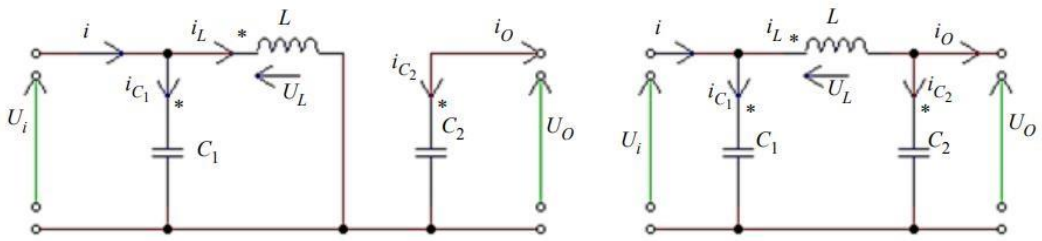


Рис. 7.12. Режими роботи підвищуючого перетворювача

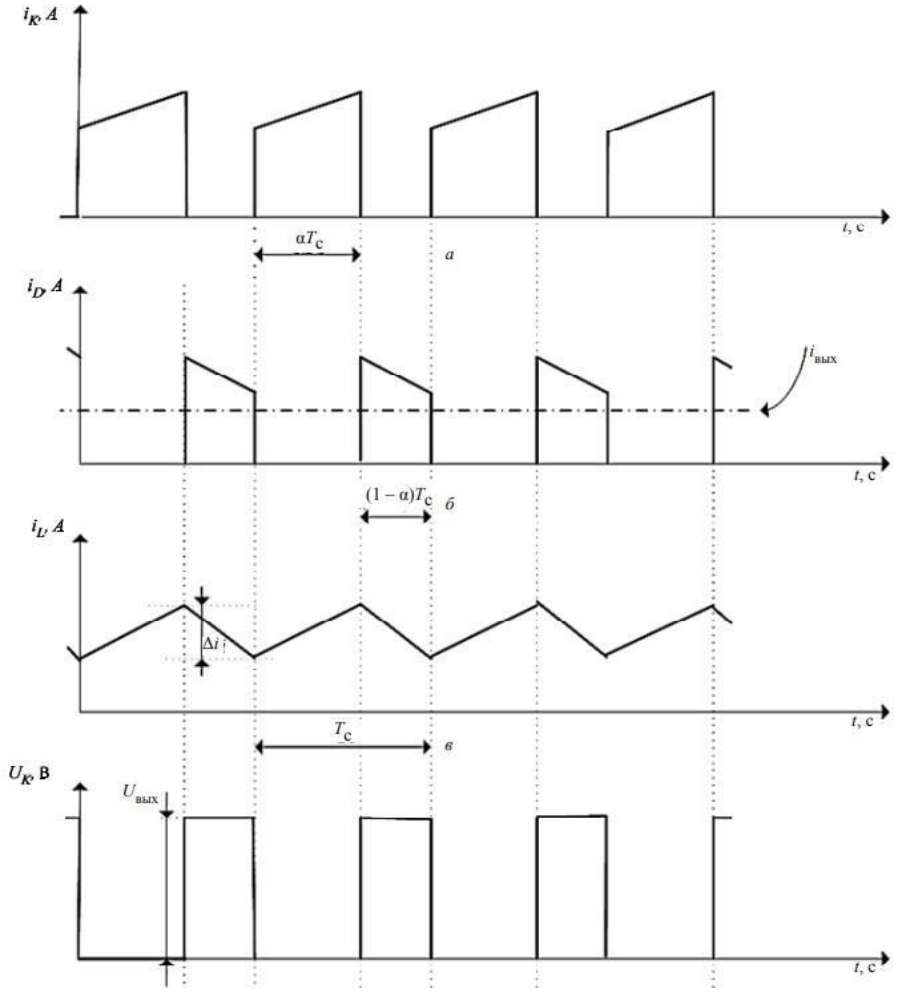


Рис. 7.13. Діаграми роботи підвищуючого перетворювача

Проведемо аналіз математичної моделі сонячної електростанції з інвертором, схема якого зображена на рис. 7.14.

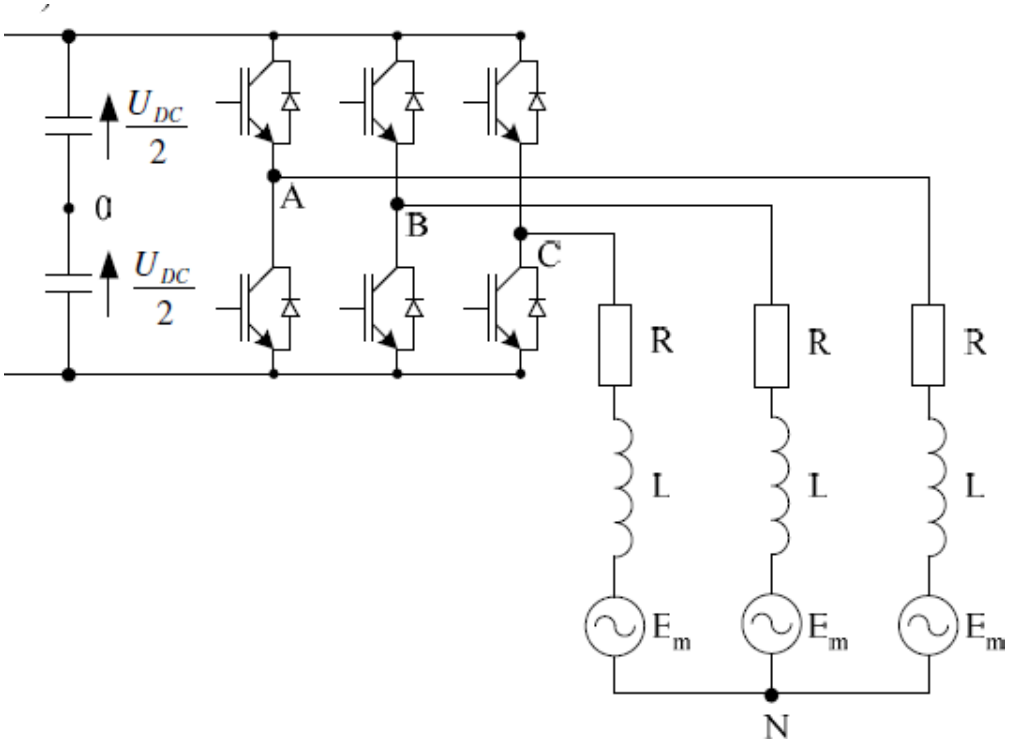


Рис. 7.14. Схема сонячного інвертора

Напруги e_A ,e_B,e_C визначаються виразами

$$u_{AN} = E_m \sin(\omega t)$$

$$u_{BN} = E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad , \qquad (7.1)$$

$$u_{CN} = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

Миттєві значення лінійних напруг:

$$u_{AB} = (S_A - S_B)U_C$$

$$u_{BC} = (S_B - S_C)U_C \qquad (7.2)$$

$$u_{CA} = (S_C - S_A)U_C$$

Миттєві значення фазних напруг:

$$u_{пA} = f_a U_C$$
$$u_{пB} = f_b U_C \qquad (7.3)$$
$$u_{пC} = f_c U_C$$

де f_a, f_b, f_c – комутаційні, функції перемикання фазних напруг:

$$f_a = \frac{2S_A - (S_B + S_C)}{3}$$
$$f_b = \frac{2S_B - (S_A + S_C)}{3} \qquad (7.4)$$
$$f_c = \frac{2S_C - (S_A + S_B)}{3}$$

Розглянемо математичну модель виправляча напруги:

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{пA} \\ u_{пB} \\ u_{пC} \end{bmatrix} \qquad (7.5)$$

Струм шини постійного струму визначається

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt} \qquad (7.6)$$

Струм в конденсаторі:

$$i_C = i_d - i_н \tag{7.7}$$

Звідки:

$$C\frac{dU_C}{dt} = S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C - i_н \tag{7.8}$$

Для окремих фаз отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned} L_A\frac{di_A}{dt} + Ri_A &= e_A - U_C\left(S_A - \frac{1}{3}\sum_{n=a}^{c} S_n\right) \\ L_B\frac{di_B}{dt} + Ri_B &= e_B - U_C\left(S_B - \frac{1}{3}\sum_{n=a}^{c} S_n\right) \\ L_C\frac{di_C}{dt} + Ri_C &= e_C - U_C\left(S_C - \frac{1}{3}\sum_{n=a}^{c} S_n\right) \end{aligned} \tag{7.9}$$

Перетворимо рівняння (7.3) в систему координат a-b:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= \sqrt{\frac{3}{2}}E_m \sin(\omega t) \\ u_\beta &= \sqrt{\frac{3}{2}}E_m \cos(\omega t) \\ \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}}E_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} &= R\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega L\begin{bmatrix} i_d \\ -i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{пd} \\ u_{пq} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7.10}$$

Рівняння (7.2) - (7.6) і (7.7) - (7.10) є математичною моделлю автоматичного випрямляча напруги з урахуванням його дискретності.

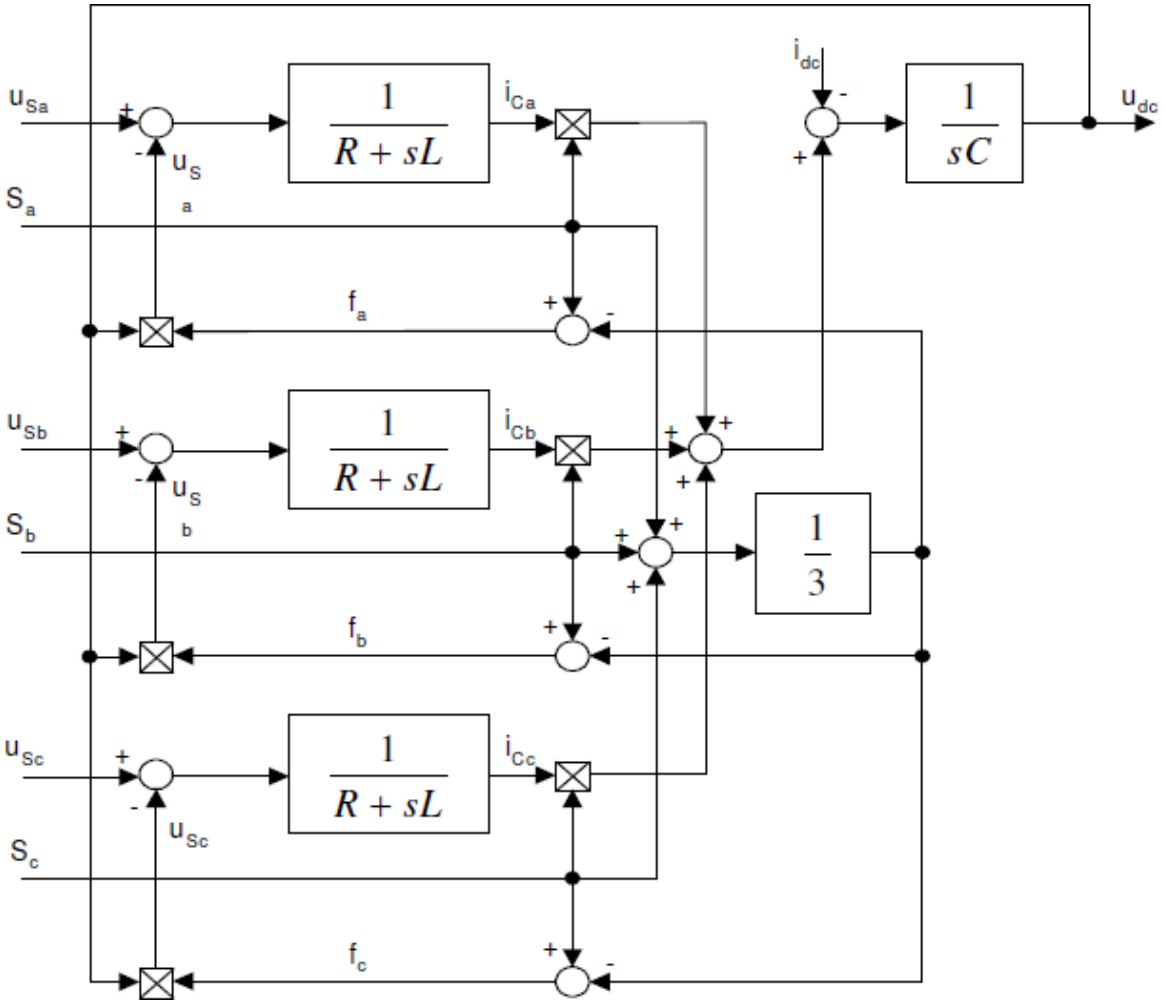


Рис. 7.13. Структурна модель у трифазних координатах

7.4 Комп'ютерне моделювання сонячної електростанції

На рис. 7.14 приведена модель сонячної електростанції в системі Matlab/Simulink

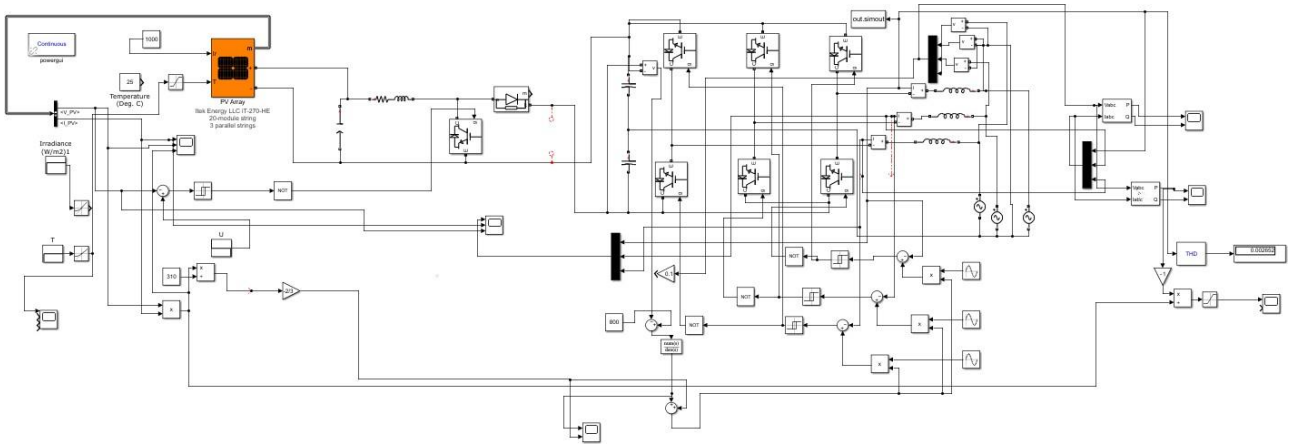


Рис. 7.14. модель сонячної електростанції в системі Matlab/Simulink

Діаграми взаємозв'язку між струмом і напругою, а також потужністю та напругою досліджуваного фотоелектричного модуля за варіативних температурних режимів при сталому рівні освітлення представлені на рисунку 7.15.

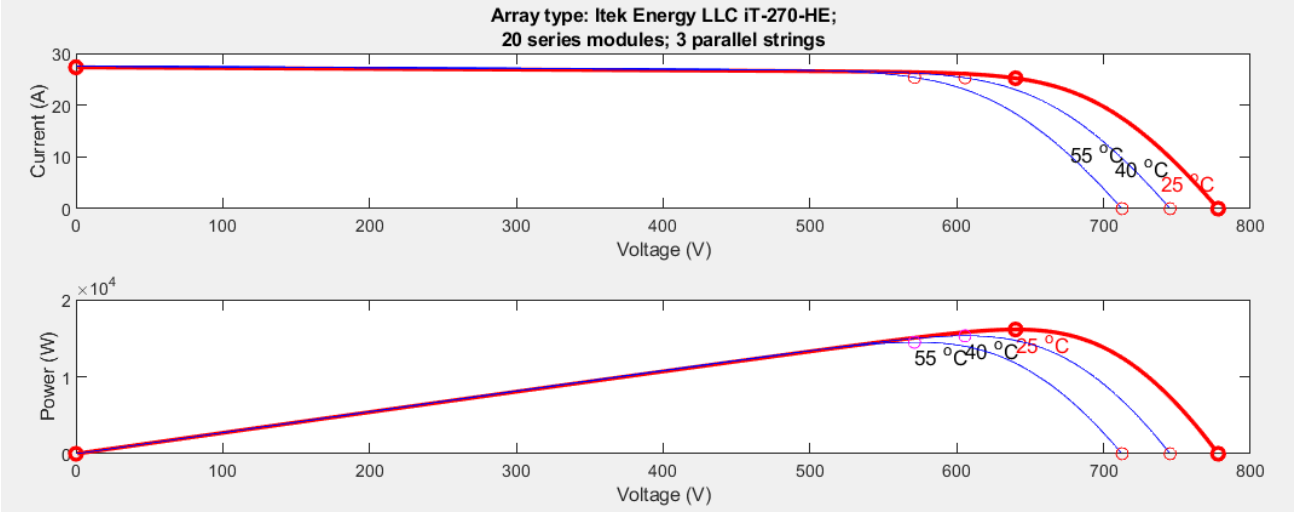


Рис. 7.15. Діаграми взаємозв'язку між струмом і напругою, а також потужністю та напругою досліджуваного фотоелектричного модуля

Аналіз вольт-амперних характеристик (ВАХ) сонячних панелей демонструє критичний вплив температури на ефективність перетворення сонячної енергії. Зі зростанням температури спостерігається зменшення напруги холостого ходу (Voc), що становить приблизно -0,33% на кожен градус Цельсія для кристалічного кремнію.

Струм короткого замикання (Isc) навпаки незначно збільшується з підвищенням температури на +0,05% за градус, проте цей приріст не компенсує втрати напруги. Результуючим ефектом є зниження максимальної потужності панелі приблизно на 0,4-0,5% за кожен градус підвищення температури понад стандартні тестові умови (25°C).

Оптимальна робоча точка (MPP - Maximum Power Point) зміщується в область нижчих напруг при вищих температурах. Це потребує адаптивного налаштування MPPT-алгоритмів для забезпечення максимального енергозбору за різних температурних режимів.

Коефіцієнт заповнення (Fill Factor), що характеризує форму ВАХ, також погіршується при підвищенні температури через зростання внутрішнього опору напівпровідникових переходів. Типові значення FF становлять 75-85% для якісних панелей за стандартних умов.

Температурні залежності критично важливі для проектування систем охолодження та вибору оптимальних робочих режимів фотоелектричних установок, особливо в регіонах із високими літніми температурами.

Діаграми взаємозв'язку між струмом і напругою, а також потужністю та напругою аналізованого фотоелектричного модуля за варіативних рівнів інтенсивності сонячного випромінювання при сталій температурі зображено на рисунку 7.16.

Дослідження впливу освітленості на характеристики сонячних панелей виявляє лінійну залежність струму короткого замикання від рівня сонячної радіації. При зменшенні освітленості з 1000 Вт/м² до 200 Вт/м² струм пропорційно знижується в п'ять разів, що відображає пряму кореляцію між кількістю фотонів і генерованими носіями заряду.

Напруга холостого ходу демонструє логарифмічну залежність від інтенсивності випромінювання. Зниження освітленості призводить до менш значного падіння напруги порівняно зі струмом - при зменшенні освітленості в п'ять разів напруга знижується лише на 10-15%.

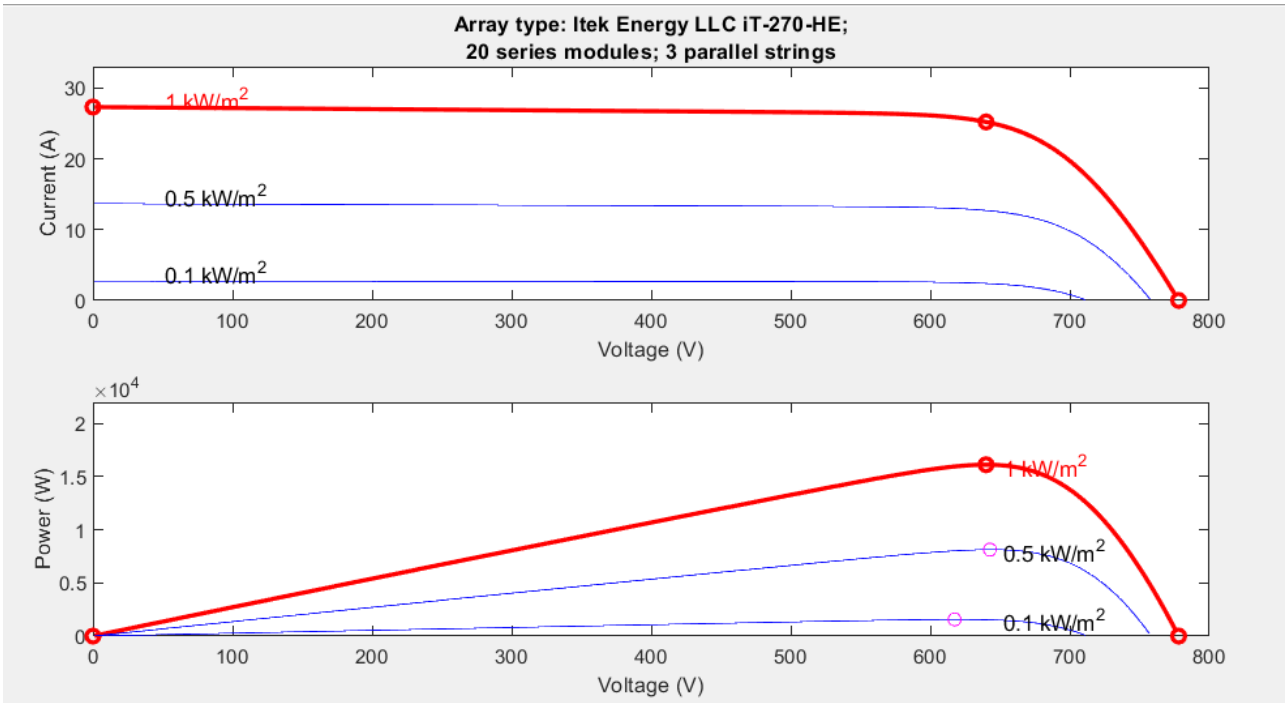


Рис. 7.16. Графіки роботи при постійній температурі

Максимальна потужність панелі майже лінійно залежить від рівня сонячної радіації. Стандартні тестові умови (STC) передбачають освітленість 1000 Вт/м², температуру 25°C та спектральний розподіл AM1.5. За реальних умов експлуатації освітленість коливається від 100-200 Вт/м² у хмарну погоду до 1200-1400 Вт/м² в ясні дні.

Коефіцієнт заповнення зменшується при низьких рівнях освітленості через зростання впливу опорів витоку та рекомбінаційних втрат. Це особливо критично для роботи панелей у розсіяному світлі або в ранкові/вечірні години.

MPPT-контролери повинні враховувати ці характеристики для ефективного відслідковування оптимальної робочої точки за змінних умов освітлення протягом доби та різних погодних умов.

Результати моделювання приведені на рис. 7.17.

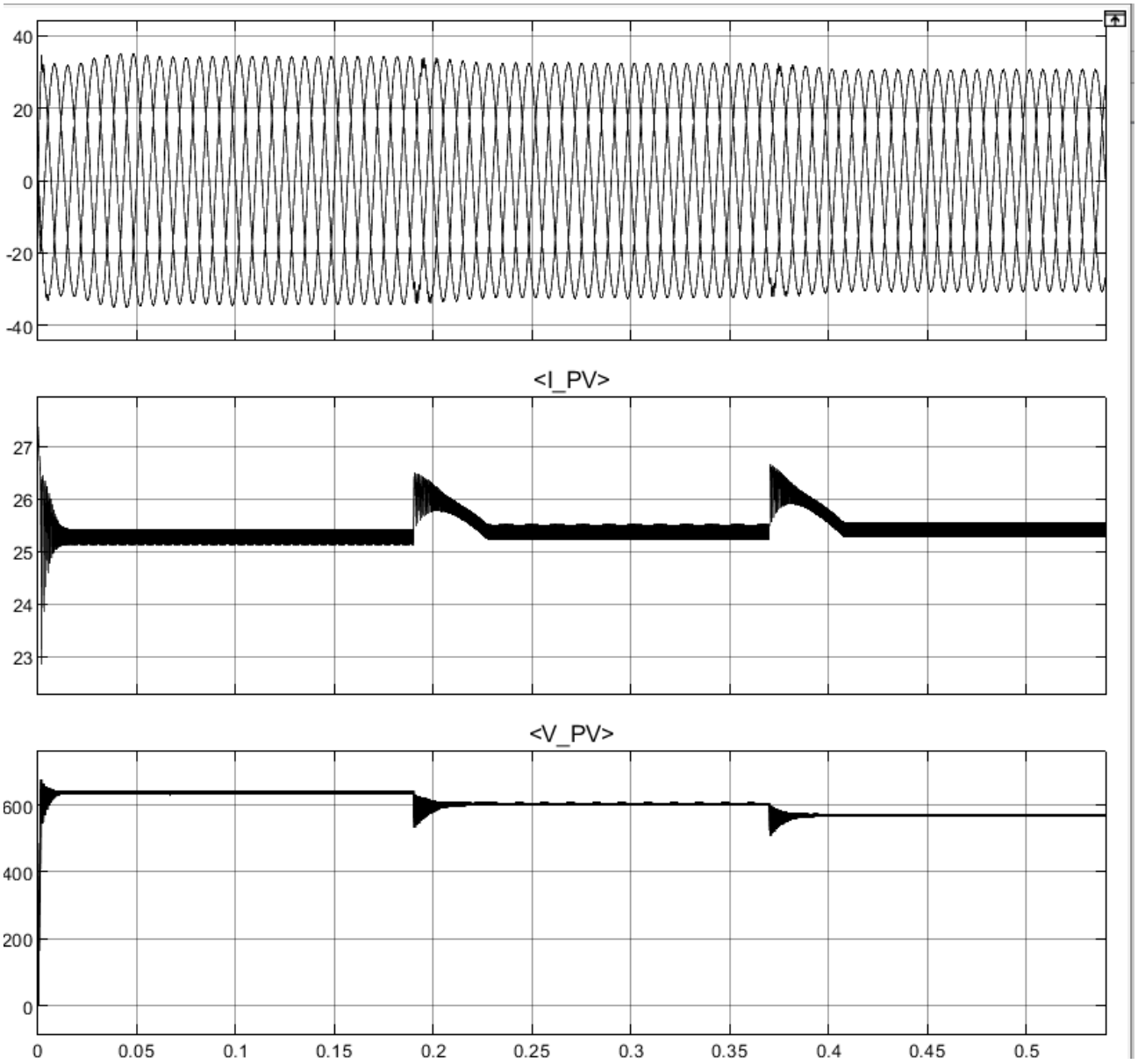


Рис. 7.17. Результати комп’ютерного моделювання сонячної електростанції

Струм, що передається до електромережі, має синусоїдальну форму, а за температурних коливань система управління визначає оновлені параметри напруги для забезпечення максимального енергозбору.

Здійснений аналіз продемонстрував, що в усіх експлуатаційних режимах коефіцієнт гармонічних спотворень становить 2,6%, що повністю задовольняє нормативні вимоги щодо якості електричної енергії.

Досягнення такого низького рівня КГС свідчить про високу ефективність застосованих алгоритмів широтно-імпульсної модуляції в інверторі. Міжнародні

стандарти IEEE 519 та IEC 61727 встановлюють граничне значення КГС на рівні 5% для мережевих інверторів, тому отримані 2,6% демонструють значний запас якості.

Адаптивні MPPT-алгоритми забезпечують швидке реагування на зміни температурних умов, використовуючи методи градієнтного пошуку або нечіткої логіки. Типовий час відслідковування нової оптимальної точки становить 0,1-1 секунда залежно від швидкості зміни параметрів навколишнього середовища.

Синусоїдальність вихідного струму досягається завдяки застосуванню багаторівневих інверторних топологій або високочастотної ШІМ з частотою комутації 10-20 кГц. Це мінімізує вищі гармоніки та забезпечує електромагнітну сумісність із мережевим обладнанням.

Контроль якості електроенергії також включає моніторинг коефіцієнта потужності, який повинен перевищувати 0,9 для забезпечення ефективного використання мережевої інфраструктури та мінімізації реактивних втрат.

ВИСНОВКИ

Дана робота була присвячена розв'язанню завдання проектування комплексної системи енергозабезпечення для цементного виробництва.

У процесі виконання проекту було здійснено детальний аналіз електричних навантажень підприємства. Проведено обчислення основних параметрів графіків споживання електроенергії, що дозволило визначити пікові та базові режими роботи обладнання. Особлива увага приділялась дослідженню режимів реактивної потужності, оскільки цементні заводи характеризуються значним споживанням реактивної енергії через наявність великої кількості асинхронних двигунів та трансформаторів.

Додатково виконано комплексний аналіз можливих режимів короткого замикання в електричній мережі підприємства. Ці розрахунки є критично важливими для правильного вибору комутаційного обладнання та налаштування релейного захисту.

На підставі отриманих розрахунків було здійснено обґрунтований вибір всіх компонентів високовольтної електричної мережі виробництва.

Створена таким способом система електричного живлення повністю задовольняє ключові технічні критерії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електротехнічні системи електроспоживання : / П. Г. Плєшков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.

2. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с.

3. Електропостачання: підручник / П. О. Василега. – Суми: СДУ, 2019. – 521 с.

4. Перехідні процеси в системах електропостачання / Г. Г. Півняк, В. Н. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен та ін. – Дніпропетровськ : Вид-во НГА України, 2000. – 378 с.

5. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування : навчальний посібник / В. Г. Рудницький. – Суми : Університетська книга, 2006. –153 с.