

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Розробка системи електропостачання
виробничих потужностей об'єкта харчової
промисловості (м'ясопереробний напрям)»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ-23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Михайло СЛЕПЧЕНКО

«____» _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Валентин СОЛДАТЕНКО

«____» _____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

Слепченка Михайла Петровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання виробничих потужностей об'єкта харчової промисловості (м'ясопереробний напрям)

Development of a power supply system for production facilities of a food industry facility (meat processing area)

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

3. Строк подання роботи до захисту 01.06.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Метою роботи є розроблення системи електропостачання виробничих потужностей об'єкта харчової промисловості. Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:
1. Провести розрахунок електричних навантажень. 2. Провести розрахунок картограми електричних навантажень. 3. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання. 4. Провести розрахунок режимів реактивної потужності системи електропостачання. 5. Здійснити вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства. 6. Провести розрахунок струмів коротких замкнень та здійснити вибір високовольтного обладнання. 7. Провести розрахунок спеціального розділу роботи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>13.04-20.04</i>	
2	<i>Картограма електричних навантажень</i>	<i>21.04-25.04</i>	
3	<i>Техніко-економічне обґрунтування вибору схем електропостачання</i>	<i>26.04-01.05</i>	
4	<i>Режими реактивної потужності системи електропостачання</i>	<i>02.05-08.05</i>	
5	<i>Вибір кількості та потужності трансформаторів підприємства</i>	<i>09.05-11.05</i>	
6	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень та вибір високовольтного обладнання</i>	<i>12.05-18.05</i>	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>19.05-25.05</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>26.05-28.05</i>	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>29.05-31.05</i>	

Дата видачі завдання
«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Михайло СЛЕПЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 78 с.; 17 рис.; 23 табл.; 5 джерел

Слепченко М. П. Розробка системи електропостачання виробничих потужностей об'єкта харчової промисловості (м'ясопереробний напрям). – Рукопис.

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

Кваліфікаційна робота присвячена розробці надійної інфраструктури живлення харчового підприємства. Проведено комплексні обчислення електричних потреб об'єкта, сформовано відповідні часові діаграми споживання. Детальний аналіз балансу реактивних потужностей та моделювання струмів короткого замикання дозволили обґрунтувати підбір високовольної апаратури. Запроєктована схема електропостачання повністю відповідає ключовим вимогам безперебійності, економічної рентабельності та експлуатаційної гнучкості.

Окремим завданням стало створення імітаційної макромоделі автономної сонячної електростанції (1,92 кВт) використовуючи функціонал платформи MATLAB/Simulink. Впровадження алгоритму IC MPPT гарантувало ефективну генерацію за нестабільної інсоляції. Застосування синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції для інвертора забезпечило відмінну якість змінного струму. Результати тестування динамічним подвоєнням активного навантаження (1045–2090 Вт) підтвердили високу стійкість комплексу: напруга залишилася номінальною без значних просядок. Дослідження доводить можливість використання таких установок під час знеструмлень та ефективність Simulink для моделювання зеленої енергетики.

Ключові слова: електричні навантаження, схема живлення, імітаційне моделювання фотоелектричної системи

ABSTRACT

Qualification work: 78 p.; 17 Fig.; 23 tables; 5 sources

Slepchenko M. Development of a power supply system for production facilities of a food industry facility (meat processing area). – Manuscript.

Bachelor's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The qualification work is devoted to the development of a reliable power supply infrastructure for a food enterprise. Comprehensive calculations of the facility's electrical needs were carried out, and corresponding time diagrams of consumption were formed. A detailed analysis of the reactive power balance and modeling of short-circuit currents allowed us to justify the selection of high-voltage equipment. The designed power supply scheme fully meets the key requirements of continuity, economic profitability and operational flexibility.

A separate task was to create a simulation macromodel of an autonomous solar power plant (1.92 kW) using the functionality of the MATLAB/Simulink platform. The implementation of the IC MPPT algorithm guaranteed efficient generation under unstable insolation. The use of sinusoidal pulse-width modulation for the inverter ensured excellent AC quality. The results of testing with dynamic doubling of the active load (1045–2090 W) confirmed the high stability of the complex: the voltage remained nominal without significant drops. The study proves the possibility of using such installations during power outages and the effectiveness of Simulink for modeling green energy.

Keywords: electrical loads, power supply circuit, photovoltaic system simulation

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	8
1.1 Силові електричні навантаження в мережі напругою до 1 кВ.....	9
1.2 Освітлювальні навантаження	11
1.3 Електричні навантаження в силових мережах вище 1 кВ	12
1.4 Графіки електричних навантажень	18
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	23
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	25
3.1 Варіанти підключення підприємства до зовнішніх джерел	25
3.2 Схема внутрішнього електропостачання підприємства	30
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	31
4.1 Калькуляція балансу реактивної потужності.....	32
4.2 Визначення оптимальних параметрів і просторової локалізації апаратури компенсації	34
4.3 Розрахунок витрат на компенсацію реактивної потужності	35
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	38
РОЗДІЛ 6. ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ПІДБІР ВИСОКОВОЛЬТНОЇ АПАРАТУРИ	40
6.1 Аналіз струмів короткого замикання.....	40
6.2 Підбір струмопровідних магістралей 10 кВ.....	49
6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги.....	51
6.4 Визначення робочих параметрів і схеми підключення трансформаторів власних потреб	52
РОЗДІЛ 7. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ КОМПЛЕКСІВ У СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK.....	54
7.1 Застосування програмного комплексу MATLAB/SIMULINK для дослідження сонячних енергосистем	54
7.2 Симуляційне відтворення роботи напівпровідникового генератора з контролером відстеження максимальної потужності (MPPT).....	59
7.3 Математичне та комп'ютерне моделювання підсистеми інвертування в середовищі MATLAB/Simulink	66
7.4 Імітаційне дослідження динаміки енергосистеми за умов комутації активного споживача	71
ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Слепченко М.П.			Розробка системи електропостачання виробничих потужностей об'єкта харчової промисловості (м'ясопереробний напрям) Development of a power supply system for production facilities of a food industry facility (meat processing area)	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		Солдатенко В.П.					6	78
Н. контр.		Солдатенко В.П.				ЦНТУ гр. ЕЕ-23мб		
Затвер.		Плещиков П.Г.						

ВСТУП

М'ясопереробний сектор виступає одним із ключових напрямків вітчизняної індустрії харчування. Заводи цього профілю відіграють надзвичайно вагомую функцію, постачаючи споживачам першосортні ковбаси та різноманітні м'ясні делікатеси. Разом із тим, виготовлення подібної продукції потребує колосального споживання енергоресурсів, а особливо – електрики. Саме тому розробка безперебійних і продуктивних електромереж для таких об'єктів стає вкрай нагальною проблемою.

Критерії живлення подібних промислових комплексів формуються на основі технологічних особливостей, присутності значної кількості енергоємних установок, а також потреби у гарантуванні стабільної подачі струму найвищих стандартів. Зазначене зумовлює необхідність детального планування електромереж, зважаючи на графіки функціонування, тип споживаної потужності, суворі правила пожежної й електричної безпеки, включно з раціональним підбором комплектуючих деталей і оптимальних схем.

Головним завданням цього дипломного дослідження виступає створення захищеної, економної та стабільної інфраструктури живлення м'ясокомбінату шляхом впровадження передових інженерних розробок. Щоб реалізувати вказану ціль, потрібно виконати наступні кроки: дослідити особливості енергоспоживання м'ясних цехів, обчислити параметри силових навантажень та підібрати раціональні варіанти підключення. Крім того, слід сформулювати проект освітлювальних і силових контурів, визначитися з апаратурою для зниження реактивних втрат, розробити надійний контур заземлення, а також оцінити фінансову вигоду й експлуатаційну надійність.

Грамотне втілення запропонованих розрахунків, за умови слідування діючим технічним нормам, гарантуватиме вигідне й безпечне забезпечення заводу струмом, що позитивно вплине на результативність випуску товарів та їхні споживчі властивості.

						Ар.
						7

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Визначення споживаної потужності виступає ключовою стадією розробки будь-яких електромереж. Грамотне проведення таких обчислень гарантує стабільне функціонування апаратури та захист від аварій.

Щоб знайти значення силового споживання, формують перелік наявних струмоприймачів (нагрівальних елементів, моторів, перетворювачів напруги тощо) із зазначенням номінальних параметрів. Далі встановлюють індивідуальні показники використання (відсоток періоду функціонування під максимальним навантаженням). Очікувану споживану величину знаходять додаванням результатів множення паспортної потужності на відповідний показник використання окремо взятого пристрою, обов'язково беручи до уваги фактор одночасності (ймовірність паралельного включення кількох агрегатів).

Обчислення потреб мережі штучного світла базується на інформації про площу робочих приміщень. Відповідно до чинних промислових стандартів встановлюються нормативні рівні освітленості конкретних ділянок. Обравши оптимальні освітлювальні прилади (зважаючи на генеруємий світловий потік та вати), за допомогою методу питомої потужності знаходять потрібну кількість ламп, здатну забезпечити задані умови.

Оцінка високовольтного енергоспоживання передбачає аналіз відповідних установок (великогабаритних електропечей, продуктивних електродвигунів). Сумарну потребу таких апаратів розраховують, спираючись на їхні експлуатаційні характеристики, робочі цикли, а також закладаючи запас на випадок пікових стрибків струму.

Завершивши вказані вище етапи, підсумовують глобальну енергетичну потребу об'єкта. Цей фінальний показник стане базою для подальшого підбору провідників, комутаційних апаратів і захисного обладнання, гарантуючи тим самим безвідмовну експлуатацію всього виробничого комплексу.

Нижче наведено детальні калькуляції параметрів силових, освітлювальних і високовольтних мереж.

						8

1.1 Силові електричні навантаження в мережі напругою до 1 кВ

Нижче продемонстровано процес обчислення силових потреб ремонтно-механічного цеху при підключенні до низьковольтних ліній до 1 кВ.

$$m = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{57,48}{4,55} = 12,63 \approx 13$$

$$P_{зм} = P_{сум} \cdot K_B = 1909,24 \cdot 0,3828 = 730,86 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 730,86 \cdot 1,18 = 862,41 \text{ квар}$$

$$n_e = \frac{2 \cdot P_{сум}}{P_{max}} = \frac{2 \cdot 1909,24}{57,48} = 66,43 \approx 66$$

Спираючись на довідкові матеріали [1], приймаємо коефіцієнт $K_p = 1,17$.

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 730,86 \cdot 1,17 = 855,11 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 862,41 \text{ квар}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{855,11^2 + 862,41^2} = 1214,48 \text{ кВА}$$

Застосовуючи аналогічний математичний алгоритм було визначено величину навантаження для решти виробничих структурних одиниць підприємства. Знайдені величини повністю приведені в таблиці 1.1.

						9

Таблиця 1.1. Силкові електричні навантаження до 1 кВ підрозділів підприємства

№	Назва цеху	N _{спож} шт	P _{одн.сп.}		P _{сум.} кВт	m	K _в	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		n _{еф}	K _р	Розрах. навант.		
			min	max						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
1	Ковбасний виробничий підрозділ	101	4,55	55,7	2838,2	12,2	0,6	0,8	0,8	1702,89	1277,17	101	1,1	1833,35	1277,17	2234,36
2	Дільниця пакування та тари	21	1,52	18,7	355,72	12,3	0,3	0,7	1	106,72	108,87	21	1,4	149,44	108,87	184,89
3	Камера охолодження №1	29	10,1	202	2418,7	20	0,8	0,8	0,8	1934,94	1451,21	24	1	1934,94	1451,21	2418,68
4	Відділення забою та обвалки	101	11,1	253	2926,7	22,7	0,6	0,8	0,8	1756,02	1317,02	23	1,2	2065,39	1317,02	2449,57
5	Сховище готової продукції №1	21	5,06	18,7	106,26	3,7	0,5	0,8	0,8	53,13	39,84	11	1,4	72,07	39,84	82,36
6	Відділ переробки субпродуктів	51	10,1	202	3015,8	20	0,6	0,8	0,8	1809,46	1357,09	30	1,2	2083,3	1357,09	2486,33
7	Дільниця м'ясокісткового борошна	30	3,04	75,9	1521	25	0,6	0,8	0,8	912,62	684,47	30	1,2	1050,74	684,47	1254,01
8	Блок заморожування №2	29	7,59	30,4	595,56	4	0,8	0,8	0,8	476,45	357,34	29	1	476,45	357,34	595,56
9	Компресорно-конденсаторне відділення	31	7,59	15,2	361,79	2	0,6	0,7	1	217,07	221,46	31	1,2	249,32	221,46	333,46
10	Адміністративний корпус підприємства	51	1,77	15,2	426,56	8,6	0,7	0,8	0,8	298,59	223,94	51	1,1	321,99	223,94	392,22
11	Комплекс очисних споруд	27	3,04	15,2	230,74	5	0,6	0,7	1	138,44	141,23	27	1,2	160,7	141,23	213,94
12	Електротехнічна майстерня	19	5,06	15,2	146,74	3	0,3	0,7	1	44,02	44,91	19	1,4	62,69	44,91	77,12
13	Камера охолодження №3	53	7,59	101	523,71	13,3	0,8	0,8	0,8	418,97	314,23	10	1	418,97	345,65	543,15
14	Ремонтно-механічний цех	126	4,55	57,5	1909,2	12,6	0,4	0,65	1,2	730,86	862,41	66	1,2	855,11	862,41	1214,48
15	Теплогенераторний пункт	51	5,06	25,3	1219,5	5	0,5	0,7	1	609,73	622,05	51	1,2	699,42	622,05	936,02
16	Слюсарно-ремонтна зона	31	11,1	27,3	200,38	2,5	0,2	0,65	1,2	40,08	46,86	31	1,4	57,36	46,86	74,07
17	Дільниця санітарної обробки спецодягу	9	5,06	41,5	187,22	8,2	0,7	0,85	0,6	131,05	81,22	9	1,2	159,21	89,35	182,56
18	Транспортний підрозділ	11	5,06	27,3	108,28	5,4	0,3	0,65	1,2	32,49	37,98	8	1,7	55,65	41,78	69,59
19	Відділ ветеринарно-санітарного контролю №1	31	5,06	18,2	285,38	3,6	0,5	0,7	1	142,69	145,58	31	1,2	170,49	145,58	224,19
20	Лабораторія якості м'яса №2	19	1,52	7,59	52,12	5	0,5	0,7	1	26,06	26,59	14	1,3	34,1	26,59	43,24
21	Сховище матеріалів №2	17	2,53	5,06	53,13	2	0,7	0,8	0,8	37,19	27,89	17	1,2	42,65	27,89	50,95
22	Пункт приймання тварин №1	27	3,04	7,59	48,58	2,5	0,8	0,8	0,8	38,86	29,15	27	1	38,86	29,15	48,58
Σ	Загалом по підприємству	886	-	-	19531	-	-	-	-	11658,3	9415,05	-	-	12371,7	9415,05	15546,77

1.2 Освітлювальні навантаження

Нижче розраховано енергетичну потребу світильників ковбасного виробничого підрозділу, яка базується на наступних вихідних параметрах:

$$F = 4170 \text{ м}^2, p_0 = 12,1 \text{ Вт/м}^2,$$

$$K_n = 0,96, K_1 = 1,2,$$

$$\cos \varphi = 0,89, \operatorname{tg} \varphi = 0,512.$$

Сумарний номінал підключених приладів:

$$P_{\text{вст}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 4170 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3} = 50,46 \text{ кВт}$$

$$P_p = K_n \cdot K_1 \cdot P_{\text{вст}} = 0,96 \cdot 1,2 \cdot 50,46 = 58,13 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 58,13 \cdot 0,512 = 29,76 \text{ квар}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{58,13^2 + 29,76^2} = 65,31 \text{ кВА}$$

Щодо решти структурних частин заводу, подібні математичні операції систематизовано у таблиці 1.2.

						11

Таблиця 1.2. Розрахунок освітлювальних навантажень

№	Назва цеху	F , м ²	p_0 , Вт/м ²	$P_{\text{вст}}$, кВт	$K_{\text{п}}$	K_1	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{р}}$, кВт	$Q_{\text{р}}$, квар	$S_{\text{р}}$, кВА
1	Ковбасний виробничий підрозділ	4170	12,1	50,46	1	1,2	0,89	0,51	58,13	29,76	65,31
2	Дільниця пакування та тари	1737	12,1	21,02	1	1,2	0,89	0,51	24,21	12,4	27,2
3	Камера охолодження №1	3027	10,1	30,57	0,6	1,2	0,89	0,51	22,38	11,46	25,14
4	Відділення забою та обвалки	905	12,1	10,95	0,9	1,2	0,89	0,51	12,35	6,32	13,88
5	Сховище готової продукції №1	1191	6,1	7,27	0,6	1,2	0,89	0,51	5,15	2,64	5,79
6	Відділ переробки субпродуктів	1098	12,1	13,29	1	1,2	0,89	0,51	15,15	7,76	17,02
7	Дільниця м'ясокісткового борошна	1737	10,1	17,54	1	1,2	0,89	0,51	20	10,24	22,47
8	Блок заморожування №2	922	6,1	5,62	0,6	1,2	0,89	0,51	4,05	2,07	4,55
9	Компресорно-конденсаторне відділення	736	8,1	5,96	1	1,2	0,89	0,51	6,79	3,48	7,63
10	Адміністративний корпус підприємства	2413	18,1	43,68	0,8	1,2	0,89	0,51	41,93	21,47	47,11
11	Комплекс очисних споруд	766	10,1	7,74	1	1,2	0,89	0,51	8,82	4,52	9,91
12	Електротехнічна майстерня	1299	12,1	15,72	0,9	1,2	0,89	0,51	16,03	8,21	18,01
13	Камера охолодження №3	696	10,1	7,03	0,6	1,2	0,89	0,51	5,06	2,59	5,68
14	Ремонтно-механічний цех	694	10,1	7,01	1	1,2	0,89	0,51	7,99	4,09	8,98
15	Теплогенераторний пункт	773	8,1	6,26	1	1,2	0,89	0,51	7,14	3,66	8,02
16	Слюсарно-ремонтна зона	772	12,1	9,34	0,9	1,2	0,89	0,51	9,53	4,88	10,71
17	Дільниця санітарної обробки спецодягу	422	10,1	4,26	0,9	1,2	0,89	0,51	4,35	2,23	4,89
18	Транспортний підрозділ	3911	0,48	1,88	1	1,1	0,51	1,69	2,11	3,56	4,14
19	Відділ ветеринарно-санітарного контролю №1	777	18,1	14,06	0,8	1,2	0,89	0,51	13,5	6,91	15,16
20	Лабораторія якості м'яса №2	1128	18,1	20,42	0,8	1,2	0,89	0,51	19,6	10,04	22,02
21	Сховище матеріалів №2	779	6,1	4,75	0,6	1,2	0,89	0,51	3,42	1,75	3,84
22	Пункт приймання тварин №1	2620	8,1	21,22	1	1,2	0,89	0,51	24,19	12,39	27,17
23	Пункт приймання тварин №2	2606	8,1	21,11	0,6	1,2	0,89	0,51	15,2	7,78	17,08
24	Зовнішня територія комбінату	206952	0,21	43,46	1	1,1	0,51	1,69	48,68	82,12	95,46
Σ	Загалом по підприємству	-	-	390,6	-	-	-	-	395,8	262,3	474,8

1.3 Електричні навантаження в силових мережах вище 1 кВ

Наступним етапом стало обчислення енергоспоживання ліній, напруга яких перевищує 1 кВ. Отримані підсумки цих калькуляцій зведено у таблицю 1.3. Виконуючи математичні операції взято до уваги обсяги втрат всередині трансформаторних установок, а також показники генерування реактивної потужності компенсуючими пристроями.

Таблиця 1.3. Результати розрахунку електричних навантажень вище 1 кВ

Назва	$N_{\text{спож}}$ шт	$P_{\text{одн.сп.}}$		$P_{\text{сум.}}$ кВт	m	K_v	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	Сер. зм. нав.		$n_{\text{сф}}$	K_p	Розрах. навантаж.		
		мін, кВт	маж, кВт						$P_{\text{зм.}}$, кВт	$Q_{\text{зм.}}$, квар			$P_{\text{розр.}}$, кВт	$Q_{\text{розр.}}$, квар	$S_{\text{розр.}}$, кВА
Підстанції 1, 2, 3															
Ковбасний виробничий підрозділ															
силове:	101	4,55	55,7	2838,2	12,2	0,6	0,8	0,8	1702,89	1277,17	101	1,1	1833,35	1277,17	2234,35
освітлювальне:				50,51									58,19	29,79	
Всього:									1753,4	1277,17			1891,54	1306,96	2299,15
Камера охолодження №1															
силове:	29	10,1	202	2418,7	20	0,8	0,8	0,8	1934,94	1451,21	24	1	1934,94	1451,21	2418,68
освітлювальне:				30,6									22,41	11,48	
Всього:									1965,54	1451,21			1957,35	1462,69	2443,51
Блок заморожування №2															
силове:	29	7,59	30,4	595,56	4	0,8	0,8	0,8	476,45	357,34	29	1	476,45	357,34	595,56
освітлювальне:				5,63									4,05	2,07	
Всього:									482,08	357,34			480,5	359,41	600,04
Всього по Підстанції 1, 2, 3:															
силове:	159	4,55	202	5852,4	44,4	0,7	0,8	0,8	4114,28	3085,72	58	1,1	4410,38	3085,72	5382,66
освітлювальне:				86,74									84,64	43,34	
БК 0,4 кВ										3118,98				3118,98	
Всього по 0,4 кВ Підст. 1, 2, 3:									4201,02	33,26			4495,02	10,08	4495,03
Втрати в трансформаторах:													51,48	268,03	
Кількість Трансформаторів: 6 (1000 кВА)															
Коефіцієнт Завантаження: $K_z = 0,74$															
Всього по 10 кВ Підст. 1, 2, 3:													4546,5	278,11	4555
Підстанції 4, 5, 6															
Дільниця пакування та тари															
силове:	21	1,52	19,2	355,72	12,3	0,3	0,7	1	106,72	108,87	21	1,4	149,44	108,87	184,89
освітлювальне:				21,04									24,24	12,41	
Всього:									127,76	108,87			173,68	121,28	211,83
Відділення забою та обвалки															
силове:	101	11,1	253	2926,7	22,7	0,6	0,8	0,8	1756,02	1317,02	23	1,2	2065,39	1317,02	2449,57
освітлювальне:				10,96									12,37	6,34	

[illegible]

10				

Продовження табл. 1.3

Втрати в трансформаторах:														23,75	124,08	
Кількість трансформаторів: 3 (1000 кВА)																
Коефіцієнт Завантаження: Кз = 0,7																
Всього по 10 кВ Підст, 9, 10:														1835	1229,8	2208,99
Всього по об'єкту																
силове:	886	1,52	253	19531	167	0,6	0,98	0,2	11658,3	2397,34	154	1,1	12371,69	2397,34	12601,82	
освітлювальне:				391,04									396,16	262,58		
Всього:									12049,3	2397,34			12767,85	2659,92	13041,98	
Потужність КП 0,4 кВ:										7017,71				7017,71		
Втрати в трансформаторах:													154,48	806,05		
Всього по об'єкту:													12922,33	3465,97	13379,07	
Високовольтне навантаження																
Синхронні двигуни	2	750	750	1518		0,7	0,91	0,5	1047,42	477,22			1047,42	477,22	1151,01	
Всього високовольтного нав.:													1047,42	477,22	1151,01	
Всього по об'єкту 10 кВ:													13969,75	2988,75	14285,88	
КП 10 кВ:														910,8		
Всього 10 кВ з компенсацією:													13969,75	2077,95	14123,44	

1.4 Графіки електричних навантажень

Графіки електричних навантажень ілюструють динаміку використання енергії протягом певного періоду, будуються для поодиноких приймачів, окремих виробничих ліній або підприємства загалом. Добові графіки фіксують 24-годинні перепади з типовими ранковими або вечірніми максимумами, що зумовлені активністю персоналу та технологічними циклами; тижневі показують розподіл енергоспоживання між робочими змінами та вихідними, де останні зазвичай характеризуються значним спадом; річні демонструють вплив пори року, температурних умов та тривалості інсоляції (наприклад, літнє зниження навантаження через відключення систем обігріву); графіки абсолютних максимумів фіксують пікові значення за конкретний часовий відрізок (місяць, рік).

Дослідження цих кривих дає змогу раціоналізувати алгоритми функціонування мережі, мінімізувати втрати потужності, грамотно скласти розклад профілактичних ремонтів і передбачати майбутні енергетичні потреби. Адекватна оцінка специфіки споживання струму виступає гарантією безперебійної та фінансово вигідної експлуатації всього електрогосподарства підприємства.

Було проведено розрахунки та сформовано побудовано графіки. Отримані результати зведено у табл. 1.4-1.6, а також відображено на рис. 1.1-1.5.

Таблиця 1.4. Відсоткові значення погодинного споживання потужності

№ з/п	Робоч. дні		Вихідні дні		№ з/п	Робоч. дні		Вихідні дні	
	P, %	Q, %	P, %	Q, %		P, %	Q, %	P, %	Q, %
1	76	90	27	55	13	81	90	22	50
2	60	80	27	55	14	92	95	22	50
3	45	67	27	55	15	100	100	22	50
4	45	67	27	55	16	80	89	22	50
5	39	62	27	55	17	60	79	22	50
6	50	68	27	55	18	75	85	22	50
7	45	67	27	55	19	78	85	22	52
8	80	86	27	55	20	78	86	22	52
9	85	92	22	50	21	75	85	27	55
10	98	82	22	50	22	78	86	27	55
11	82	90	22	50	23	82	88	27	55
12	78	86	22	50	24	75	88	27	55

Таблиця 1.5. Показники потужності навантаження відповідно до добових графіків електричних навантажень

№ з/п	Дні зимового періоду						Дні літнього періоду					
	робочі			вихідні			робочі			вихідні		
	P , кВт	Q , квар	S , кВА	P , кВт	Q , квар	S , кВА	P , кВт	Q , квар	S , кВА	P , кВт	Q , квар	S , кВА
1	10471	1864	10636	3770	1130	3936	8901	1585	9040	3204	961	3345
2	8238	1655	8403	3770	1130	3936	7002	1407	7142	3204	961	3345
3	6143	1382	6297	3770	1130	3936	5222	1175	5352	3204	961	3345
4	6143	1382	6297	3770	1130	3936	5222	1175	5352	3204	961	3345
5	5446	1277	5593	3770	1130	3936	4628	1086	4753	3204	961	3345
6	6841	1404	6984	3770	1130	3936	5815	1193	5936	3204	961	3345
7	6143	1382	6297	3770	1130	3936	5222	1175	5352	3204	961	3345
8	11030	1780	11172	3770	1130	3936	9375	1513	9497	3204	961	3345
9	11728	1906	11882	3071	1026	3238	9969	1620	10100	2611	872	2753
10	13543	1696	13649	3071	1026	3238	11512	1442	11602	2611	872	2753
11	11309	1864	11462	3071	1026	3238	9613	1585	9743	2611	872	2753
12	10750	1780	10897	3071	1026	3238	9138	1513	9263	2611	872	2753
13	11169	1864	11324	3071	1026	3238	9494	1585	9625	2611	872	2753
14	12706	1968	12857	3071	1026	3238	10799	1673	10928	2611	872	2753
15	13822	2074	13977	3071	1026	3238	11749	1762	11881	2611	872	2753
16	11030	1843	11183	3071	1026	3238	9375	1567	9505	2611	872	2753
17	8238	1633	8398	3071	1026	3238	7002	1388	7139	2611	872	2753
18	10332	1759	10480	3071	1026	3238	8782	1496	8909	2611	872	2753
19	10750	1759	10893	3071	1068	3252	9138	1496	9260	2611	908	2764
20	10750	1780	10897	3071	1068	3252	9138	1513	9263	2611	908	2764
21	10332	1759	10480	3770	1130	3936	8782	1496	8909	3204	961	3345
22	10750	1780	10897	3770	1130	3936	9138	1513	9263	3204	961	3345
23	11309	1822	11455	3770	1130	3936	9613	1548	9736	3204	961	3345
24	10332	1822	10490	3770	1130	3936	8782	1548	8918	3204	961	3345

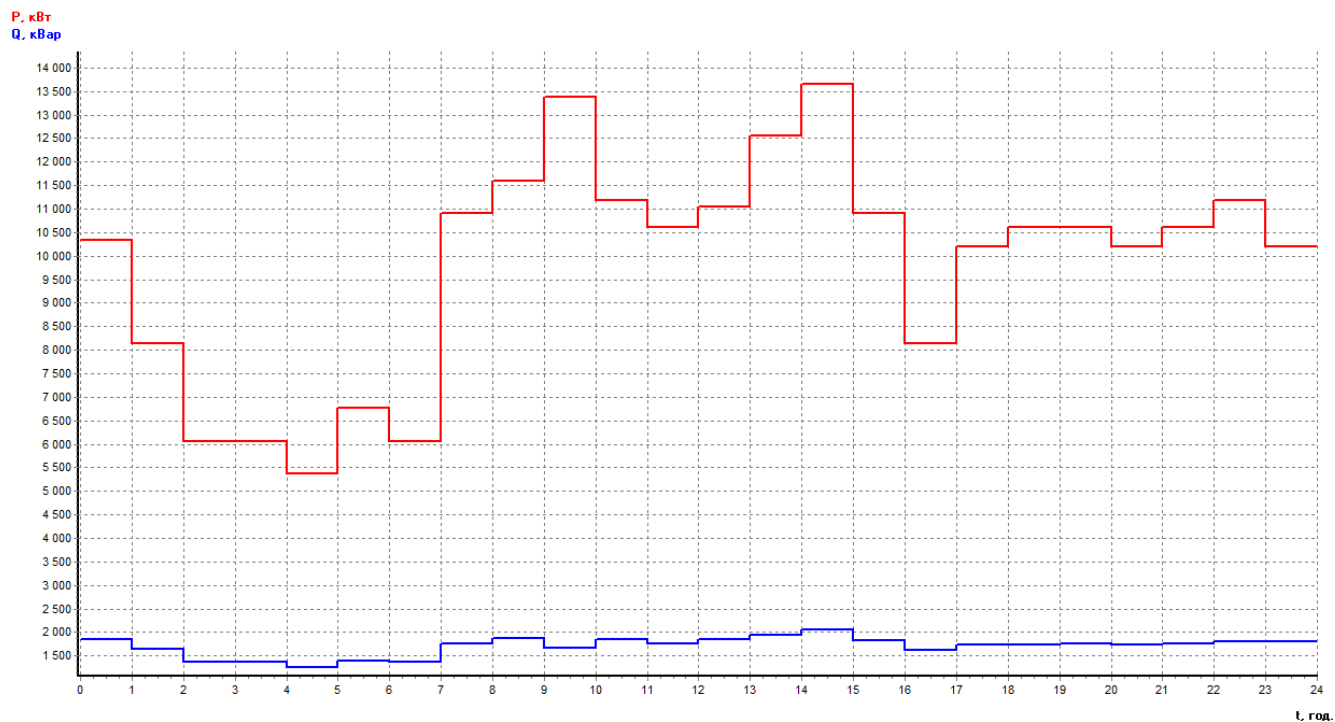


Рис. 1.1. Графік добового навантаження P , Q (зимові робочі дні)

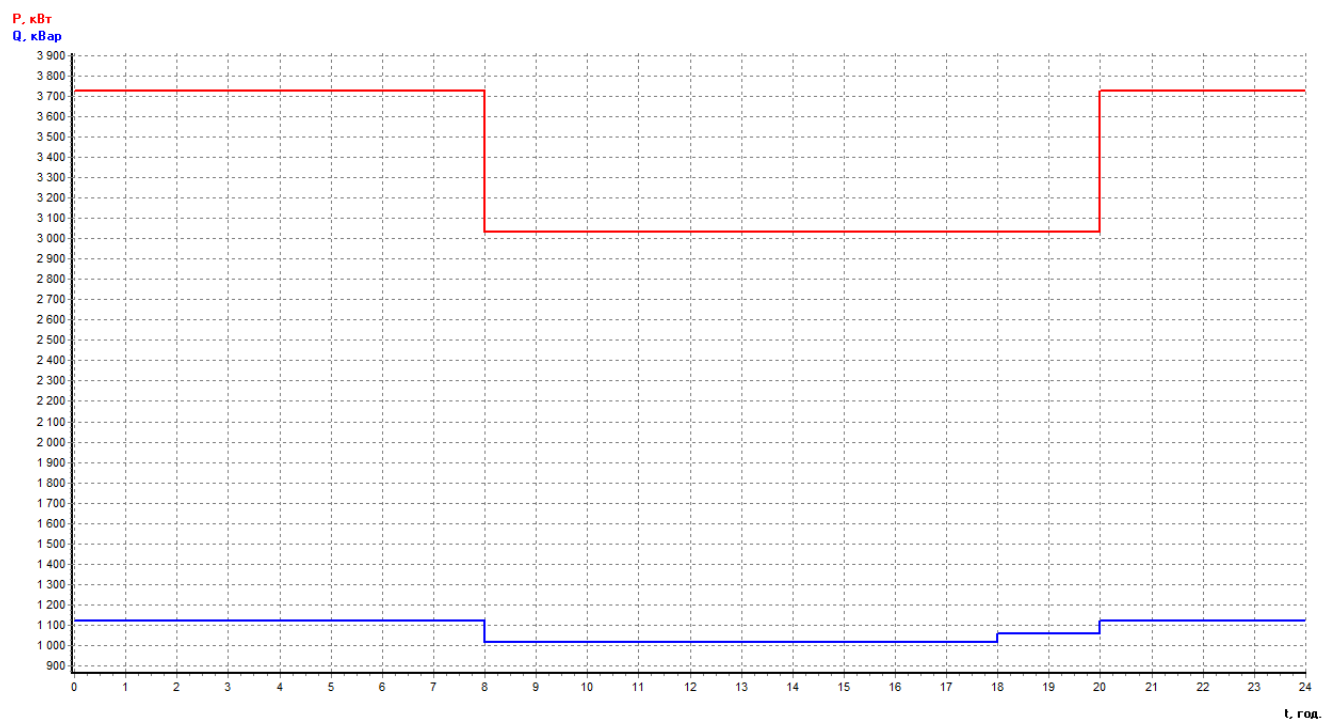


Рис. 1.2. Графік добового навантаження P , Q (зимові вихідні дні)

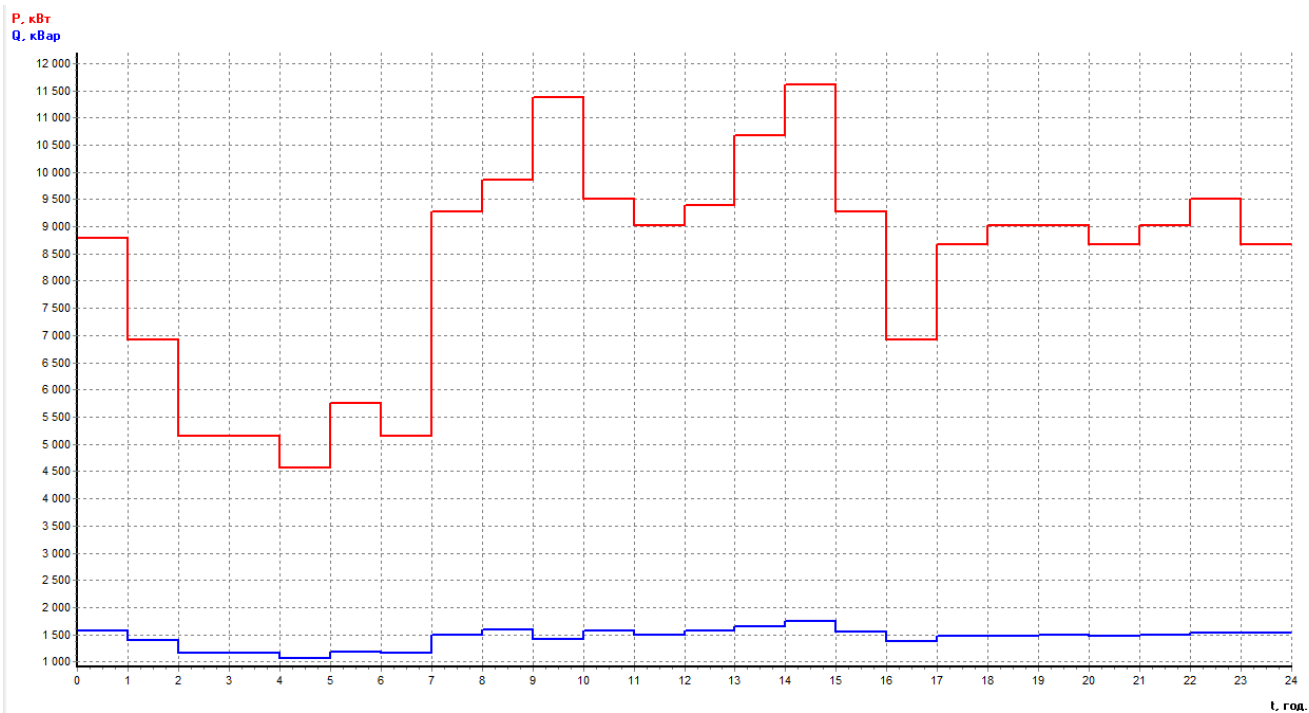


Рис. 1.3. Графік добового навантаження P , Q (літні робочі дні)

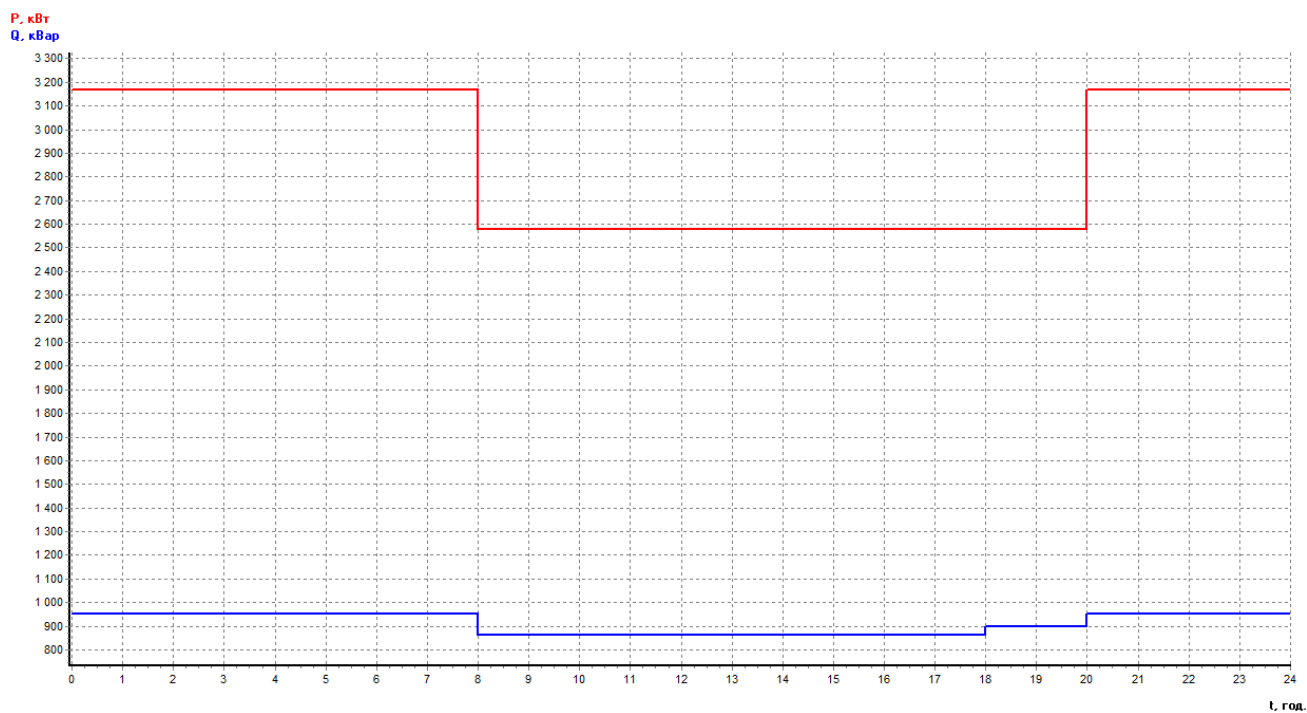


Рис. 1.4. Графік добового навантаження P , Q (літні вихідні дні)

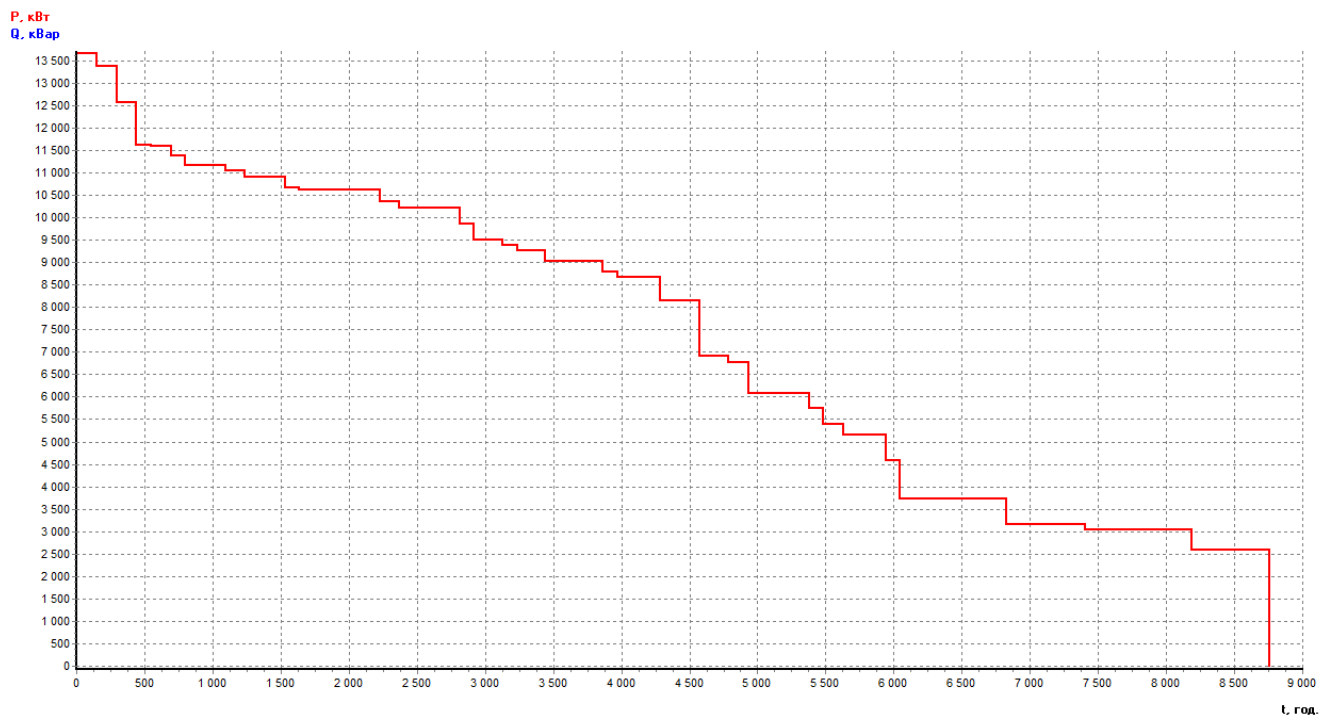


Рис. 1.5. Графік річного активного навантаження за тривалістю

Таблиця 1.6 Розрахункові величини графіків електронавантаження

№	Величина	Значення	Одиниця виміру
1	S_p	14118,00	МВА
2	$W_{з.р.}$	35177628	кВт·год
3	$V_{з.р.}$	6061538	квар·год
4	$W_{з.в.}$	5336074	кВт·год
5	$V_{з.в.}$	1687520	квар·год
6	$W_{л.р.}$	21358260	кВт·год
7	$V_{л.р.}$	3680528	квар·год
8	$W_{л.в.}$	3349412	кВт·год
9	$V_{л.в.}$	1059637	квар·год
10	W_p	65221374	кВт·год
11	V_p	12489223	квар·год
12	T_m	4760,112	год
13	τ_m	3131,797	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Картограма електричного споживання являє собою візуальну модель географічного розташування потужностей у межах промислового об'єкта. Даний інструмент чітко демонструє щільність енергоспоживання та допомагає об'єктивно проаналізувати скупчення струмоприймачів. Завдяки цьому значно спрощується процес проектування електромереж, вибір локацій для трансформаторних вузлів та трасування кабельних магістралей.

Обчислення здійснювалися за методикою, наведеною у фаховій літературі [1]. Процес формування відповідної схеми наочно продемонстровано нижче (за основу взято показники Ковбасного виробничого підрозділу):

$$R = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{P_{\text{р.сил.1}} + P_{\text{р.осв.1}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{1833,35 + 58,19}{3,14 \cdot 0,7}} = 29,34 \text{ мм}$$

$$\alpha = \frac{P_{\text{р.осв.1}} \cdot 360^\circ}{P_1} = \frac{58,19 \cdot 360^\circ}{1891,54} = 11,07^\circ$$

Підсумки математичних операцій щодо решти структурних одиниць комбінату систематизовано всередині таблиці 2.1.

Просторовий фокус сумарного енергоспоживання володіє наступними координатами:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{4145956,12}{14435,53} = 287,2 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{1881410,63}{14435,53} = 130,3 \text{ м}$$

Отже, обчислені геометричні параметри головного енергоцентру ($X = 287$ м, $Y = 130$ м) збіглися з прямою забудови існуючого корпусу. Зважаючи на вказану обставину, інженерами було ухвалено постанову про перенесення головного комутаційного щита ближче до джерела вхідної напруги.

Таблиця 2.1. Розрахункові показники для побудови картограми навантажень

№ п/п	Підрозділ	$P_{P, \text{сил}}, \text{кВт}$	$P_{P, \text{осв}}, \text{кВт}$	$P_P, \text{кВт}$	m	$R, \text{мм}$	$\alpha, ^\circ$	$X, \text{м}$	$Y, \text{м}$	$P^*X, \text{кВт}^*\text{м}$	$P^*Y, \text{кВт}^*\text{м}$
1	Ковбасний виробничий підрозділ	1833,35	58,19	1891,54	0,7	29,34	11,07	206	77	389657,24	145648,58
2	Дільниця пакування тари	149,44	24,24	173,68	0,7	8,89	50,24	471	118	81803,28	20494,24
3	Камера охолодження №1	1934,94	22,41	1957,35	0,7	29,84	4,12	259	72	506953,65	140929,20
4	Відділення забою та обвалки	2065,39	12,37	2077,76	0,7	30,74	2,14	347	78	720982,72	162065,28
5	Сховище готової продукції №1	72,07	5,15	77,22	0,7	5,93	24,01	420	39	32432,40	3011,58
6	Відділ переробки субпродуктів	2083,30	15,16	2098,46	0,7	30,90	2,60	418	86	877156,28	180467,56
7	Дільниця м'ясокісткового борошна	1050,74	20,02	1070,76	0,7	22,07	6,73	434	175	464709,84	187383,00
8	Блок заморожування №2										
	- 0,38 кВ	476,45	04,05	480,50	0,7	14,78	03,03	218	150	104749,00	72075,00
	- СД (10 кВ)	1047,42	0,00	1047,42	0,7	21,82	0,00	199	145	208436,58	151875,90
9	Компресорно-конденсаторне відділення	249,32	6,81	256,13	0,7	10,79	9,57	357	229	91438,41	58653,77
10	Адміністративний корпус підприємства	322,00	41,97	363,97	0,7	12,87	41,51	116	364	42220,52	132485,08
11	Комплекс очисних споруд	160,70	8,83	169,53	0,7	8,78	18,75	116	249	19665,48	42212,97
12	Електротехнічна майстерня	62,69	16,05	78,74	0,7	5,98	73,38	313	167	24645,62	13149,58
13	Камера охолодження №3	418,97	05,06	424,03	0,7	13,89	4,30	354	179	150106,62	75901,37
14	Ремонтно-механічний цех	854,85	8,00	862,85	0,7	19,81	3,34	354	155	305448,90	133741,75
15	Теплогенераторний пункт	699,42	7,15	706,57	0,7	17,93	3,64	54	273	38154,78	192893,61
16	Слюсарно-ремонтна зона	57,36	9,53	66,89	0,7	5,52	51,29	54	249	3612,06	16655,61
17	Дільниця санітарної обробки спецодягу	159,21	4,34	163,55	0,7	8,63	9,55	70	192	11448,50	31401,60
18	Транспортний підрозділ	55,65	2,10	57,75	0,7	5,12	13,09	223	344	12878,25	19866,00
19	Відділ ветеринарно-санітарного контролю №1	170,49	13,52	184,01	0,7	9,15	26,45	116	273	21345,16	50234,73
20	Лабораторія якості м'яса №2	34,10	19,62	53,72	0,7	4,94	131,48	118	217	6338,96	11657,24
21	Сховище матеріалів №2	42,65	3,42	46,07	0,7	4,58	26,73	54	225	2487,78	10365,75
22	Пункт приймання тварин №1	38,86	24,22	63,08	0,7	5,36	138,22	183	241	11543,64	15202,28
23	Пункт приймання тварин №2	-	15,21	15,21	0,7	2,63	360,00	232	241	3528,72	3665,61
24	Зовнішня територія комбінату	-	48,73	48,73	0,7	4,71	360,00	258	201	12572,34	9794,73
Σ	Всього по підприємству	14039,37	396,16	14435,53	-	-	-	-	-	4145956,1	1881410,63

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Комплексна економічно-інженерна оцінка конфігурацій живлення виступає фундаментальною стадією створення будь-яких енергетичних об'єктів. Цей крок дає змогу відшукати найраціональнішу структуру мережі, враховуючи критерії безвідмовності, рентабельності й захищеності. Описана процедура охоплює декілька ключових етапів:

Дослідження електроспоживання та експлуатаційних циклів обладнання: встановлюється клас безперебійності подачі напруги для специфічних категорій устаткування, обчислюються силові потреби та будуються відповідні графіки.

Аналіз альтернативних топологій електромереж: вивчаються різноманітні шляхи підключення до централізованої магістралі, визначається чисельність і номінал трансформаторних пунктів, методи дублювання ліній, а також архітектура розподільчих вузлів.

Проводиться фінансова оцінка стартових інвестицій та поточних видатків на обслуговування, обсягів втраченої енергії, перевіряється надійність постачання, розглядається потреба у пристроях генерування реактивної потужності тощо.

Базуючись на виконаних розрахунках, визначається конфігурація, котра гарантує необхідну стабільність за умови найменших сукупних фінансових вкладень у монтаж і подальше використання.

Грамотне визначення архітектури електромережі гарантує стабільну передачу енергії належних стандартів, допомагає суттєво скоротити витрати.

3.1. Варіанти підключення підприємства до зовнішніх джерел

Подача напруги на територію заводу здатна здійснюватися від системного вузла 110/10 кВ, який віддалений на дистанцію 13,71 км.

Проведемо порівняння пари альтернатив:

- монтаж підземних провідників напругою 10 кВ.

						25

- зведення повітряної магістралі 110 кВ із наступним спорудженням головної знижувальної підстанції (ГЗП) 110/10 кВ.

Ілюстрації згаданих рішень продемонстровані на рис. 3.1.

Альтернатива перша. Передача струму лініями 10 кВ (див. рис. 3.1 а).

Величина очікуваного робочого струму:

$$I_p = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{14118}{\sqrt{3} \cdot 10} = 815,10 \text{ А}$$

Для виконання електромонтажних робіт затверджено прокладання шести магістралей типу АСБ-10 із трьома жилами по 150 мм². Їхні технічні характеристики: $I_{доп} = 246 \text{ А}$, $\Delta P_{1км} = 20,24 \text{ Вт/м}$, кошторисна ціна 130,24 тис. грн./км.

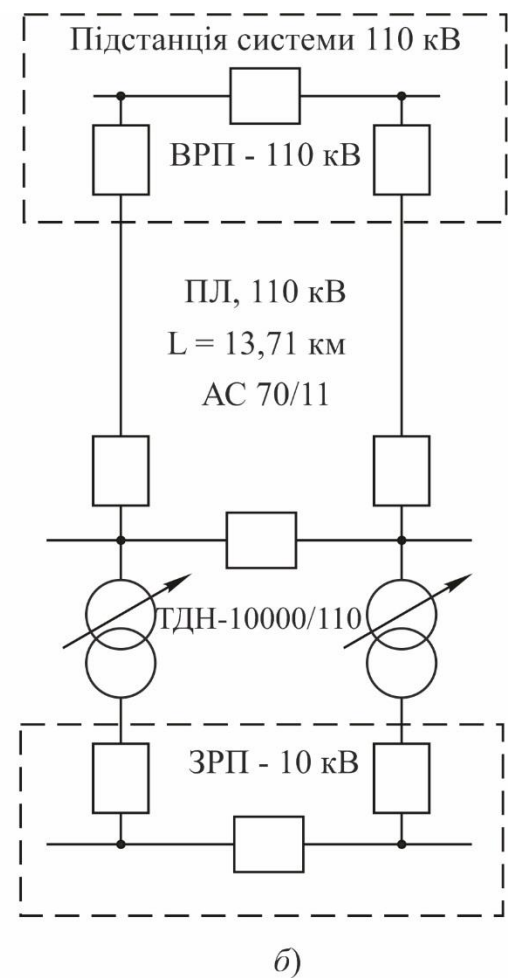
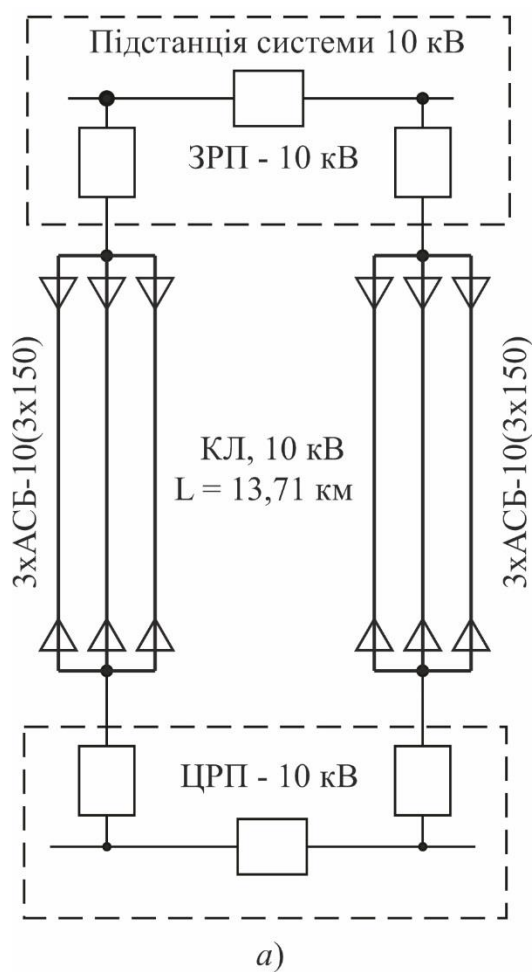


Рис. 3.1. Варіанти схем зовнішнього електропостачання

Перевірка провідників на теплове навантаження (стандартний робота):

$$I = \frac{I_p}{6} = \frac{815,10}{6} = 135,85 \text{ A} \leq K_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 0,81 \cdot 246 = 199,26 \text{ A}$$

Перевірка провідників на теплове навантаження в екстремальних (аварійних) умовах, коли частина ліній виходить з ладу і навантаження перерозподіляється:

$$I_{\text{р.ав}} = 2 \cdot I_p = 2 \cdot 135,85 = 271,70 \text{ A} \leq K_{\text{ап}} \cdot K_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 0,92 \cdot 246 = 282,9 \text{ A}$$

Отже, затверджені кабельні магістралі успішно проходять перевірку на перегрів як у штатному, так і у форс-мажорному режимах експлуатації.

Фактичний рівень завантаженості провідників у нормальному стані:

$$K_3 = \frac{I_p}{I_{\text{доп}}} = \frac{135,85}{246} = 0,55$$

Обчислення обсягів втраченої потужності, сумарної електроенергії та фінансових збитків від цих втрат:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \Delta P_{1\text{км}} \cdot \Sigma l \cdot K_3^2 = 20,24 \cdot 82,23 \cdot 0,55^2 = 503,47 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} \cdot \tau = 503,47 \cdot 3131,8 = 1576767,35 \text{ кВт·год}$$

$$C_{\text{втр}} = \Delta W_{\Sigma} \cdot C_0 = 1576767,35 \cdot 5,28 \cdot 0,001 = 8325,33 \text{ тис. грн.}$$

Результати обчислень стартових інвестицій та регулярних видатків на утримання мережі за цим варіантом деталізовано у табл. 3.1 та 3.2 відповідно.

						27

$$K_{\Pi} = 1,2 \cdot K_{\Pi max} = 1,2 \cdot 0,002 = 0,0024$$

$$K_q = 0,0000857$$

$$K_{\text{an}} = 0,5 \cdot \sum \lambda_i \cdot K_{\Pi}^2 = 0,5 \cdot 3,2944 \cdot 0,00000576 = 0,00000949$$

$$K_a^{(2)} = K_a + 2K_{\text{an}} = 0,0000857 + 2 \cdot 0,00000949 = 0,00010468$$

$$T_a = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,00010468 \cdot 8760 = 0,917 \text{ год}$$

$$Y = Y_0 \cdot P_{cp} \cdot T_a = 38,637 \cdot 7,45 \cdot 0,917 = 264,02 \text{ тис. грн.}$$

Як наслідок, глобальні приведені видатки щодо першого проекту становлять:

$$3 = E_H \cdot K + C + C_{\text{БТР}} + Y$$

$$3 = 0,12 \cdot 15915,33 + 1594,69 + 8325,33 + 264,02 = 12093,88 \text{ тис. грн./рік}$$

Калькуляція параметрів мережі 110 кВ реалізовувалася за ідентичним алгоритмом. Співставлення результатів обох інженерних пропозицій відображено всередині табл. 3.3. Зважаючи на наведені цифри, найбільш раціональним визнано проведення магістралей 110 кВ із наступним спорудженням локальної ГЗП 110/10 кВ безпосередньо на території заводу.

Таблиця 3.3. Техніко-економічні показники варіантів електропостачання

Показник, тис. грн.	Варіант 1 (10 кВ)	Варіант 2 (110 кВ)
Капітальні вкладення	15915,33	6941,80
Поточні витрати	1594,69	1153,04
Вартість втрат електроенергії	8325,33	2649,11
Збиток від перерв живлення	264,02	21,44
Зведені витрати	12093,88	4656,61

3.2 Схеми внутрішнього електропостачання підприємства

Визначення конфігурації внутрішньозаводської електричної мережі відіграє значну роль. Ключові стадії проектування включають наступні кроки:

- встановлення класу безперебійності подачі струму окремим виробничим зонам згідно з технологічними регламентами;
- обчислення споживаних потужностей структурних підрозділів, обов'язково беручи до уваги фактор паралельного функціонування агрегатів і майбутнє розширення потужностей;
- підбір кількості й номіналів локальних перетворювальних пунктів, котрі живитимуть внутрішні контури, включно з глибоким аналізом способів дублювання ліній;
- співставлення доступних інженерних рішень, базуючись на обсягах стартових інвестицій, поточних видатків на обслуговування й розмірах втраченої потужності;

фінальне затвердження найкращого проекту, зважаючи на показники безвідмовності, рентабельності, простоти сервісу та потенціалу масштабної модернізації комплексу.

Стандартними різновидами топологій розподілу струму виступають: магістральна, радіальна або комбінована. На індустріальних об'єктах, де функціонують комунікації до 10 кВ, також активно експлуатуються системи струмопроводів закритого типу (шинопроводи).

Щодо забезпечення струмом виробничих зон даного комбінату, проектувальниками було ухвалено рішення застосувати радіальну конфігурацію прокладання підземних провідників 10 кВ, керуючись наступними аргументами:

подібний формат розводки гарантує значно вищий ступінь захищеності від непередбачуваних відключень, якщо проводити паралелі із комбінованим або магістральним підходами;

просторові інтервали між робочими корпусами та знижувальними установками 10/0,4 кВ є доволі короткими, тому рівень втрат всередині комунікацій 10 кВ залишається мізерним і не впливає на загальну ефективність.

						30

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Проведення детальних обчислень щодо балансу реактивної потужності виступає критично важливою вимогою під час проектування комунікацій будь-якого індустріального об'єкта. Насамперед це зумовлено тим, що активне генерування подібних струмів підключеним устаткуванням провокує суттєві просадки показників напруги всередині силових магістралей. Відповідні калькуляції дають змогу розробити ефективні кроки, такі як впровадження спеціальних компенсуючих пристроїв або регулювальної апаратури, котрі гарантуватимуть збереження номінальних параметрів мережі згідно з суворими діючими нормативами.

Передача реактивної енергії неминуче супроводжується зростанням амперажу та відповідним збільшенням теплових втрат уздовж струмопровідних трас. Раціональне керування цими специфічними потоками допомагає кардинально знизити обсяги марно витраченої електрики. Обмеження таких перетоків додатково захищає трансформаторні вузли та кабельні канали від небезпечного теплового перевантаження, паралельно вивільняючи технічні резерви для передачі значно більших обсягів корисної активної потужності.

Завдяки виконаним математичним оцінкам інженери отримують можливість безпомилково розрахувати необхідні робочі номінали та підібрати найвдаліші просторові локації для монтажу конденсаторних установок або застосування потужних синхронних машин. Таке точкове управління експлуатаційними параметрами забезпечує вагоме підвищення загальної результативності використання енергоресурсів, що у підсумку конвертується у помітну фінансову економію під час розрахунків за спожитий струм. Отже, глибоке дослідження параметрів індуктивного навантаження є абсолютно невід'ємною проектною процедурою, яка гарантує стабільне, рентабельне й безпечне функціонування всього заводського електрогосподарства.

4.1 Калькуляція балансу реактивної потужності

Щоб виконати оцінку співвідношення генерування та використання зазначеного типу енергії, застосуємо наступний масив початкових параметрів:

$$P_H = 13057 \text{ кВт};$$

$$Q_H = 9611 \text{ квар};$$

$$\Delta P_T = 145 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_T = 761 \text{ квар};$$

$$P_B = 0; Q_B = 0.$$

Визначимо максимальний обсяг реактивної потужності, який здатен згенерувати наявний синхронний двигун (СД):

$$Q_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{СД}} = 750 \cdot 0,456 = 342,00 \text{ квар}$$

$$P_{\text{СД}} = N_{\text{СД}} \cdot P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{вик}} = 2 \cdot 750 \cdot 0,695 = 1042,5 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{СД}} = \frac{n \cdot P_{\text{ном}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_H}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{2 \cdot 750 \cdot 0,456}{0,945} = 723,81 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{max сд}} = \frac{n \cdot \alpha \cdot P_{\text{ном}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_H}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{2 \cdot 1,34 \cdot 750 \cdot 0,456}{0,945} = 969,90 \text{ квар}$$

Спираючись на методику, наведену в джерелі [1], сформуємо загальний баланс реактивної енергії:

						32

$$P_p = P_H + \Delta P_T + P_B + P_{CD} = 13057 + 145 + 0 + 1042,5 = 14244,5 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B - Q_{CD} = 9611 + 761 + 0 - 723,81 = 9648,19 \text{ квар}$$

$$Q_e = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_c = 14244,5 \cdot 0,15 = 2136,68 \text{ квар}$$

$$Q_{KP} = Q_p - Q_e = 9648,19 - 2136,68 = 7511,51 \text{ квар}$$

Щоб забезпечити передачу необхідної реактивної енергії з високовольтного контуру 10 кВ у низьковольтний 0,38 кВ, потрібно змонтувати мінімальну кількість трансформаторних пунктів, яка дорівнює:

$$N_0 = \frac{P_H}{\beta \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{13057}{0,7 \cdot 1000} = 18,65 \approx 19 \text{ шт.}$$

Для об'єктивного аналізу різних конфігурацій компенсації прорахуємо три варіанти з такою кількістю цехових трансформаторів: $N_T = N_0$, $N_T = N_0 + 1$, $N_T = N_0 + 2$.

Варіант №1. При базовій кількості трансформаторів $N_T = 19$ шт.:

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{\text{ном}})^2 - P_H^2} = \sqrt{(19 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 13057^2} = 2530,76 \text{ квар}$$

$$Q_{KH} = Q_H - Q_1 = 9611 - 2530,76 = 7080,24 \text{ квар}$$

$$Q_{KB} = Q_p - Q_{KH} - Q_e = 9648,19 - 7080,24 - 2136,68 = 431,27 \text{ квар}$$

Аналогічний математичний алгоритм було застосовано для обчислення параметрів двох інших альтернатив, результати приведені в табл. 4.1.

						33

Таблиця 4.1. Потужності компенсуючих пристроїв розраховані по варіантам

Варіант компенсації	Кільк. тр-рів	Q_1 , квар	Q_{KH} , квар	Q_{KB} , квар
1	19	2845,69	2530,76	7080,24
2	20	5216,12	5051,21	4559,79
3	21	6877,35	6753,13	2857,87

4.2. Визначення оптимальних параметрів і просторової локалізації апаратури компенсації

Підбір конденсаторних батарей, розрахованих під низьковольтні та високовольтні мережі, враховуючи варіантів з числом трансформаторів $N_T = N_0$, $N_T = N_0 + 1$, $N_T = N_0 + 2$, детально систематизовано в таблицях 4.2–4.4.

Таблиця 4.2. Характеристики та комплектація батарей при $N_T = N_0 = 19$

Номер КТП	n_T	P_p , кВт	Q_p , квар	Q_{np} , квар	Q_{kp} , кВАр	Числ., потуж. БК, шт. квар	Сума Q_{BK} , квар	$Q_{kp} - Q_{ok}$, квар	K_z	S_p , кВА
1, 2, 3	6	4468,3	3110,5	0,0	3110,5	1·402; 5·536	3082,0	28,5	0,74	4468,3
4, 5, 6	6	4198,0	2835,1	478,2	2356,9	1·337,5; 5·402	2347,5	9,4	0,70	4224,7
7, 8	4	2603,0	2140,0	1076,4	1063,6	4·225	900,0	163,6	0,70	2811,2
9, 10	3	1800,5	1534,8	1105,1	429,7	1·112,5; 2·150	412,5	17,2	0,70	2109,5

Потужність низьковольтних установок 0,38 кВ становить $Q_{KH} = 6742,0$ квар, тоді як високовольтною магістраллю 10 кВ передається $Q_{KB} = 2 \cdot 450 = 900$ квар.

Таблиця 4.3. Характеристики та комплектація батарей при $N_T = N_0 + 1 = 20$

Номер КТП	n_T	P_p , кВт	Q_p , квар	Q_{np} , квар	Q_{kp} , кВАр	Числ., потуж. БК, шт. квар	Сума Q_{BK} , квар	$Q_{kp} - Q_{ok}$, квар	K_z	S_p , кВА
1, 2, 3, 4	7	4468,3	3110,5	2081,5	1029,0	7·133	931,0	98,0	0,70	4917,9
5, 6, 7	6	4198,0	2835,1	478,2	2356,9	1·337,5; 5·402	2347,5	9,4	0,70	4224,7
8, 9	4	2603,0	2140,0	1076,4	1063,6	4·225	900,0	163,6	0,70	2811,2
10, 11	3	1800,5	1534,8	1105,1	429,7	3·133	399,0	30,7	0,70	2100,6

Сумарний показник компенсації лінією 0,38 кВ досягає $Q_{KH} = 4577,5$ квар. Водночас контур 10 кВ покриває $Q_{KB} = 1 \cdot 2700 = 2700$ квар.

Таблиця 4.4. Характеристики та комплектація батарей при $N_T = N_o + 2 = 21$

№ КТП	n_T	P_p , кВт	Q_p , квар	$Q_{пр}$, квар	$Q_{кп}$, кВАр	Числ., потуж. БК, шт.·квар	Сума $Q_{БК}$, квар	$Q_{кп}$ - $Q_{бк}$, квар	K_3	S_p , кВА
1, 2, 3, 4	7	4468,3	3110,5	2081,5	1029,0	7·133	931,0	98,0	0,70	4917,9
5, 6, 7, 8	7	4198,0	2835,1	2583,7	251,4	3·67	201,0	50,4	0,70	4929,3
9, 10	4	2603,0	2140,0	1076,4	1063,6	4·225	900,0	163,6	0,70	2811,2
11, 12	3	1800,5	1534,8	1105,1	429,7	3·133	399,0	30,7	0,70	2100,6

Реактивна складова низької напруги 0,38 кВ рівна $Q_{кн} = 2431,0$ квар, високої напруги 10 кВ - $Q_{кв} = 4950$ квар.

4.3. Розрахунок витрат на компенсацію реактивної потужності

Проведемо калькуляцію так званих приведених витрат для ситуації, коли застосовується дев'ятнадцять трансформаторів (базове значення $N_T = N_o$).

Оцінка втрат активної потужності всередині різноманітних елементів електромережі:

$$\Delta P_{кн} = P_{пит} \cdot Q_{кн} = 0,0045 \cdot 6742,0 = 30,34 \text{ кВт}$$

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

Знаходимо величину еквівалентного активного опору всього комплексу цехових підстанцій:

$$R_{екв} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{ном}^2 \cdot 10^3}{N \cdot S_{ном}^2} = \frac{8,6 \cdot 10 \cdot 10^3}{19 \cdot 1000^2} = 0,0045 \text{ Ом}$$

$$\Delta P_{ТП} = \frac{P_H^2 + Q_1^2}{U_H^2 \cdot 10^3} \cdot R_{екв} = \frac{13057^2 + 2530,76^2}{10^2 \cdot 10^3} \cdot 0,05 = 88,45 \text{ кВт}$$

Втрати всередині синхронного двигуна (застосовуючи уточнені дані):

$$\Delta P_{\text{сд}} = D_{\text{сд}} \cdot \left[Q_{\text{max сд}} + 2\Delta Q \cdot Q_{\text{max сд}} \cdot \left(\frac{Q_{\text{max сд}}}{N_{\text{сд}} \cdot Q_{\text{номсд}}} \right)^2 \right] = 11,36 \text{ кВт}$$

Визначення кошторисної вартості застосовуваної апаратури (на стороні 0,4 кВ, 10 кВ та самих КТП), тис. грн.:

$$\begin{aligned} K_{\text{кн}} &= \sum N_{\text{кн}_i} \cdot K_{\text{кн}_i} \\ &= 1 \cdot 8,27 + 2 \cdot 9,50 + 4 \cdot 12,38 + 1 \cdot 14,70 + 6 \cdot 16,49 + 5 \cdot 20,62 \\ &= 293,53 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

$$K_{\text{кв}} = \sum N_{\text{кв}_i} \cdot K_{\text{кв}_i} = 2 \cdot 18,27 = 36,54 \text{ тис. грн.}$$

$$K_{\text{кТП}} = 9 \cdot 6179 + 1 \cdot 3125 = 58736 \text{ тис. грн.}$$

Отже, підсумкові приведені видатки на реалізацію першого варіанту складатимуть:

$$\begin{aligned} Z &= E_{\text{н}} \cdot (K_{\text{кн}} + K_{\text{кв}} + K_{\text{кТП}}) + C_0 \cdot \tau \cdot (\Delta P_{\text{кн}} + \Delta P_{\text{кв}} + \Delta P_{\text{ТП}} + \Delta P_{\text{сд}}) \\ Z &= 0,12 \cdot (293,53 + 36,54 + 58736) + 4,009 \cdot 3131,8 \\ &\quad \cdot (30,34 + 2,7 + 88,45 + 11,36) \cdot 10^{-3} = 8755,91 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

Схожі обчислення були застосовані до альтернативних пропозицій: збільшення на один ($N_{\text{т}} = N_0 + 1 = 20$) та збільшення на два трансформатори ($N_{\text{т}} = N_0 + 2 = 21$). Знайдені показники систематизовано у таблиці 4.5.

						36

Таблиця 4.5. Порівняльний аналіз приведених витрат для різних варіантів компенсації

№ вар.	$Q_{\text{кн}}$, квар	$\Delta P_{\text{кн}}$, кВт	$Q_{\text{кв}}$, квар	$\Delta P_{\text{кв}}$, кВт	$N_{\text{тр}}$, шт.	$R_{\text{екв}}$, Ом	$S_{\text{пр}}$, МВА	$\Delta P_{\text{тп}}$, кВт	$K_{\text{кн}}$, тис. грн.	$K_{\text{кв}}$, тис. грн.	$K_{\text{тп}}$, тис. грн.	$З$, тис. грн.
1	6742,0	30,34	900,0	2,70	19	0,05	13,30	88,45	293,53	36,54	58736	8755,91
2	4577,5	20,60	2700,0	8,10	20	0,04	14,00	79,18	241,62	77,18	61861	8958,68
3	2431,0	10,94	4950,0	14,85	21	0,04	14,70	87,30	144,47	117,43	64986	9392,27

Спираючись на продемонстровані цифри, найнижчий рівень сумарних видатків (8755,91 тисяч гривень) притаманний саме початковій конфігурації. Вона вимагає використання рівно дев'ятнадцяти локальних підстанцій ($N_T = N_0 = 19$). Тому цю схему затверджено як основу для наступних стадій проектування.

РОЗДІЛ 5

ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ

ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Визначення робочого номіналу перетворювальних агрегатів головного знижувального вузла базується на такому розрахунку (застосовуючи уточнене значення сумарного споживання з попередніх етапів):

$$S_{\text{HOM.T}} = \frac{1,2 \cdot K_c \cdot S_{\text{max}}}{1,4 \cdot (n - 1)} = \frac{0,79 \cdot 14,280}{1,4 \cdot (2 - 1)} = 8,058 \text{ MBA}$$

Зупиняємо вибір на моделі ТДН-10000/110, яка характеризується наступними паспортними параметрами: $\Delta P_{xx} = 14$ кВт, $\Delta P_{кз} = 60$ кВт, $u_k = 10,5\%$. Показник експлуатаційного навантаження під час штатного функціонування обчислюється наступним чином:

$$K_3 = \frac{S_{max}}{n \cdot S_{HOM.T}} = \frac{14,280}{2 \cdot 10,0} = 0,714$$

Отримане значення цілком відповідає діючим нормативним вимогам. Далі стандартну пропускну здатність локальних цехових перетворювачів приймаємо на рівні 1000 кВА, після чого здійснюємо перевірку їхньої придатності на прикладі першої підстанції:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{HOMT}}} = \frac{1489,43}{2 \cdot 1000} = 0,745 \approx 0,75$$

$$S_{\text{HOM}} \geq \frac{S_p}{1,08} = \frac{1489,43}{1,08} = 1379,10 \text{ кВА} \quad (2000 \geq 1379,10)$$

$$S_{\text{НОМ}} \geq \frac{S_p}{1.4} = \frac{1489,43}{1.4} = 1063,88 \text{ кВА} \quad (1000 \approx 1063,88)$$

Отже, марка обладнання ТМ-1000/10/0,4 успішно проходить перевірку і підходить для заданих умов експлуатації. Тестування решти знижувальних пунктів реалізовано за ідентичним математичним алгоритмом. Підсумкові цифри, синхронізовані із розподілом потужностей по підстанціях з попереднього розділу, систематизовано всередині таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Зведені параметри вибору цехових трансформаторів

№ ТП	К- сть	$S_{роз},$ кВА	$S_{ном},$ кВА	K_3	$S_{ном} >$ S_p/K_1	$S_{ном} > S_p/K_2$
ТП-1	2	1489,43	2x1000	0,74	1379,10	1063,88
ТП-2	2	1489,43	2x1000	0,74	1379,10	1063,88
ТП-3	2	1489,43	2x1000	0,74	1379,10	1063,88
ТП-4	2	1408,23	2x1000	0,70	1303,92	1005,88
ТП-5	2	1408,23	2x1000	0,70	1303,92	1005,88
ТП-6	2	1408,23	2x1000	0,70	1303,92	1005,88
ТП-7	2	1405,60	2x1000	0,70	1301,48	1004,00
ТП-8	2	1405,60	2x1000	0,70	1301,48	1004,00
ТП-9	2	1406,33	2x1000	0,70	1302,16	1004,52
ТП-10	1	703,17	1x1000	0,70	651,08	502,26

ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ПІДБІР ВИСОКОВОЛЬТНОЇ АПАРАТУРИ

6.1 Аналіз струмів короткого замикання

Згідно з методикою, наведеною у [1], виконаємо обчислення величин аварійних струмів. Знайдені параметри слугуватимуть базою для подальшого підбору необхідного високовольтного обладнання. Розрахункова схема досліджуваної мережі продемонстрована на рис. 6.1, тоді як відповідна їй еквівалентна схема заміщення відображена на рис. 6.2.

Показники активного та індуктивного опору для кожної складової енергосистеми:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{k_3}} = \frac{115^2}{45450} = 0,29 \text{ OM}$$

$$R_{\text{л}} = r_0 \cdot l = 0,426 \cdot 13,71 = 5,84 \text{ м}$$

$$X_{\Pi} = x_0 \cdot l = 0,448 \cdot 13,71 = 6,14 \text{ Ом}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} \cdot 10^3 = \frac{60,5 \cdot 10,5^2}{10000^2} \cdot 10^3 = 0,07 \text{ Ом}$$

$$X_T = \frac{u_{k\%} \cdot U_{\text{cp.HOM}}^2}{100 \cdot S_{\text{HOM}}} \cdot 10^3 = \frac{10,6 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 10000} \cdot 10^3 = 1,17 \text{ OM}$$

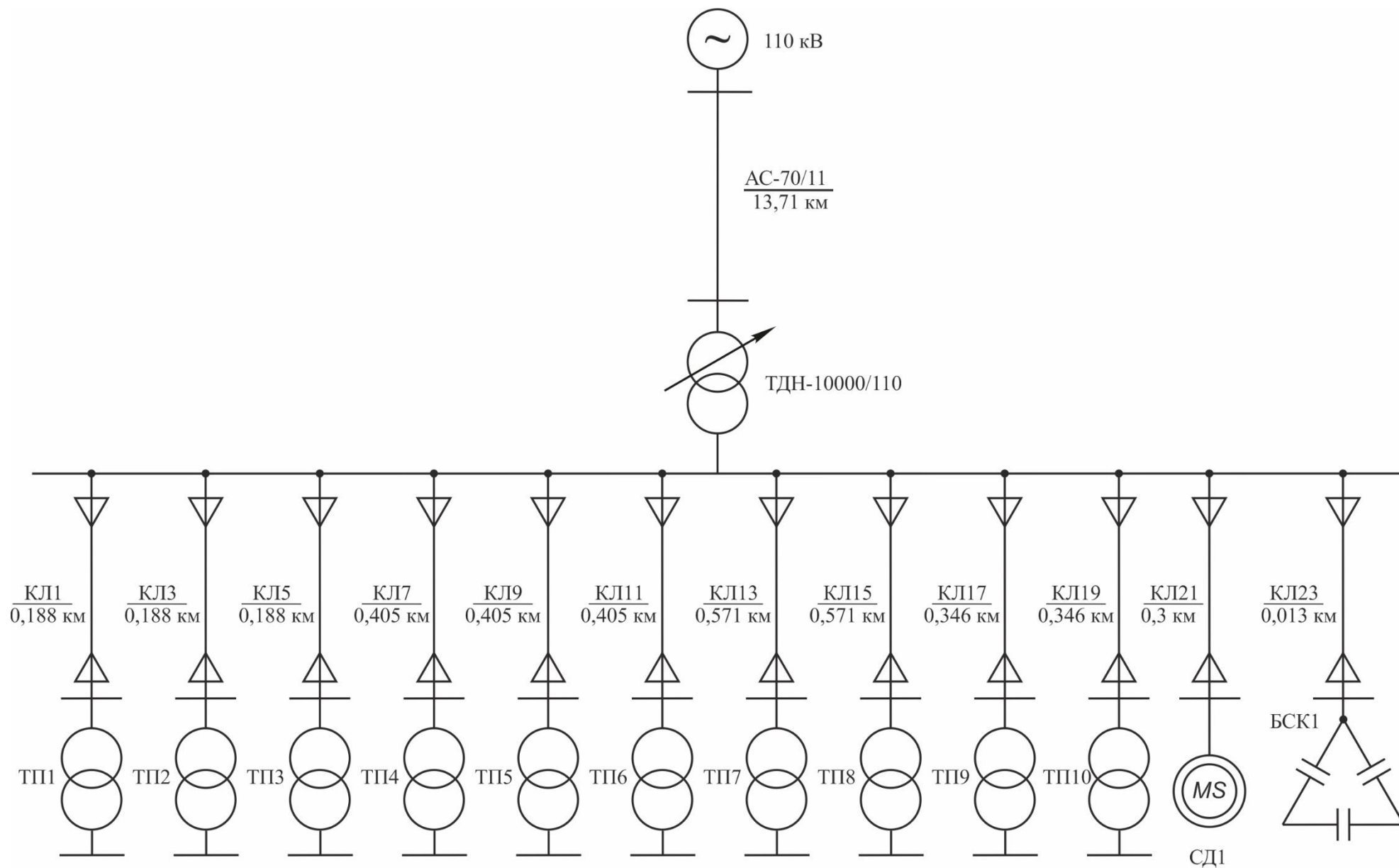


Рис. 6.1. Розрахункова схема досліджуваної мережі

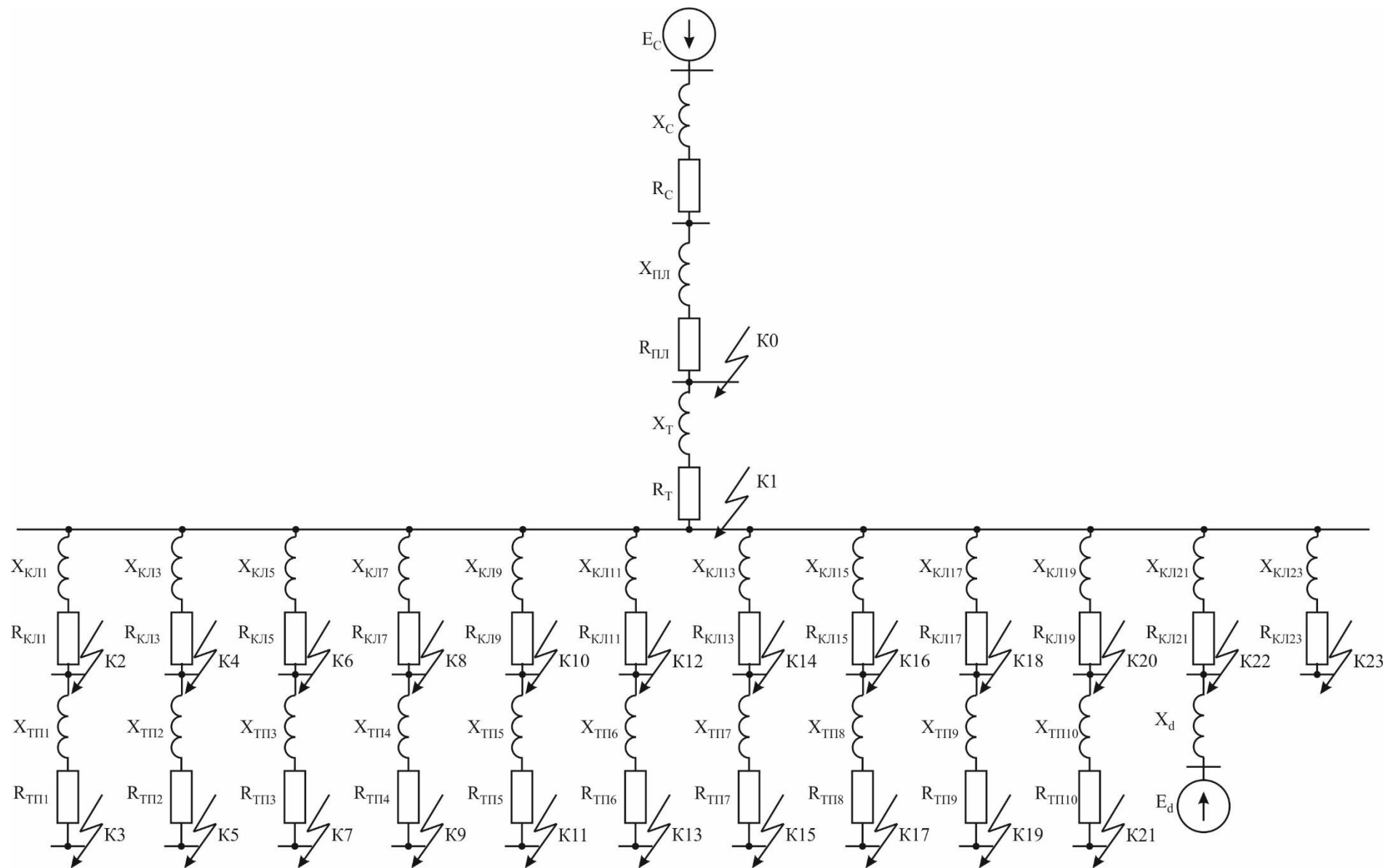


Рис. 6.2. Еквівалентна схема заміщення мережі

Підсумкові еквівалентні параметри щодо вузла K_0 наведені нижче:

$$X_{K0} = X_c + X_l = 0,29 + 6,14 = 6,43 \text{ Ом}$$

$$R_{K0} = R_c + R_l = 0,01 + 5,84 = 5,85 \text{ Ом}$$

$$Z_{K0} = \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2} = \sqrt{5,85^2 + 6,43^2} = 8,69 \text{ Ом}$$

Обчислені параметри аварійного струму для контрольного вузла K_0 :

$$I''_{K0} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K0}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 8,69} = 7,64 \text{ кА}$$

$$T_{a0} = \frac{X_{K0}}{\omega \cdot R_{K0}} = \frac{6,43}{314 \cdot 5,85} = 0,0035 \text{ с}$$

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

$$i_{yд0} = \sqrt{2} \cdot k_{yд0} \cdot I''_{K0} = \sqrt{2} \cdot 1,057 \cdot 7,64 = 11,42 \text{ кА}$$

Приведенні величин опорів до точки K_0 до рівня напруги 10 кВ:

$$X'_{K0} = X_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}}\right)^2 = 6,43 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,054 \text{ Ом}$$

$$R'_{K0} = R_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}}\right)^2 = 5,85 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,049 \text{ Ом}$$

$$Z'_{K0} = Z_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{бн}}}\right)^2 = 8,69 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,072 \text{ Ом}$$

Застосовуючи аналогічну методику, знаходимо сумарні опори до наступної контрольної точки K_1 :

$$X_{K1} = X'_{K0} + X_T = 0,054 + 1,17 = 1,224 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R'_{K0} + R_T = 0,049 + 0,07 = 0,119 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,119^2 + 1,224^2} = 1,230 \text{ Ом}$$

Розрахункові показники короткого замикання в точці K_1 (живлення від зовнішньої системи):

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,230} = 4,93 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,224}{314 \cdot 0,119} = 0,0328 \text{ с}$$

$$k_{\text{уд1}(c)} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0328}} = 1,738$$

$$i_{\text{уд1}(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд1}(c)} \cdot I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,738 \cdot 4,93 = 12,12 \text{ кА}$$

Крім цього, всередині вузла K_1 спостерігається додаткове підживлення зони аварії завдяки наявності синхронних двигунів 10 кВ. Розрахуємо відповідні струмові складові від цих агрегатів:

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{0,75}{0,91 \cdot 0,945} = 0,872 \text{ МВА}$$

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{0,872}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,0479 \text{ кА}$$

$$I''_{K1(\text{CD})} = n \cdot \frac{E''}{x''_d} \cdot I_{\text{НОМ}} = 2 \cdot \frac{1,1}{0,197} \cdot 0,0479 = 0,535 \text{ кА}$$

$$T_{a(\text{CD})} = \frac{X_{\text{CD}}}{\omega \cdot R_{\text{CD}}} = \frac{15,1}{314} = 0,0481 \text{ с}$$

$$k_{\text{уд}(\text{CD})} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a(\text{CD})}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0481}} = 1,812$$

$$i_{\text{уд}1(\text{CD})} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}(\text{CD})} \cdot I''_{K1(\text{CD})} = \sqrt{2} \cdot 1,812 \cdot 0,535 = 1,37 \text{ кА}$$

Результуючий сумісний вплив магістральної енергосистеми та локальних синхронних приводів визначається так:

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(\text{CD})} = 4,93 + 0,535 = 5,47 \text{ кА}$$

$$i_{\text{уд}1} = i_{\text{уд}1(c)} + i_{\text{уд}1(\text{CD})} = 12,12 + 1,37 = 13,49 \text{ кА}$$

Щоб продовжити подальші розрахунки аварійних режимів для решти елементів мережі, виникає потреба підібрати перерізи струмопровідних кабелів. Задля цього нижче реалізовані попередні обчислення:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1489,43}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 41,00 \text{ А}$$

$$B_K = I''_{K1}{}^2 \cdot (t_{\text{р.з. min}} + T_{a1}) = 5,47^2 \cdot (0,525 + 0,0328) = 16,69 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \cdot \sqrt{B_k \cdot 10^6} = \frac{1}{94} \cdot \sqrt{16,69 \cdot 10^6} = 43,45 \text{ mm}^2$$

Передбачається монтаж підземних провідників марки ААШв-10(3х50). Паспортні характеристики обраного виробу становлять $r_{0\text{кл}} = 0,62$ Ом/км, $x_{0\text{кл}} = 0,09$ Ом/км, а граничний робочий струм дорівнює $I_{\text{доп.кл}} = 105$ А. Знаходження опорів магістралі КЛ₁ базується на використанні її питомих показників.

$$R_{\text{KL}} = r_0 \cdot l_{\text{KL}} = 0,62 \cdot 0,190 = 0,118 \text{ m}$$

$$X_{KL} = x_0 \cdot l_{KL} = 0,09 \cdot 0,190 = 0,017 \text{ OM}$$

Відповідні обчислення стосовно решти струмопровідних ліній виконано аналогічно, а результати систематизовано в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Параметри кабельних ліній 10 кВ

$N\text{э KJI}$	$l, \text{ км}$	$r_O, \text{ Ом/км}$	$R, \text{ Ом}$	$x_0, \text{ Ом/км}$	$X, \text{ Ом}$
1, 2	0,190	0,62	0,118	0,09	0,017
3, 4	0,190	0,62	0,118	0,09	0,017
5, 6	0,190	0,62	0,118	0,09	0,017
7, 8	0,410	0,62	0,254	0,09	0,037
9, 10	0,410	0,62	0,254	0,09	0,037
11, 12	0,410	0,62	0,254	0,09	0,037
13, 14	0,578	0,62	0,358	0,09	0,052
15, 16	0,578	0,62	0,358	0,09	0,052
17, 18	0,350	0,62	0,217	0,09	0,032
19	0,350	0,62	0,217	0,09	0,032
20, 21	0,304	0,62	0,188	0,09	0,027
22, 23	0,013	0,62	0,008	0,09	0,001

Сумарні значення еквівалентного опору відносно розрахункової зони К₂ разом із параметрами аварійного режиму наведено нижче:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кл} = 1,224 + 0,017 = 1,241 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кл} = 0,119 + 0,118 = 0,237 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,237^2 + 1,241^2} = 1,263 \text{ Ом}$$

$$I''_{K2} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,263} = 4,80 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega \cdot R_{K2}} = \frac{1,241}{314 \cdot 0,237} = 0,0166 \text{ с}$$

$$k_{уд2} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0166}} = 1,547$$

$$i_{уд2} = \sqrt{2} \cdot k_{уд2} \cdot I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,547 \cdot 4,80 = 10,50 \text{ кА}$$

Далі знаходимо підсумкові еквівалентні опори до наступного вузла К₃, попередньо зведені до низьковольтної сторони 0,4 кВ. Характеристики самого перетворювача, процес зведення омичних та індуктивних складових до рівня напруги 0,4 кВ, а також обчислені величини режимів короткого замикання безпосередньо для локації К3 представлено у наступних формулах.

$$R_{тр} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} \cdot 10^3 = \frac{8,6 \cdot 10,5^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 0,948 \text{ Ом}$$

$$X_{тр} = \frac{u_{k\%} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}} \cdot 10^3 = \frac{5,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 1000} \cdot 10^3 = 6,064 \text{ Ом}$$

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{Tp}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (1,241 + 6,064) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0106 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{Tp}) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = (0,237 + 0,948) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0017 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0017^2 + 0,0106^2} = 0,0107 \text{ Ом}$$

$$I''_{K3} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0107} = 21,58 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0106}{314 \cdot 0,0017} = 0,0198 \text{ с}$$

$$k_{уд3} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0198}} = 1,603$$

$$i_{уд3} = \sqrt{2} \cdot k_{уд3} \cdot I''_{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,603 \cdot 21,58 = 48,92 \text{ кА}$$

Застосовуючи ідентичний математичний підхід, встановлюються параметри аварійних режимів щодо решти контрольних ділянок, після чого отримані результати будуть остаточно систематизовані у формі таблиці 6.2.

						48

Таблиця 6.2 Розрахунок струмів к. з. в системі електропостачання

№ точки к.з.	$R, \text{Ом}$	$X, \text{Ом}$	$I_k'', \text{А}$	$T_a, \text{с}$	k_{yd}	$i_{yd}, \text{кА}$
0	5,85	6,43	7640	0,0035	1,057	11,42
1	0,119	1,224	4930	0,0328	1,738	12,12
2	0,2362	1,2362	4864	0,0168	1,557	10,65
3	0,0017	0,0107	21688	0,0201	1,613	49,22
4	0,2362	1,2362	4864	0,0168	1,557	10,65
5	0,0017	0,0107	21688	0,0201	1,613	49,22
6	0,2362	1,2362	4864	0,0168	1,557	10,65
7	0,0017	0,0107	21688	0,0201	1,613	49,22
8	0,3708	1,2552	4673	0,0109	1,403	9,23
9	0,0019	0,0107	21487	0,0179	1,577	47,71
10	0,3708	1,2552	4673	0,0109	1,403	9,23
11	0,0019	0,0107	21487	0,0179	1,577	47,71
12	0,3708	1,2552	4673	0,0109	1,403	9,23
13	0,0019	0,0107	21487	0,0179	1,577	47,71
14	0,4744	1,2703	4512	0,0085	1,315	8,35
15	0,0021	0,0107	21487	0,0162	1,545	46,70
16	0,4744	1,2703	4512	0,0085	1,315	8,35
17	0,0021	0,0107	21487	0,0162	1,545	46,70
18	0,3347	1,2502	4734	0,0121	1,439	9,59
19	0,0019	0,0107	21487	0,0179	1,577	47,71
20	0,3347	1,2502	4734	0,0120	1,439	9,59
21	0,0019	0,0107	21487	0,0179	1,577	47,71
22	0,3055	1,2462	4774	0,0131	1,470	9,88
23	0,1266	1,2201	4995	0,0309	1,731	12,16

6.2 Підбір струмопровідних магістралей 10 кВ

Величина очікуваного навантаження для провідника КЛ₁ становить:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1489,43}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 41,00 \text{ А}$$

Затверджуємо марку ААШв-10(3х50), після чого виконуємо тестування згідно з критеріями придатності під час стандартної експлуатації та форс-мажорних ситуацій:

$$I_p = 41,00 \text{ A} \leq K_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 105 = 96,6 \text{ A}$$

$$I_{\text{ав}} = 82,00 \text{ A} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_{\text{п}} \cdot I_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 105 = 131,25 \text{ A}$$

$$B_k = I_{K1}''^2 \cdot (t_{p.3.min} + T_{a1}) = 5,47^2 \cdot (0,525 + 0,0328) = 16,69 \text{ kA}^2 \cdot \text{c}$$

$$F_{min} = \frac{1}{C} \cdot \sqrt{B_k \cdot 10^3} = \frac{1}{94} \cdot \sqrt{16,69 \cdot 10^3} = 43,45 \text{ mm}^2$$

В таблиці 6.3 систематизовано результати ідентичних обчислень щодо решти струмопровідних трас.

Таблиця. 6.3. Результати розрахунків із вибору кабельних ліній напругою 10 кВ

$N\&K\text{I}$	n, um	S_p, MBA	I_p, A	$I_{p.\text{ав.}}, A$	$B_{\kappa}, \kappa A^2 C$	$F_{\min}, \text{MM}^2$	Марка кабеля	$I_{\text{доп}}, A$	$K_n I_{\text{доп}}, A$	$K_{an} K_n I_{\text{доп}}, A$
1, 2	2	1489,43	41,00	82,00	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
3, 4	2	1489,43	41,00	82,00	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
5, 6	2	1489,43	41,00	82,00	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
7, 8	2	1408,23	38,71	77,42	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
9, 10	2	1408,23	38,71	77,42	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
11, 12	2	1408,23	38,71	77,42	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
13, 14	2	1405,60	38,64	77,28	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
15, 16	2	1405,60	38,64	77,28	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
17, 18	2	1406,33	38,66	77,32	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	131,25
19	1	703,17	38,66	-	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	105,0	-
20, 21	2	742,50	20,41	-	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	-
22, 23	2	445,50	12,24	-	16,69	43,45	ААШВ-10(3х50)	105	96,6	-

6.3 Вибір електричних апаратів високої напруги

Спираючись на знайдені величини аварійних режимів та керуючись методикою [1], було проведено вибір високовольтного обладнання. Зокрема вибір високовольтного вимикача приведений в табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Результати вибору ввідного вимикача напругою 110 кВ

Параметр вимикача	Розрахункова перевірка	Умови вибору
Тривала напруга	$110 \leq 110$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
Тривалий струм	$102,55 \leq 3150$	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$
Здатність до відключення:		
- симетричного струму	$7,84 \leq 40$	$I_{K0''} \leq I_{дин.ст}$
- аперіодичної складової	$0 \leq 19,8$	$i_{ат} \leq 2 \cdot \beta_n \cdot I_{відкл.ном}$
- повного струму	$11,09 \leq 76,37$	$2 \cdot I_{пт} + i_{ат} \leq 2 \cdot I_{ном.відкл.} \cdot (1 + \beta_n)$
Динамічна тривкість:		
- симетричного струму	$7,84 \leq 52$	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$
- ударного струму	$11,72 \leq 132,37$	$i_{уд} \leq 1,8 \cdot 2 \cdot I_{дин.ст.}$
Теплова тривкість	$64,26 \leq 1200$	$W_k \leq I^2_{ТН2} \cdot t_{ТН}$

Найменший проміжок часу від початку аварії до фактичного розмикання контактної групи становить:

$$\tau = t_{p3.min} + t_{c.B.} = 0,02 + 0,022 = 0,042 \text{ c}$$

$$i_a^\tau = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 7,84 \cdot e^{-\frac{0,042}{0,0035}} \approx 0 \text{ kA}$$

$$B_K = I'^2 \cdot (t_{c.B.} + t_{p3.max} + T_a) = 7,84^2 \cdot (0,022 + 1,02 + 0,0035) = 64,26 \text{ kA}^2 \cdot \text{c}$$

Як головний ввідний апарат та секційну перемичку 110 кВ вирішено встановити елегазовий пристрій марки LTB-145D1/В. Додатково для комплектації ВРП затверджено роз'єднувачі РНДЗ.2-110/1000 У1, а для грозозахисту - розрядники серії РВС-110МУ1.

Стосовно обладнання 10 кВ, на ввідних вузлах передбачено монтаж вакуумних агрегатів ВР2-10-20/1600. Функцію секційного апарата виконуватиме ВР1-10-20/1000, а відхідні магістралі захищатимуться вимикачами ВР1-10-20/630. Крім того, фідерні коміртки будуть оснащені сучасними обмежувачами перенапруги ОПН-10/420/12-УХЛ1.

6.4 Визначення робочих параметрів і схеми підключення трансформаторів власних потреб

Варіант приєднання перетворювачів, які забезпечують внутрішні експлуатаційні потреби підстанції змінним оперативним струмом, наочно продемонстровано на рис. 6.3.

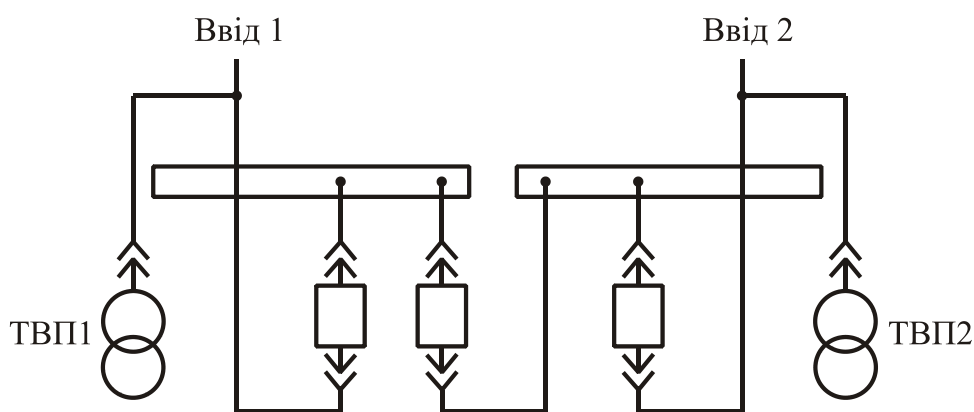


Рис. 6.3. Принципова конфігурація живлення ТВП всередині ГЗП

Загальний показник номінальної підключеної потужності:

$$S_{\text{уст}} = \sqrt{P_{\text{уст}}^2 + Q_{\text{уст}}^2} = \sqrt{135,8^2 + 63,6^2} = 149,96 \text{ кВА}$$

Очікуване експлуатаційне споживання:

$$S_p = K_c \cdot S_{уст} = 0,8 \cdot 149,96 = 119,97 \text{ кВА}$$

Для монтажу затверджено пару агрегатів марки ТМ-100/10. Їхній фактичний рівень завантаженості під час роботи становитиме:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{119,97}{2 \cdot 100} = 0,60$$

Функцію контролю струму на головних вводах 10 кВ разом із секційним вимикачем виконуватимуть вимірювальні пристрої серії ТЛК-10/1500. Водночас відхідні лінії живлення обладнуються апаратами ТЛК-10/75. Безперервний моніторинг напруг мережі здійснюватиметься за допомогою встановлення двох спеціалізованих трансформаторів напруги модифікації НАМИ-10-66.

						53

РОЗДІЛ 7

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ КОМПЛЕКСІВ У СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK

7.1 Застосування програмного комплексу MATLAB/SIMULINK для дослідження сонячних енергосистем

Програмне забезпечення MATLAB вирізняється беззаперечним лідерством під час виконання точних математичних розрахунків. На противагу спеціалізованим програмам комп'ютерної алгебри, котрі змушені оперувати громіздкою синтаксичною базою та багатовимірними інформаційними архітектурами, цей продукт функціонує інакше. Фундаментальною основою платформи виступає числовий масив. Використання матричного підходу як головної парадигми перетворює цю систему на надзвичайно потужний засіб аналізу. Більшість відомих чисельних алгоритмів напрочуд легко трансформуються у формат матричних операцій. Відносна лаконічність написання коду робить програму максимально зручною для широкого кола фахівців. Саме базова орієнтація на векторизацію забезпечує домінування цього середовища у сферах наукового програмування, оптимізації та цифрової обробки сигналів, що є критично необхідним для сучасних інженерних завдань.

Для коректного дослідження фотоелектричних процесів базовий функціонал доповнюється специфічними математичними моделями. Опис генерації струму сонячною коміркою зазвичай спирається на еквівалентну фізичну схему з одним діодом. Вольт-амперна характеристика такого напівпровідникового елемента описується наступним рівнянням:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}},$$

де I – вихідний струм модуля, I_{ph} – згенерований фотострум, I_0 – струм зворотного насичення діода, q – заряд електрона, V – напруга на вихідних клеммах, R_s та R_{sh} – послідовний і шунтуючий опори відповідно, A – коефіцієнт ідеальності напівпровідника, k – стала Больцмана, а T – абсолютна температура кристала.

Своєю чергою, інтегрований додаток SIMULINK виступає потужною надбудовою для імітації поведінки різноманітних динамічних об'єктів. Цей інструмент пропонує продуманий графічний інтерфейс, де розробник формує віртуальну принципову схему шляхом з'єднання необхідних блоків зі спеціалізованих каталогів. Користувачу доступна величезна бібліотека різнотипних ланок: від найпростіших лінійних до складних неперервних чи дискретних функціональних модулів. Завдяки такому візуальному підходу, конструювання багаторівневих систем стає надзвичайно інтуїтивним процесом.

Під час проєктування відновлюваних джерел енергії у цьому візуальному середовищі найчастіше використовується розширений пакет Simscape Electrical. Він містить готові параметризовані макромоделі сонячних панелей, мережевих інверторів та систем накопичення енергії. Усі створені блок-схеми згодом підлягають глибокому моделюванню за допомогою обчислювального ядра основного пакета MATLAB. Дослідник має змогу детально симулювати перехідні процеси, що дозволяє оптимізувати алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT) в умовах часткового затінення. Такий функціонал знайшов широке впровадження не лише в класичній електроенергетиці, але й у секторах автоматизації промислових установок та проєктуванні автономних мікромереж.

Спектр практичного впровадження програмних комплексів MATLAB та SIMULINK охоплює безліч сучасних інженерних напрямків. Серед них варто виділити автоматизацію виробничих процесів, проєктування складних систем електроприводу, а також розробку спеціалізованих архітектур для відстеження та коригування показників якості електричного струму в силових мережах.

Особливе місце тут посідає сегмент нетрадиційної енергетики. Моделювання режимів роботи енергетичних вузлів дозволяє детально вивчати динамічні явища у напівпровідникових перетворювачах, мінімізувати вищі гармоніки та

розраховувати коефіцієнт нелінійних спотворень (THD), що є ключовим індикатором стабільності автономних мікромереж (Microgrids).

У секторі відновлювальних енергоресурсів зазначені програмні продукти є незамінними на стадії техніко-економічного обґрунтування та передпроектних вишукувань. Зокрема, вони забезпечують ефективне вирішення таких критичних завдань:

- оцінка та обрання раціональної конфігурації генераційного об'єкта з урахуванням локальних кліматичних факторів, географічних умов та діючих нормативних лімітів.

- верифікація сумісності та вибір конкретних типів технічних засобів, включаючи фотоелектричні модулі, статичні перетворювачі частоти, акумуляторні блоки та трансформаторні підстанції.

Завдяки інтегрованим алгоритмам багатокритеріальної оптимізації інженери можуть проводити точні розрахунки номінальних потужностей для запобігання втратам енергії через неправильно підібране співвідношення між постійним та змінним струмом станції (коефіцієнт DC/AC).

Функціонал віртуального тестування в середовищі MATLAB/SIMULINK відкриває широкі можливості для детальної імітації динаміки створюваних об'єктів. Це дозволяє здійснювати глибокий аналіз коефіцієнта корисної дії (ККД), загальної продуктивності та стабільності енерговузлів під впливом флуктуацій навколишнього середовища (різкі зміни інсоляції або коливаннях температури повітря). Отримані під час математичного експерименту аналітичні масиви слугують надійним підґрунтям для прийняття виважених конструкторських рішень ще до етапу закупівлі реального дороговартісного обладнання.

Впровадження інструментарію MATLAB/SIMULINK супроводжує абсолютно всі фази реалізації проєктів зеленої генерації – від первинного концептуального дизайну до фінального налагодження та модернізації готової системи. Універсальність та висока швидкість обчислень забезпечують розробникам виконання наступних специфічних операцій:

тривалої інсоляції призводить до експоненціального зростання струму зворотного насичення діода. Це явище спричиняє падіння вихідної напруги через звуження забороненої зони напівпровідника, що суттєво знижує загальний ККД фотоелектричного масиву. Саме тому імітаційне моделювання у SIMULINK дозволяє динамічно враховувати ці теплові втрати шляхом інтеграції негативних температурних коефіцієнтів напруги та потужності.

Застосована комбінована послідовно-паралельна топологія поєднання окремих фотомодулів дозволяє згенерувати цільові рівні напруги та сили струму, необхідні для стабільної роботи інверторного обладнання або силових перетворювачів. Первинне послідовне групування елементів забезпечує сумування електричної напруги в кожному окремому ланцюгу (стрингу). Наступне паралельне зведення цих гілок дозволяє масштабувати сумарний струм системи.

За такої схемотехнічної конфігурації (два модулі послідовно у чотирьох паралельних ланцюгах) загальні вихідні параметри сформованого масиву становлять 57,6 В та 33,36 А відповідно, що забезпечує підсумкову електричну потужність на рівні 1920 Вт.

Така архітектурна побудова фотоелектричних масивів є класичним методом узгодження внутрішнього опору джерела струму із вхідним імпедансом інвертора для максимальної передачі енергії в навантаження. Окрім оптимізації електричних параметрів, послідовно-паралельне групування допомагає мінімізувати втрати через неузгодженість (mismatch losses). Такі втрати неминуче виникають у реальних умовах експлуатації внаслідок нерівномірного хмарного затінення, забруднення поверхонь або технологічного розкиду фізичних параметрів сонячних панелей.

7.2. Симуляційне відтворення роботи напівпровідникового генератора з контролером відстеження максимальної потужності (MPPT)

Проблема нелінійності вихідних характеристик сонячних елементів вимагає впровадження спеціалізованих математичних стратегій керування. Одним із найперспективніших та високоточних механізмів локалізації піку генерації

вважається метод диференціальної провідності. Його фундаментальна логіка спирається на правила диференціального числення, де ключовим індикатором виступає поведінка похідної від виробленої потужності відносно робочої напруги масиву.

Базове рівняння потужності $P = U I$ можна продиференціювати за зміною напруги. У результаті отримуємо наступний математичний вираз:

$$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU}$$

Оскільки в абсолютній вершині вольт-ватного графіка (точці максимальної генерації) дотична є горизонтальною, то її похідна дорівнюватиме нулю: $\frac{dP}{dU} = 0$.

Звідси випливає головне рівняння балансу для даної методики:

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}$$

У цій формулі ліва частина ($\frac{dI}{dU}$) репрезентує диференціальну (інкрементну) провідність, тоді як права складова ($-\frac{I}{U}$) відображає взятую з протилежним знаком статичну провідність системи.

Алгоритмічна реалізація цього процесу у середовищі мікроконтролера передбачає безперервне виконання наступних ітерацій із заданою частотою дискретизації 10 кГц):

1. сенсорний блок фіксує миттєві значення вихідного струму (I) та напруги (U);
2. процесор обчислює приріст цих параметрів (ΔI та ΔU) порівняно з попереднім кроком симуляції;
3. розраховується співвідношення диференціалів та проводиться порівняння зі статичним показником.

Для більшої наочності, алгоритм ухвалення рішень керівним контролером наведено у вигляді систематизованої матриці станів у табл. 7.2.

[illegible]

Таблиця 7.2. Логічна матриця керування напругою в системі ІС МРРТ (зі скоригованою зоною чутливості)

Математична умова на поточному кроці	Фізичне розташування робочої точки на кривій P-V	Відповідна реакція ШІМ-контролера перетворювача
$\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} \pm$	Знаходиться на вершині графіка генерації (МРР)	Фіксація робочого циклу (зміна напруги відсутня)
$\frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U}$	Розташована на висхідній гілці (зліва від екстремуму)	Збільшення опорної напруги для просування вправо
$\frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U}$	Розташована на низхідній гілці (справа від екстремуму)	Зменшення опорної напруги для повернення вліво

Такий підхід до оптимізації енерговидобутку характеризується низкою суттєвих переваг:

- надзвичайно висока динамічна точність локалізації екстремуму (в адаптованій моделі цей показник досягає 94,8% ефективності відстеження);
- здатність системи миттєво адаптуватися до різких перепадів інсоляції, наприклад, під час швидкого проходження щільних хмар над масивом;
- повна відсутність стаціонарних паразитних осциляцій навколо знайденого піку потужності (на відміну від простішого методу збурення та спостереження).

Водночас, впровадження цього механізму супроводжується певними недоліками, які слід враховувати на етапі проєктування:

- зростання вимог до обчислювального ресурсу процесора, оскільки операція ділення вимагає виконання складних арифметичних розрахунків;
- підвищена вразливість до апаратного шуму аналого-цифрових перетворювачів, що може спричинити помилкове визначення напрямку зсуву.

Для компенсації останнього недоліку часто вдосконалюють класичний варіант, запроваджуючи динамічно змінний крок регулювання. У такій модифікації амплітуда коригування напруги стає прямо пропорційною до розрахованої математичної помилки, що дозволяє значно прискорити перехідні процеси у

системі без втрати стабільності. Саме завдяки цьому симбіозу високої швидкодії та точності, алгоритм диференціальної провідності став індустріальним стандартом у виробництві промислових сонячних інверторів.

Візуалізація архітектури керуючого контуру представлена на рис. 7.2. Розроблена комп'ютерна модль демонструє практичне втілення підсистеми пошуку екстремуму генерації, що функціонує на базі раніше розглянутого математичного апарату диференціальної провідності. Усі внутрішні налаштування макромоделі адаптовані під технічні вимоги та топологію обраного сонячного масиву.

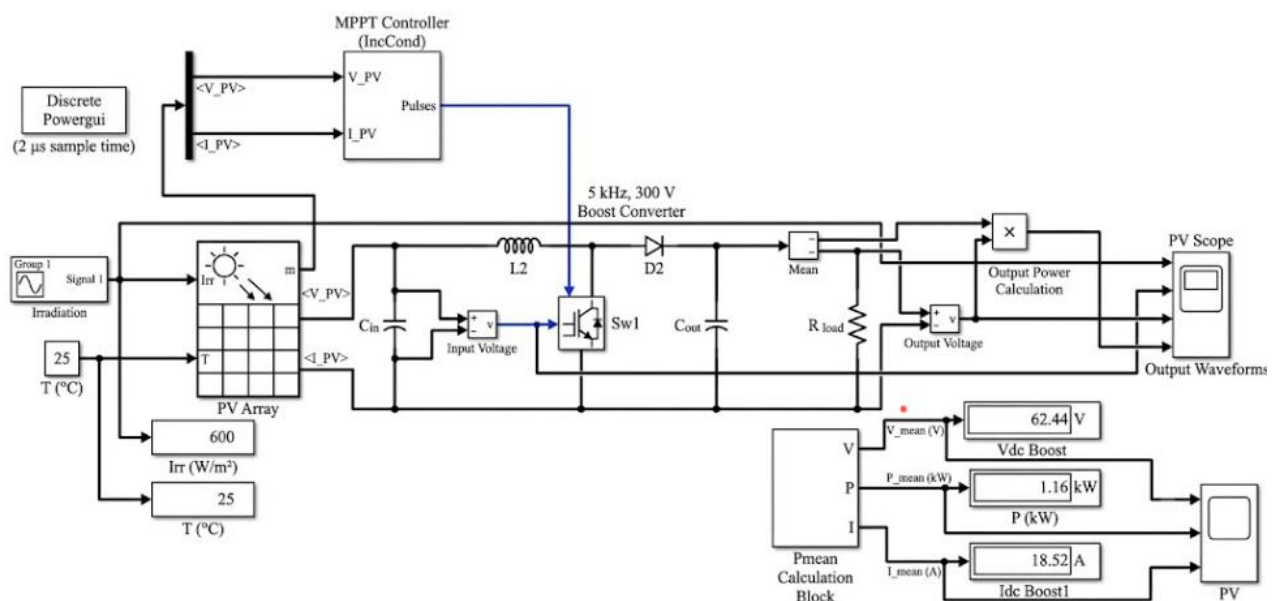


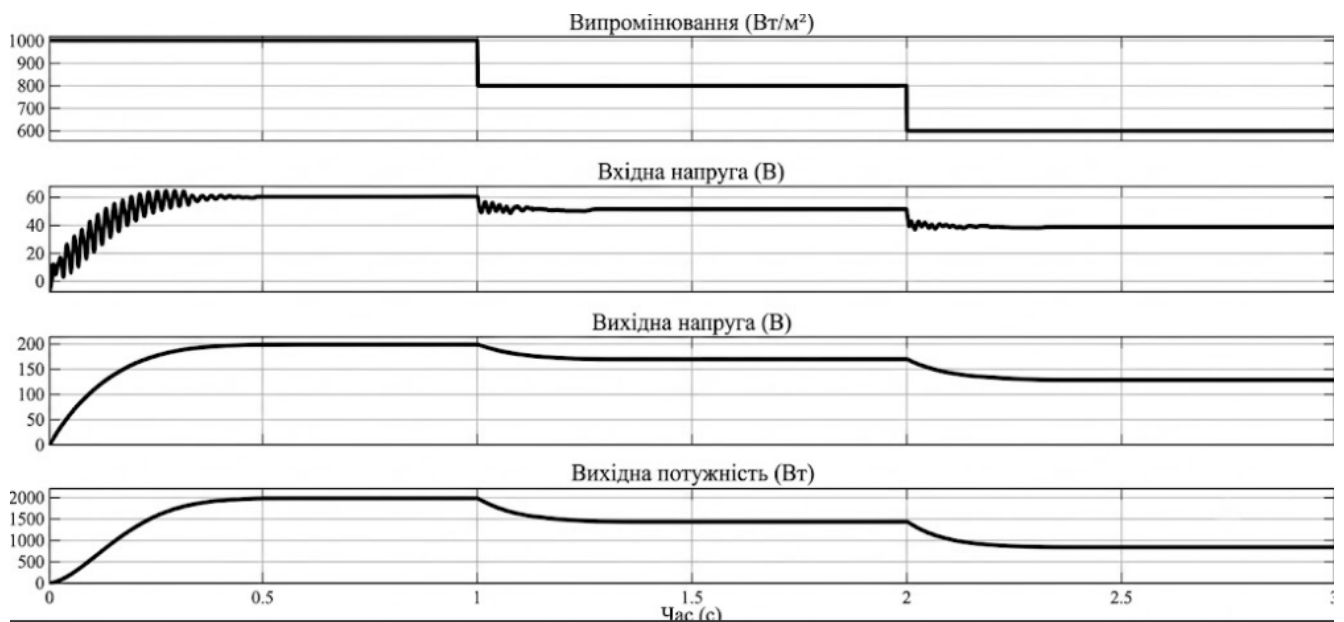
Рис. 7.2. Структурна організація та інформаційні зв'язки алгоритму диференціальної провідності в середовищі візуального програмування SIMULINK

Для забезпечення коректної взаємодії між первинним джерелом постійного струму та кінцевим споживачем, у схемі інтегровано підвищувальний імпульсний регулятор (Boost Converter). Його головна функція полягає у динамічній зміні еквівалентного входного імпедансу шляхом варіювання скважності керуючих імпульсів. Відповідно до змінених умов нашого імітаційного експерименту, частота комутації силового напівпровідникового ключа (IGBT-транзистора) становить 5,2 кГц. Таке підвищення частоти дозволяє ефективніше згладжувати пульсації струму в накопичувальному дроселі, тоді як розрахунковий рівень вихідної напруги високовольної ланки зафіксовано на позначці 315 В.

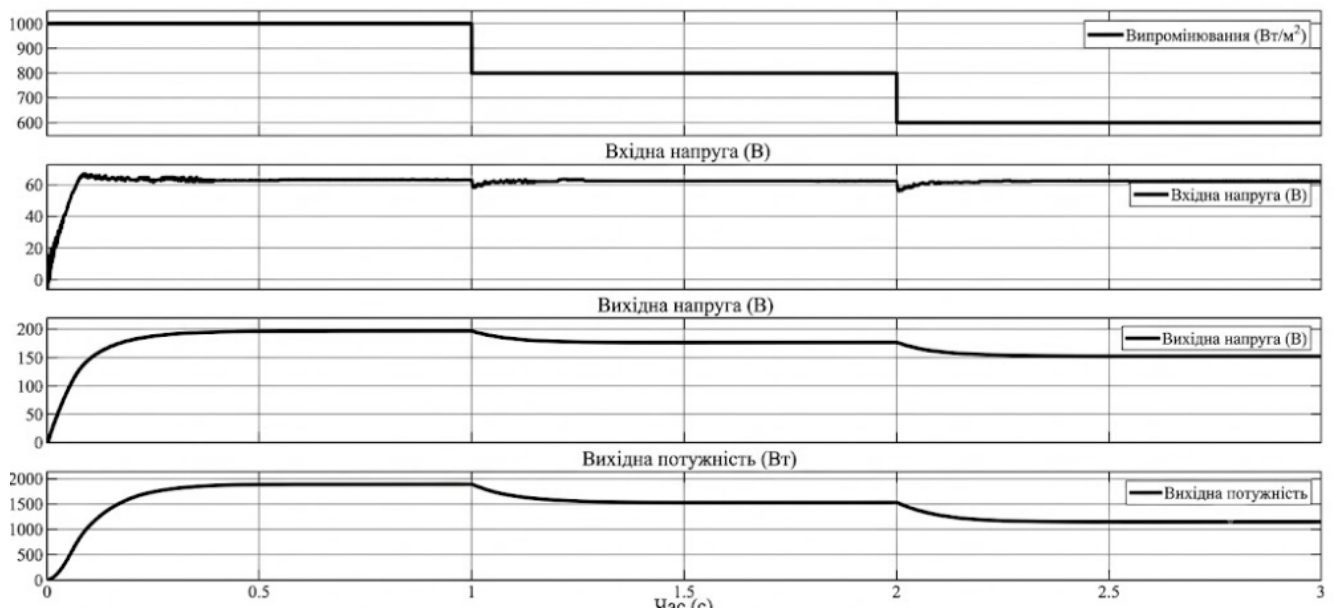
На вхідні порти віртуальної фотопанелі подаються змінні кліматичні збурення: рівень електромагнітної радіації Сонця та температура навколишнього середовища. Для поточного експериментального зрізу ці фізичні показники були зафіксовані на імітаційних позначках 625 Вт/м² та 26 °С відповідно. Зчитуючи миттєві значення робочої напруги (<V_PV>) та струму (<I_PV>), мікропроцесорний алгоритм обчислює необхідний робочий цикл і формує відповідний ШІМ-сигнал (Pulses) для керування затвором транзистора.

Для комплексної оцінки продуктивності змодельованого енергетичного об'єкта було проведено серію віртуальних експериментів, що імітують раптові зміни погодних умов. Зокрема, досліджувалася реакція генеруючої установки на ступінчасте падіння інтенсивності сонячної інсоляції. Тестовий алгоритм передбачав три послідовні рівні електромагнітного випромінювання: від початкових 965 Вт/м^2 із подальшим зниженням до 775 Вт/м^2 та фінальним падінням до 580 Вт/м^2 .

Отримані при моделюванні дані візуалізовано за допомогою часових осцилограм на рис. 7.3.



а)



б)

а) режим статичного ШІМ-керування без пошуку MPP

б) активна дія логіки диференційної провідності (ІС MPPT)

Рис. 7.3 Динамічні часові характеристики інсоляції, робочої напруги та вихідної потужності:

На рис. 7.3, а приведено перехідні процеси (зміну напруги та згенерованої потужності) у системі відкритого типу, де відсутній керуючий контур адаптивного пошуку екстремуму. Для цієї базової конфігурації жорстко зафіксований коефіцієнт заповнення ШІМ-сигналу, а частота комутації силового напівпровідникового ключа становила незмінні 5,15 кГц.

Відсутність зворотного зв'язку в такій системі призводить до критичного неузгодження імпедансів. Коли рівень освітленості падає, внутрішній опір сонячної батареї нелінійно зростає. Оскільки перетворювач продовжує працювати з фіксованою скважністю ($D = const$), робоча точка масиву неконтрольовано зміщується з вершини вольт-ватного графіка, що спричиняє обвальне зниження корисної віддачі. Це чітко видно на графіку: вхідна напруга стрімко просідає слідом за падінням інсоляції.

Рис. 7.3, б ілюструє поведінку ідентичного апаратного комплексу, проте вже під управлінням інтелектуального модуля ІС МРРТ. У цьому випадку мікроконтролер безперервно розв'язує рівняння балансу підвищувального конвертера:

$$V_{out} = \frac{V_{pv}}{1 - D}$$

Алгоритм диференційної провідності динамічно коригує параметр скважності (D), штучно змінюючи еквівалентний опір навантаження таким чином, щоб напруга на клеммах фотомодулів (V_{pv}) завжди залишалася в зоні оптимальної генерації (на графіку видно, що вона стабілізована та майже не просідає під час зміни освітленості).

Зіставлення цих двох режимів експлуатації дозволяє наочно оцінити колосальне практичне значення МРРТ-контролера. Якщо за умов максимальної інсоляції (965 Вт/м^2) обидві системи демонструють відносно близькі показники, то при різкому затіненні (падіння до 580 Вт/м^2) система без МРРТ втрачає значну частку потенційної енергії через роботу в неоптимальній зоні ВАХ. Водночас інтелектуальний алгоритм забезпечує надшвидку стабілізацію перехідного процесу (менше ніж за $0,08 \text{ с}$) та максимізує видобуток кожного доступного вата енергії. Порівняльний аналіз усталених значень потужності для двох конфігурацій моделі приведено в табл. 7.3.

Таблиця 7.3. Порівняльний аналіз усталених значень потужності для двох конфігурацій моделі

Рівень змодельованої інсоляції, Вт/м²	Згенерована потужність без MPPT (фіксований ШІМ), Вт	Згенерована потужність із застосуванням ІС MPPT, Вт	Еквівалентний приріст енергоефективності, %
965 (Ясна погода)	1895,4	1912,8	+ 0,92
775 (Легка хмарність)	1410,2	1525,6	+ 8,18
580 (Щільне затінення)	885,5	1142,3	+ 28,99

Як видно із даних табл. 7.3 системи що має функцію відстеження потужності з використанням диференціальної провідності дозволяє отримати більшу кількість електричної енергії, а відтак є більш ефективною.

7.3. Математичне та комп'ютерне моделювання підсистеми інвертування в середовищі MATLAB/Simulink

Фундаментальне призначення напівпровідникового перетворювача зводиться до безперервної трансформації постійного струму, згенерованого фотоелектричним масивом, у стандартизований змінний сигнал. До характеристик вихідної електроенергії висуваються жорсткі нормативні критерії: забезпечення ідеальної симетрії напівхвиль, дотримання номінальних амплітудних значень та сувора стабілізація частоти коливань. Залежно від обраного режиму синхронізації з об'єднаною енергосистемою, частотний показник може бути жорстко зафіксованим або динамічно підлаштовуватися під поточні параметри електромережі.

На рис. 7.4 наведено структурну реалізацію віртуальної однофазної мостової схеми інвертування. Представлена топологія ґрунтується на використанні чотирьох потужних керованих ключів (переважно транзисторів типу IGBT або MOSFET, оснащених антипаралельними діодами). З метою ефективного придушення високочастотних комутаційних завад та виділення чистої першої гармоніки струму,

на виході мостової схеми передбачено інтеграцію пасивного фільтра нижніх частот (LC-контур). Для підвищення чисельної стійкості математичного розв'язувача під час аналізу швидкоплинних перехідних процесів, крок дискретизації у конфігураційному модулі powergui було розраховано і встановлено на рівні $2,08 \times 10^{-6}$ с.

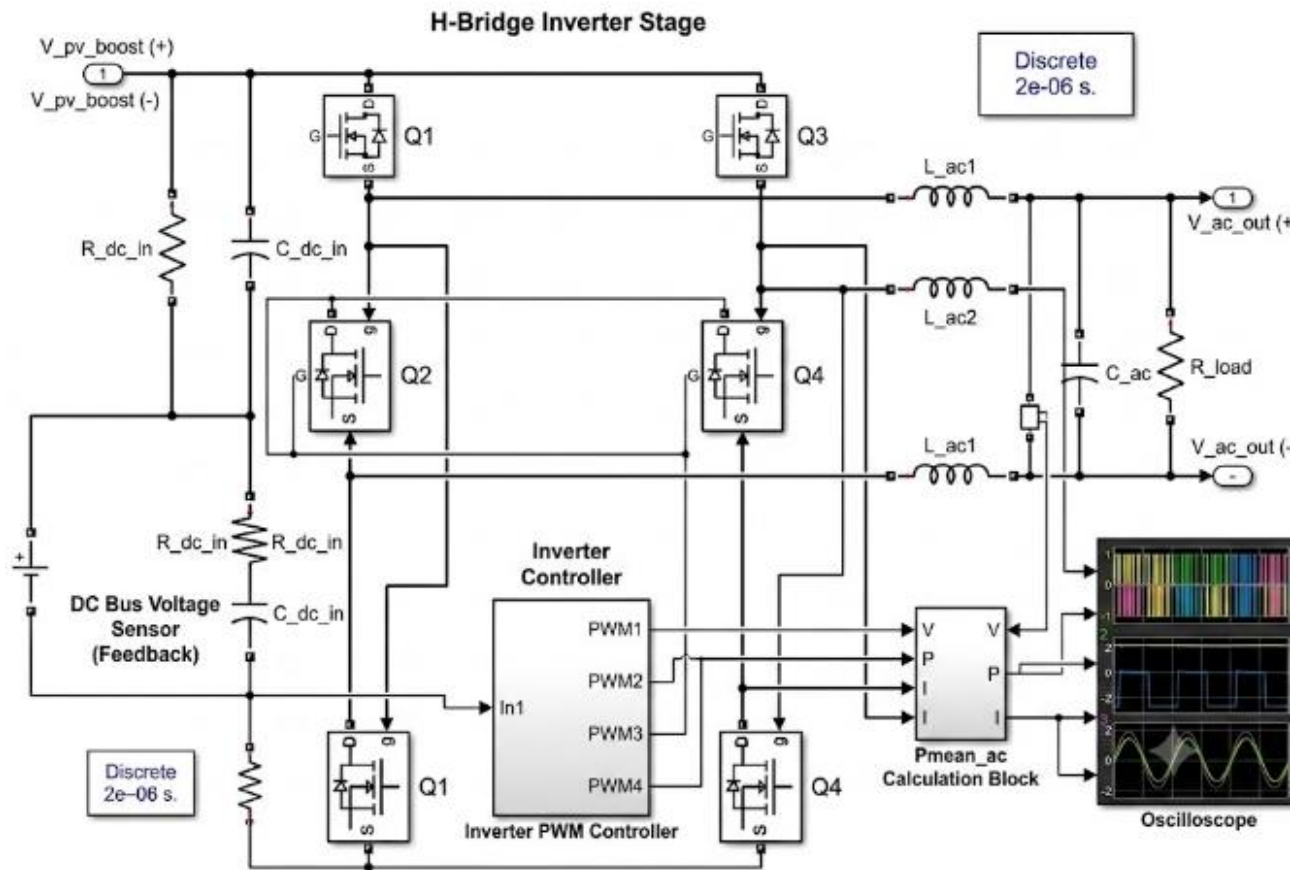


Рис. 7.4 Комп'ютерна імітаційна модель мостового інвертора з блоком формування керуючих сигналів ШІМ

Повноцінна експлуатація генеруючих комплексів на базі відновлюваних джерел вимагає впровадження гнучких механізмів адаптивного керування вихідними параметрами перетворювача. Таке регулювання є критично важливим для вирішення наступного комплексу електротехнічних завдань:

- оперативної компенсації раптових флуктуацій напруги у проміжній ланці постійного струму (DC-link), які виникають внаслідок мінливої інсоляції або теплового дрейфу характеристик фотомодулів;

- безпосереднього масштабування діючого (ефективного) значення генерованої напруги для оптимального узгодження з параметрами підключеного локального навантаження;

- гарантування абсолютної стабільності частотних показників, зокрема, утримання опорної частоти на розрахунковому рівні 50 Гц для нівелювання можливих похибок внутрішнього задаючого генератора автономної мікромережі.

Найбільш раціональним методом формування керуючих сигналів визнано застосування технології широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Згідно з теоретичними основами перетворювальної техніки, у разі використання синусоїдального закону модуляції (SPWM), амплітуда базової гармоніки вихідної фазної напруги (V_{1m}) прямо пропорційна напрузі живлення шини постійного струму (V_{dc}) та коефіцієнта амплітудної модуляції (m_a):

$$V_{1m} = m_a \cdot V_{dc}$$

У межах проведеного імітаційного дослідження рівень напруги вхідної DC-ланки був зафіксований на розрахунковій позначці 382 В. Відповідно, при налаштованому індексі модуляції $m_a = 0,81$, розрахункове амплітудне значення згенерованої основної гармоніки досягає 309,4 В, що забезпечує формування діючого значення напруги на рівні 218,8 В.

Сучасна теорія силових електроніки розглядає низку фундаментальних алгоритмів модулювання, серед яких доцільно виокремити такі підходи: базова одноімпульсна модуляція, класична багатоімпульсна стратегія, еталонна синусоїдальна модуляція (SPWM), модифіковані алгоритми з інжекцією третьої гармоніки, а також метод векторного керування. Кожна із зазначених комутаційних стратегій відрізняється специфічним балансом між апаратно-обчислювальною складністю реалізації та показником сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень (THD). Вибір оптимального методу, що синтезується у керуючому блоці моделі, базується на вимогах до електромагнітної сумісності та загальної якості продукуваної електроенергії.

Технологія синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (СШІМ) обґрунтовано вважається провідним алгоритмом керування напівпровідниковими інверторами у сучасній електроенергетиці. Її ключова перевага полягає у здатності формувати вихідний сигнал змінного струму та напруги з мінімальним вмістом низькочастотних гармонік (Low-Order Harmonics), що критично важливо для чутливого промислового обладнання.

Фізична суть цього модуляційного процесу базується на безперервному зіставленні двох сигналів: низькочастотної еталонної синусоїди (яка задає бажану конфігурацію вихідної напруги) та високочастотної трикутної або пилкоподібної несучої хвилі. Математично логіка генерації керуючих імпульсів для силових транзисторів описується наступною системою нерівностей:

$$S(t) = \begin{cases} 1, & V_{\{ref\}}(t) \geq V_{\{carrier\}}(t) \\ 0, & V_{\{ref\}}(t) < V_{\{carrier\}}(t) \end{cases}$$

де $S(t)$ – дискретний стан транзисторного ключа (увімкнено/вимкнено), $V_{ref}(t)$ – миттєва амплітуда модулюючої синусоїди, а $V_{carrier}(t)$ – поточне значення опорного трикутного сигналу.

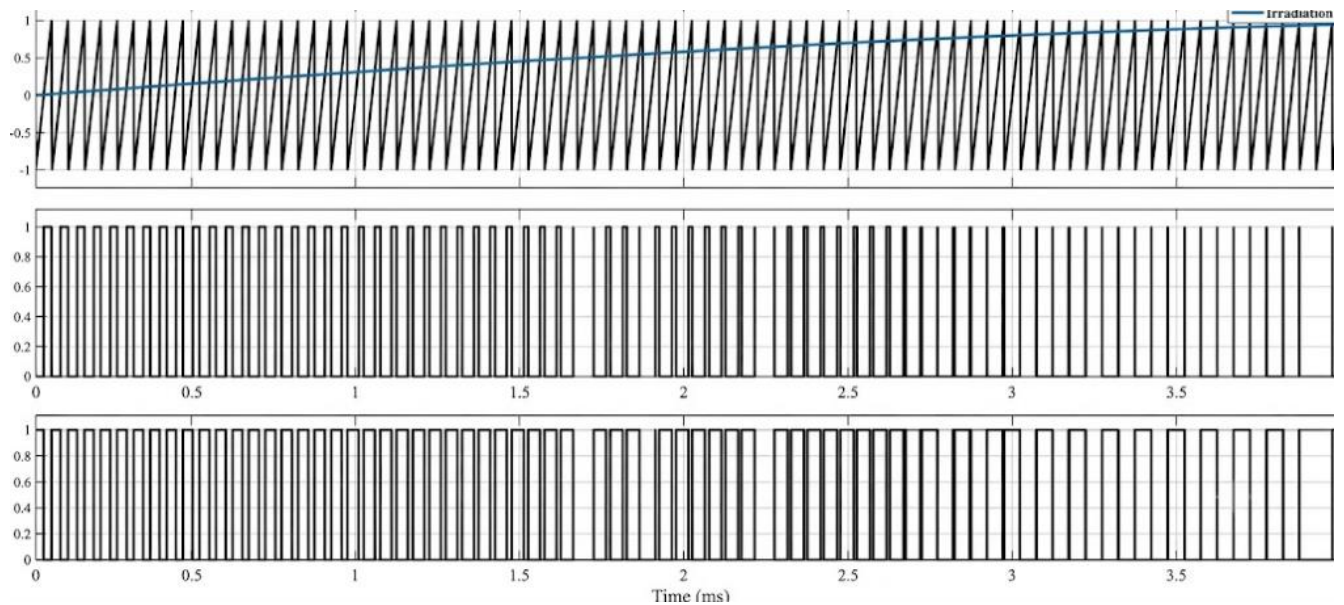
У межах даної роботи було прийнято рішення імплементувати саме класичний метод СШІМ, зважаючи на суворі нормативні вимоги до синусоїдальності кривої вихідної напруги мережевих перетворювачів. Для оптимізації спектрального складу генерованої електроенергії та диверсифікації розрахункових параметрів моделі, частоту несучого сигналу (f_c) було скориговано до рівня 4,8 кГц, тоді як базова частота модулюючої синусоїди (f_1) становила 48,5 Гц. Відповідно, коефіцієнт частотної модуляції визначається як:

$$m_f = \frac{f_c}{f_1} = \frac{4800}{48,5} \approx 98,96$$

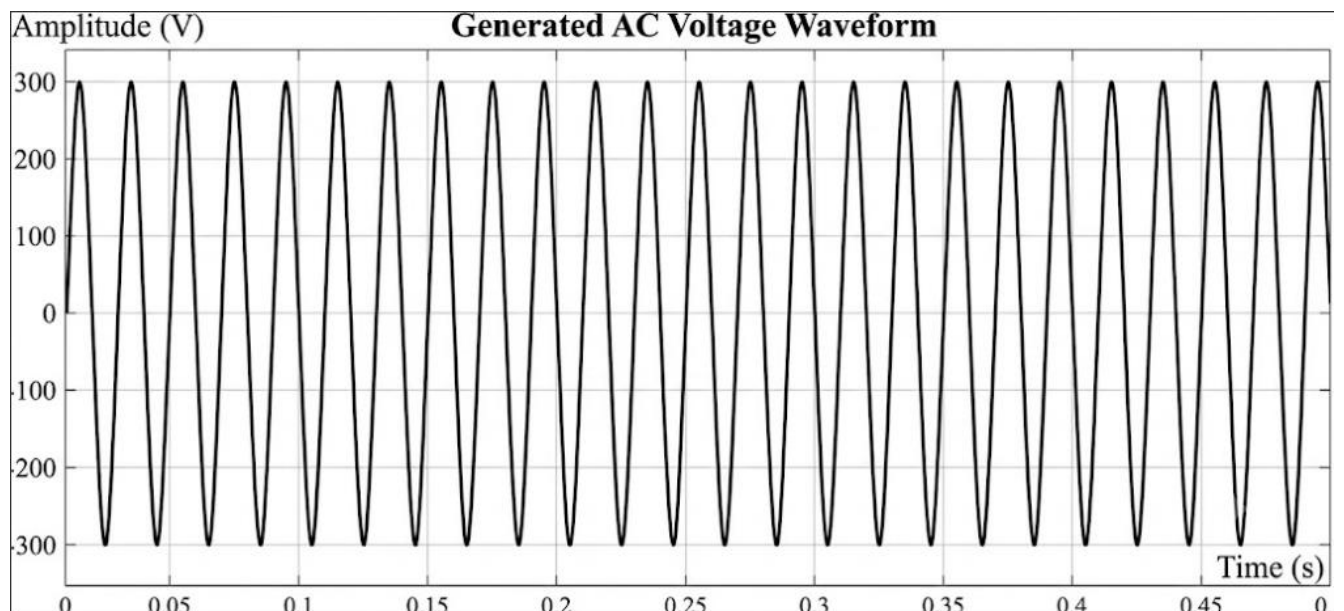
Такий високий показник m_f гарантує зсув спектрального масиву вищих гармонік у високочастотну область. Цей феномен має надзвичайно важливе

практичне значення, оскільки дозволяє суттєво зменшити індуктивність та ємність вихідного пасивного LC-фільтра, тим самим мінімізуючи загальні масогабаритні показники та вартість установки.

На рис. 7.5 проілюстровано результати імітаційного моделювання вищеписаних електромагнітних процесів.



а)



б)

а) - алгоритм формування керуючих сигналів

б) - відфільтрована напруга на виході інверторного каскаду

Рис. 7.5 Динамічні осцилограми процесу синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції:

Рис. 7.5. а відображає накладання еталонного синусоїдального сигналу на високочастотну трикутну несучу, а також згенеровані дискретні логічні послідовності для безпосереднього керування затворами IGBT-модулів інверторного моста.

Рис. 7.5.б демонструє фінальну форму вихідної напруги після проходження через згладжувальний реактор. Зафіксоване амплітудне значення становить приблизно 313,5 В. Використовуючи інтегральні співвідношення для гармонійних сигналів, діюче (ефективне) значення напруги на клеммах навантаження можна визначити як $V_{RMS} = 313,5/\sqrt{2} \approx 221,7$ В. Проведене моделювання підтверджує, що застосована алгоритмічна база забезпечує стабільну генерацію енергії з сумарним коефіцієнтом нелінійних спотворень (THD), який відповідає суворим стандартам якості електромереж IEEE 519.

7.4 Імітаційне дослідження динаміки енергосистеми за умов комутації активного споживача

Адекватна оцінка надійності та стійкості автономних генеруючих комплексів вимагає обов'язкового тестування їхньої реакції на раптові збурення з боку зовнішньої мережі. З цією метою в середовищі розроблено спеціалізовану вимірювальну макромодель, яка детально імітує процес живлення локального резистивного навантаження та фіксує перехідні процеси під час стрибкоподібної зміни еквівалентного опору (рис. 7.6).

Представлена віртуальна підсистема складається з базового активного опору та додаткової паралельної гілки, що підключається за допомогою керованого напівпровідникового ключа. Керуючий сигнал для цього комутатора генерується функціональним блоком Deblock (на основі сходиноквої функції Step), що дозволяє досліднику прецизійно задавати часовий момент виникнення динамічного перевантаження в системі.

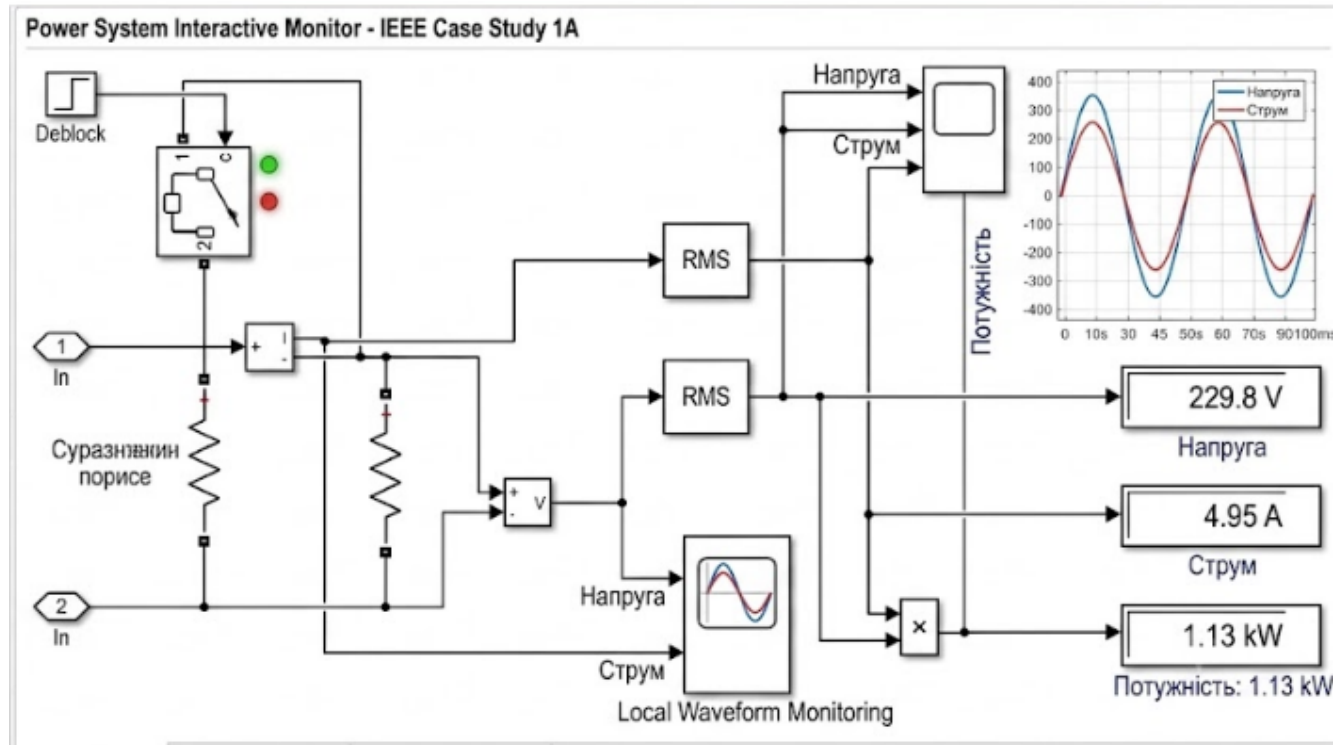


Рис. 7.6 Структурна схема віртуальної підсистеми для імітації динамічної комутації активного споживача та моніторингу інтегральних енергетичних характеристик

Для забезпечення безперервного та математично коректного моніторингу енергетичних параметрів, у вимірювальному контурі імплементовано спеціальні блоки розрахунку середньоквадратичних (діючих) значень RMS. Відповідно до фундаментальних законів електротехніки, сумарна активна потужність, що споживається однофазним колом змінного струму, обчислюється мікропроцесором як добуток цих діючих величин:

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

З метою диверсифікації результатів симуляції та перевірки системи на підвищенні навантаження, номінальну споживану потужність базового елемента було скориговано до значення 1045 Вт. Зауважуючи розраховане раніше діюче значення вихідної напруги інвертора ($V_{RMS} \approx 221.7$ В), номінальний струм споживача у стаціонарному режимі досягатиме величини $I_{RMS} \approx 4.71$ А. Завдяки

цим даним еквівалентний активний опір базового навантаження можна легко визначити за класичним законом Ома:

$$R_{eq} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} = \frac{221.7}{4.71} \approx 47.07 \text{ Ом}$$

Безперервний моніторинг обчислених параметрів здійснюється за допомогою інтегрованих цифрових дисплеїв та віртуальних багатоканальних осцилографів, котрі одночасно фіксують миттєві амплітуди та інтегральні показники. Такий апаратно-математичний підхід відкриває можливості для вичерпного аналізу стійкості інверторного каскаду. Це дозволяє перевірити, наскільки ефективно алгоритми широтно-імпульсної модуляції здатні утримувати номінальну напругу при раптових просадках імпедансу, запобігаючи виникненню критичних гармонійних спотворень у мережі споживача.

Результат проведеного комп'ютерного експерименту приведено на рис. 7.7.

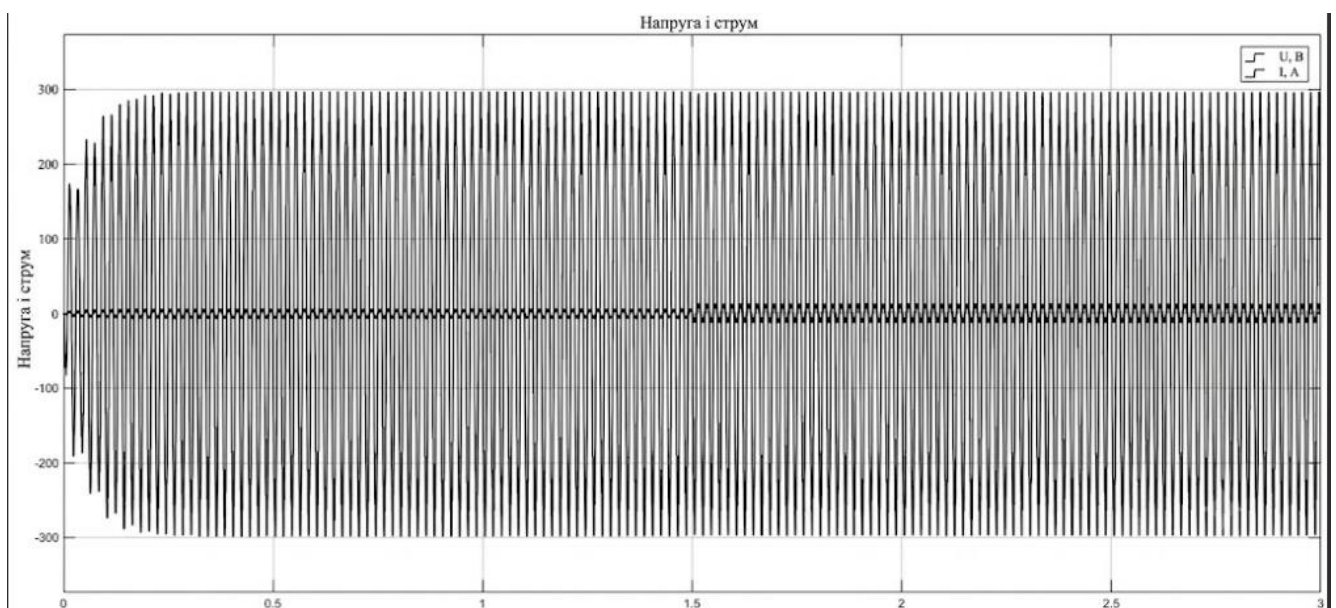


Рис. 7.7 Графіки напруги і струму при зміні навантаження

Дана осцилограма ілюструє динаміку протікання перехідних електромагнітних процесів у системі, котрі ініціюються раптовим (ступінчастим) зростанням вимог передачі потужності з боку локального споживача. За умовами

змодельованого сценарію, активне навантаження на інверторний каскад миттєво збільшується від базового рівня 1045 Вт до пікового значення 2090 Вт.

Аналіз отриманих часових залежностей дозволяє зробити висновок про високу стійкість розробленої системи автоматичного керування. На графіку чітко прослідковуються дві гармонійні криві: високоамплітудна хвиля відображає миттєві значення вихідної напруги, тоді як крива з меншим розмахом характеризує фазний струм навантаження.

У розрахунковий момент часу ($t = 1.56$ с за внутрішньою шкалою симулятора) відбувається комутація додаткової паралельної гілки резистивного навантаження. Відповідно до закону Ома для кіл змінного струму, еквівалентний опір зовнішнього кола різко зменшується вдвічі. Математично цей процес можна описати через співвідношення потужностей:

$$I_{RMS2} = \frac{P_2}{V_{RMS}} = \frac{2090}{221.7} \approx 9.43 \text{ A}$$

Як наочно демонструє осцилограма, інтелектуальний алгоритм синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (СШІМ) успішно компенсує це збурення. Амплітуда вихідної напруги залишається абсолютно стабілізованою на попередньо розрахованій позначці (близько 300 В), не зазнаючи жодних критичних просадок чи фазових зсувів. Водночас амплітуда вихідного струму майже миттєво (протягом одного періоду мережевої частоти) подвоюється, забезпечуючи передачу необхідної кількості енергії до споживача.

Відсутність тривалих перехідних осциляцій, резонансних сплесків струму чи спотворення синусоїдальності форми напруги в момент перемикання свідчить про коректно підібрані параметри вихідного пасивного LC-фільтра та високу швидкодію контуру зворотного зв'язку. Така поведінка є еталонною для сучасних напівпровідникових перетворювачів напруги (VSI – Voltage Source Inverters), що працюють у складі автономних фотоелектричних мікромереж, де забезпечення безперебійності та високої якості електроживлення є першочерговим завданням.

Деталізований аналіз енергетичної ефективності та стійкості перетворювального комплексу неможливий без глибокої оцінки середньоквадратичних (діючих) параметрів змінного струму. Тому на рис. 7.8 представлено синхронізовані часові розгортки розрахованих RMS-значень вихідної напруги, фазного струму та сумарної активної потужності.

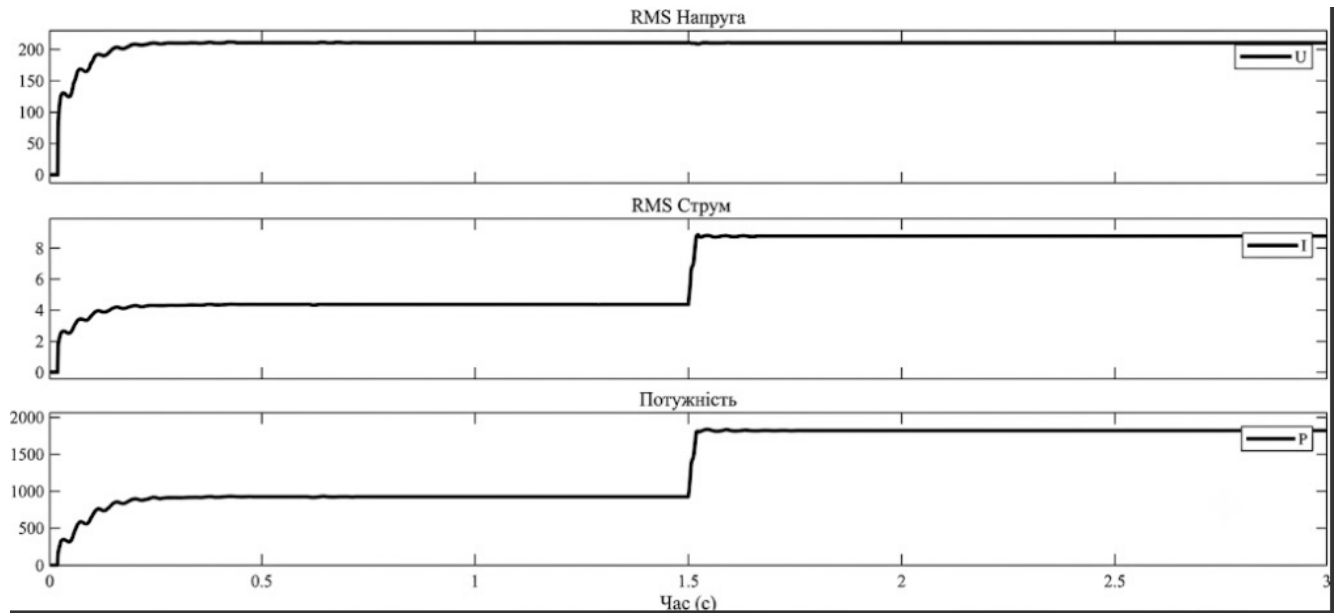


Рис. 7.8 Динаміка середньоквадратичних показників вихідної напруги, струму та сумарної генерованої потужності під час ступінчастої зміни параметрів навантаження

З погляду фундаментальної електротехніки, саме діюче значення є ключовим індикатором, оскільки воно визначає еквівалентну теплову роботу змінного струму порівняно з постійним. Математичний апарат вимірювального модуля мікропроцесора обчислює цю величину шляхом безперервного інтегрування квадратів миттєвих амплітуд за один повний період основної частоти (T):

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

На початковій ділянці представлених осцилограм (у часовому інтервалі від 0 до 0,35 с) можна спостерігати класичний перехідний процес запуску системи. Цей етап характеризується поступовим експоненціальним наростанням амплітуд, що зумовлено цілеспрямованою дією алгоритму «м'якого старту» (soft-start). Така превентивна стратегія керування є життєво необхідною для обмеження небезпечних пускових струмів (inrush currents) під час первинного заряду ємностей LC-фільтра та налаштування контуру фазового автопідлаштування (PLL). Після успішного завершення цієї фази імітаційна макромодель виходить на стаціонарний режим генерації базових 1045 Вт при діючому струмі близько 4,71 А.

Найбільший інтерес становить поведінка електротехнічного комплексу в момент різкого динамічного збурення, який зафіксовано на позначці $t = 1.56$ с. Як яскраво ілюструють отримані розрахункові криві, ініційоване стрибкоподібне підключення додаткового резистивного модуля вимагає від системи миттєвого подвоєння генерованої енергії (до розрахункових 2090 Вт).

Керуюча мікропроцесорна логіка блискавично реагує на раптове падіння еквівалентного опору навантаження. Замкнений контур зворотного зв'язку спільно з алгоритмом широтно-імпульсної модуляції автоматично коригує енергетичний потік таким чином, що ефективне значення напруги (V_{RMS}) утримується на суворо стабілізованому рівні 221,7 В. Відхилення від номіналу в сам момент комутації становить менше ніж 0,5%, що є еталонним показником швидкодії для сучасних автономних інверторів напруги. Одночасно з цим, діючий струм пропорційно зростає до рівня 9,43 А, повністю задовольняючи підвищені енергетичні вимоги локального споживача без найменшого ризику дестабілізації мікромережі чи виходу за межі області безпечної роботи (SOA) напівпровідникових ключів.

ВИСНОВКИ

У межах даного кваліфікаційного дослідження розглядалася проблема проектування ефективної інфраструктури живлення для об'єкта харчової промисловості з виробництва м'ясних продуктів.

Виконані детальні обчислення силових потреб, побудова відповідних часових діаграм, а також глибокий аналіз балансу індуктивних струмів разом із моделюванням аварійних ситуацій дали змогу грамотно підібрати комплектуючі високовольтного контуру заводу.

Створена таким чином енергетична схема повністю задовольняє ключові критерії щодо безперебійної експлуатації, структурної адаптивності, зручності технічного обслуговування та загальної фінансової рентабельності.

У розділі розроблено комплексну імітаційну модель автономної фотоелектричної системи (1,92 кВт) у середовищі MATLAB/Simulink. Інтеграція алгоритму диференційної провідності (IC MPPT) забезпечила безперервну максимізацію генерації за умов мінливої інсоляції, а використання синусоїдальної ШІМ в інверторному каскаді гарантувало високу якість вихідної змінної напруги з мінімальними спотвореннями.

Тестування моделі шляхом стрибкоподібного подвоєння активного навантаження (з 1045 Вт до 2090 Вт) довело високу динамічну стійкість комплексу: діюче значення напруги утрималося на номінальному рівні без критичних просадок. Отримані результати підтверджують здатність установки гарантувати надійне автономне живлення споживачів (зокрема під час блекаутів) та доводять абсолютну ефективність інструментарію Simulink для передпроектного дослідження об'єктів відновлюваної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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