

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

_____ Петро ПЛЄШКОВ

«__-__» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

«Розробка системи електропостачання промислового об'єкта целюлозно-паперового профілю»

Виконав здобувач вищої освіти

III курсу, групи ЕЕ-23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Вадим РУСС

«__-__» _____ 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

Русса Вадима Олександровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розробка системи електропостачання промислового об'єкта целюлозно-паперового профілю

Development of a power supply system for an industrial facility of the pulp and paper industry

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

3. Строк подання роботи до захисту 01.06.2026 р.

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

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Дата видачі завдання
«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Валентин СОЛДАТЕНКО

Завдання прийнято до виконання
«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Вадим РУСС

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 88 с.; 19 рис.; 21 табл.; 5 джерел

Русс В. О. Розробка системи електропостачання промислового об'єкта целюлозно-паперового профілю. – Рукопис.

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

Робота присвячена питанням розробки системи електропостачання промислового об'єкта целюлозно-паперового профілю.

Здійснено комплексний аналіз енергоспоживання промислового майданчика із формуванням графічної моделі навантажень, що дозволило раціонально розташувати локальні трансформаторні пункти. Доведено техніко-економічну перевагу впровадження променевої архітектури живлення цехів із застосуванням вузлів взаємного дублювання. Розроблено оптимальний алгоритм генерування ємнісних струмів, завдяки якому вдалося суттєво знизити технологічні марнотрати та вивільнити резерви пропускної здатності магістралей. Базуючись на результатах математичного моделювання аварійних режимів, успішно підібрано й перевірено всю необхідну комутаційну апаратуру, засоби релейного захисту та силові провідники робочою напругою 10 кВ.

За допомогою середовища MATLAB/Simulink змодельовано автономну вітро-дизельну систему електропостачання. Досліджено її електромеханічні перехідні процеси та ефективність алгоритмів активного конденсаторного балансування акумуляторів. Результати симулювання підтверджують високу надійність, стійкість та енергоефективність розробленої гібридної топології.

Ключові слова: промислові електричні мережі, розрахунок навантажень, аварійні режими, силові трансформатори, кабельні лінії 10 кв, гібридна система електропостачання, імітаційне моделювання, вітро-дизельний комплекс, перехідні процеси, matlab/simulink

ABSTRACT

Qualification work: 88 p.; 19 Fig.; 21 tables; 5 sources

Russ V. Development of a power supply system for an industrial facility of the pulp and paper industry. – Manuscript.

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

The work is devoted to the development of a power supply system for an industrial facility of the pulp and paper industry.

A comprehensive analysis of the energy consumption of the industrial site was carried out with the formation of a graphical model of loads, which allowed rationally placing local transformer points. The technical and economic advantage of implementing a beam architecture for powering workshops using mutual redundancy nodes was proven. An optimal algorithm for generating capacitive currents was developed, thanks to which it was possible to significantly reduce technological waste and release reserves of highway capacity. Based on the results of mathematical modeling of emergency modes, all the necessary switching equipment, relay protection devices and power conductors with an operating voltage of 10 kV were successfully selected and tested.

An autonomous wind-diesel power supply system was simulated using the MATLAB/Simulink environment. Its electromechanical transients and the effectiveness of active capacitor balancing algorithms for batteries were investigated. The simulation results confirm the high reliability, stability, and energy efficiency of the developed hybrid topology.

Keywords: industrial electrical networks, load calculation, emergency modes, power transformers, 10 kV cable lines, hybrid power supply system, simulation modeling, wind-diesel complex, transient processes, matlab/simulink

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	8
1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ.....	9
1.2 Розрахунок освітлювальних електричних навантажень	11
1.3 Електричні навантаження в силових мережах вище 1 кВ	12
1.4 Графіки електричних навантажень паперового підприємства.....	18
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	23
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	26
3.1 Схема зовнішнього електропостачання підприємства.....	26
3.2 Архітектура внутрішніх електричних мереж заводу з виробництва паперу....	30
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	32
4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності	33
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв.....	35
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ЧИСЕЛЬНОСТІ ТА НОМІНАЛІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	44
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	46
6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень	46
6.2 Вибір та перевірка кабельних ліній розподільчої мережі 10 кВ.....	56
6.3 Підбір високовольтного комутаційного устаткування	58
6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	59
РОЗДІЛ 7. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ВІТРО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ	61
7.1 Синтез імітаційної моделі вітроенергетичної генераторної установки	62
7.2 Розробка та дослідження імітаційної моделі дизель-генераторної установки.	69
7.2.1. Моделювання контуру автоматичного регулювання збудження	71
7.2.2. Аналіз динамічних режимів та перехідних процесів дизель-генераторної установки	73
7.3 Математичне моделювання та імітаційне дослідження буферної системи накопичення енергії.	75
7.4 Алгоритмічне та структурне моделювання контурів керування зарядно-розрядними циклами акумуляторів	80
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Русс В.О.			Розробка системи електропостачання промислового об'єкта целюлозно- паперового профілю Development of a power supply system for an industrial facility of the pulp and paper industry	Лім.	Аркуш
Перев.		Солдатенко В.П.					Аркушів
							6
							88
Н. контр.		Солдатенко В.П.			ЦНТУ гр. ЕЕ-23мб		
Затвер.		Плешков П.Г.					

ВСТУП

Дана випускна робота зосереджена на проектуванні схеми електричного живлення заводу, що спеціалізується на виготовленні та обробці паперу.

Створення новітніх мереж енергозабезпечення для фабрик целюлозно-паперового комплексу нині набуває неабиякої ваги. Це зумовлено значними обсягами споживання електрики під час технологічних циклів, а також нагальною потребою оновлення фізично зношених електромереж.

Виробничі стадії виготовлення та рециклінгу макулатури вирізняються високим рівнем енергоємності, вимагаючи безперебійного постачання великих порцій як теплової, так і електричної енергії. Через це критично необхідним стає вдосконалення енергетичної інфраструктури заводів з метою нарощування її результативності, скорочення витрат на ресурси, застосування енергозберігаючих рішень, залучення альтернативної генерації, а також впровадження розумних комплексів автоматичного управління.

Проектування і подальша реалізація передових схем дасть змогу суттєво покращити показники безперебійності та загальну рентабельність енергопостачання. Серед ключових пріоритетів виділяється зменшення показників енергоємності робочих циклів на об'єктах паперової галузі. Реалізувати таку мету можливо за допомогою глибокої реконструкції наявних електромереж, застосовуючи високопродуктивні апарати разом із раціональним споживанням ресурсів.

З огляду на сучасний курс розвитку екологічно чистих технологій, надзвичайно доцільним кроком стає інтеграція нетрадиційної генерації (наприклад, вітрогенераторів, сонячних панелей тощо) у загальну інфраструктуру живлення таких підприємств. Це сприятиме суттєвому скороченню використання звичного викопного палива.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що гостра необхідність розробки модернізованих електромереж прямо впливає з потреби посилення показників продуктивності, безпеки функціонування та екологічної складової процесу енергозабезпечення підприємств паперової промисловості.

						Ар.
						7

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Визначення навантажень виступає критично значущим кроком під час створення або оновлення енергетичних мереж на будь-яких виробничих об'єктах.

Достовірний підрахунок діючої та безватної частин споживаної потужності для різнотипних приймачів (наприклад, моторів, джерел світла, технологічних машин) формує базу задля коректного підбору характеристик компонентів інфраструктури живлення, серед яких кабельні лінії, перетворювачі напруги, комутатори та захисні апарати.

Коректна оцінка пускових амперів, максимальних і періодичних напружень дає змогу спроектувати енергокомплекс із необхідним резервом задля стабільного функціонування заводу за будь-яких експлуатаційних умов.

Неточні обчислення у бік збільшення чи зменшення спричиняють зайві фінансові витрати або нестачу енергоресурсів, а це суттєво погіршує критерії загальної енергоефективності.

Глибоке розуміння діаграм та властивостей енергоспоживання стає фундаментом задля інтеграції автоматизованих комплексів управління ресурсами, що сприятимуть мінімізації грошових видатків.

Безпомилкове знаходження реактивних складових струму диктує потребу встановлення компенсуючих установок, а також їхню номінальну продуктивність.

Обчислення амперажу коротких замикань на окремих ділянках системи вимагається для правильного калібрування запобіжників і пошуку відповідних розмикачів.

Підсумовуючи, можна стверджувати: детальні підрахунки параметрів електроспоживання створюють основу для конструювання безперебійних, фінансово вигідних та безпечних мереж живлення промислових або цивільних будівель.

Зважаючи на це, стартову частину дипломного дослідження ми сфокусували на проблематиці обчислення величин енергопотреби для фабрики з виготовлення паперу.

						Ар.
						8

1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ

Як зразок, нижче продемонстровано алгоритм знаходження параметрів навантаження для відділення пресування у межах мережі до 1 кВ:

$$m = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{107,4}{4,55} = 23,6$$

$$P_{зм} = P_{сум} \cdot K_B = 1961 \cdot 0,656 = 1286,4 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \tan \varphi = 1286,4 \cdot 0,72 = 926,21 \text{ квар}$$

$$n_{ef} = \frac{2 \cdot P_{сум}}{P_{max}} = \frac{2 \cdot 1961}{107,4} \approx 37$$

Згідно [1] визначаємо $K_p = 1,11$.

Розрахункові активне та реактивне навантаження електроприймачів:

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 1286,4 \cdot 1,11 = 1427,9 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 926,21 \text{ квар}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{1427,9^2 + 926,21^2} = 1701,99 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Аналогічним методом здійснюють розрахунки енергоспоживання (до 1 кВ) для інших виробничих сегментів, а отримані підсумки зведено у таблицю 1.1, що розміщена далі.

						Ар.
						9

Таблиця 1.1. Силлові електричні навантаження до 1 кВ для 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, кВт	max, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
1	Лінія виробництва паперу №1	91	3	55,7	2735	18,3	0,65	0,85	0,62	1778	1101,93	91	1,1	1900,9	1101,9	2197,2
2	Лінія виробництва паперу №2	91	3	55,7	2729	18,3	0,65	0,85	0,62	1774,1	1099,48	91	1,1	1896,7	1099,5	2192,3
3	Лінія виробництва паперу №3	103	5,1	142	3243	28	0,6	0,85	0,62	1946,1	1206,07	46	1,1	2177,4	1206,1	2489,1
4	Лінія виробництва паперу №4	51	5,1	55,7	1523	11	0,6	0,85	0,62	913,84	566,35	51	1,1	1016,3	566,35	1163,5
5	Блок папероробних агрегатів №5-7	101	5,1	55,7	2130	11	0,6	0,85	0,62	1278,2	792,13	77	1,1	1392	792,13	1601,6
6	Відділення підготовки кислот	10	30	121	607	4	0,51	0,8	0,75	309,67	232,25	10	1,4	423,73	255,48	494,8
7	Ділянка обробки сировини	16	5,1	10,1	157	2	0,24	0,5	1,73	37,65	65,2	16	1,6	58,55	65,2	87,64
8	Варильний підрозділ №1	26	5,1	30,4	309	6	0,34	0,7	1,02	104,94	107,07	20	1,4	143,91	107,07	179,37
9	Ділянка відбілювання целюлози	16	5,1	22,3	255	4,4	0,6	0,7	1,02	153,01	156,1	16	1,2	186,29	156,1	243,04
10	Варильний підрозділ №2	25	11	18,2	407	1,6	0,35	0,7	1,02	142,39	145,26	25	1,3	187,73	145,26	237,36
11	Станція генерації кисню	21	11	55,7	410	5	0,6	0,7	1,02	245,92	250,89	15	1,2	301,46	250,89	392,2
12	Відділення пресування	69	4,6	107	1961	23,6	0,66	0,81	0,72	1286,4	926,21	37	1,1	1427,9	926,21	1702
13	Підрозділ готової продукції	53	2,5	50,6	610	20	0,6	0,8	0,75	365,84	274,37	24	1,2	428,73	274,37	509,02
14	Сховище матеріалів №1	16	4,6	18,2	252	4	0,5	0,8	0,75	125,99	94,49	16	1,3	161,93	94,49	187,48
15	Насосна станція	12	3	18,2	155	6	0,6	0,7	1,02	92,9	94,77	12	1,3	116,87	94,77	150,46
16	Компресорний вузол	12	113	253	1530	2,2	0,6	0,7	1,02	918,09	936,64	12	1,3	1154,9	936,64	1487
17	Сховище матеріалів №2	13	2,5	7,6	53	3	0,5	0,8	0,75	26,57	19,93	13	1,3	35,14	19,93	40,39
18	Сховище матеріалів №3	15	2,5	11,1	62	4,4	0,5	0,8	0,75	30,87	23,14	11	1,4	41,87	23,14	47,84
19	Сховище матеріалів №4	9	2,5	15,2	43	6	0,5	0,8	0,75	21,51	16,13	6	1,5	32,73	17,74	37,23
	Всього	750	-	-	19171	-	-	-	-	11554	8114,9	##	1,1	12254	8114,9	14697

1.2 Розрахунок освітлювальних електричних навантажень

Нижче продемонстровано алгоритм знаходження потужності освітлювальних систем на прикладі приміщення, де функціонує лінія виробництва паперу №1 ($F = \text{м}^2, p_0 = \text{Вт/м}^2, K_{\text{п}} =, K_1 =, \cos \varphi =, \tan \varphi =$):

$$P_{\text{вст}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 1995 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 39,9 \text{ кВт}$$

$$P_p = K_{\text{п}} \cdot K_1 \cdot P_{\text{вст}} = 0,94 \cdot 1,21 \cdot 39,9 = 45,38 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \tan \varphi = 45,38 \cdot 0,484 = 21,96 \text{ квар}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{45,38^2 + 21,96^2} = 50,41 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Для решти виробничих ділянок здійснюється тотожна процедура обчислення. Підсумки цих математичних операцій структуровано у форматі таблиці 1.2, поданої далі.

						Арк.
						11

Таблиця 1.3. Електричні навантаження в силових мережах напругою вище 1 кВ

Назва	$N_{\text{спож}}$ шт	$P_{\text{одн.сп.}}$		$P_{\text{сум.}}$ кВт	m	$K_{\text{в}}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	Сер. зм. нав.		$n_{\text{сф}}$	$K_{\text{р}}$	Розрах. навантаж.		
		мін, кВт	макс, кВт						$P_{\text{зм}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{зм}}, \text{квар}$			$P_{\text{розр}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{розр}}, \text{квар}$	$S_{\text{розр}}, \text{кВА}$
ТП 1, 2, 3															
Лінія виробництва паперу №1															
силове:	91	3,04	55,7	2735	18,3	0,65	0,85	0,6	1778,03	1101,93	91	1,07	1900,88	1101,93	2197,17
освітлювальне:				39,9									45,38	21,96	
Всього:									1817,93	1101,93			1946,26	1123,89	2247,45
Лінія виробництва паперу №2															
силове:	91	3,04	55,7	2729	18,3	0,65	0,85	0,6	1774,09	1099,48	91	1,07	1896,66	1099,48	2192,3
освітлювальне:				49,02									55,76	26,99	
Всього:									1823,11	1099,48			1952,42	1126,47	2254,08
Ділянка обробки сировини															
силове:	16	5,06	10,1	157	2,0	0,24	0,50	1,7	37,65	65,2	16	1,56	58,55	65,2	87,64
освітлювальне:				7,42									8,44	4,08	
Всього:									45,07	65,2			66,99	69,28	96,39
Варильний підрозділ №1															
силове:	26	5,06	30,4	309	6,0	0,34	0,70	1	104,94	107,07	20	1,37	143,91	107,07	179,37
освітлювальне:				26,53									25,36	12,27	
Всього:									131,47	107,07			169,27	119,34	207,1
Ділянка відбілювання целюлози															
силове:	16	5,06	22,3	255	4,4	0,60	0,70	1	153,01	156,1	16	1,22	186,29	156,1	243,04
освітлювальне:				17,7									20,13	9,74	
Всього:									170,71	156,1			206,42	165,84	264,78
Варильний підрозділ №2															
силове:	25	11,1	18,2	407	1,6	0,35	0,70	1	142,39	145,26	25	1,32	187,73	145,26	237,36
освітлювальне:				37,06									35,43	17,15	
Всього:									179,45	145,26			223,16	162,41	275,99
Всього по ТП 1, 2, 3:															
силове:	265	3,04	55,7	6592	18,3	0,61	0,83	0,7	3990,11	2675,04	237	1,00	3990,11	2675,04	4803,83
освітлювальне:				177,65									190,52	92,2	
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 1, 2, 3:									4167,76	2675,04			4180,63	2767,24	5013,52
Втрати в трансформаторах:													46,54	243,33	

Продовж. табл. 1.3

Кількість трансформаторів: 6																
Номинальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_3 = 0,69$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 1, 2, 3:													4227,17	3010,57	5189,65	
ТП 4, 5, 6																
Лінія виробництва паперу №3																
силове:	103	5,06	142	3243	28,0	0,60	0,85	0,6	1946,08	1206,07	46	1,12	2177,38	1206,07	2489,1	
освітлювальне:				9,16									10,42	5,04		
Всього:									1955,24	1206,07			2187,8	1211,12	2500,66	
Блок папероробних агрегатів №5-7																
силове:	101	5,06	55,7	2130	11,0	0,60	0,85	0,6	1278,16	792,13	77	1,09	1392,03	792,13	1601,63	
освітлювальне:				27,02									30,73	14,87		
Всього:									1305,18	792,13			1422,76	807,01	1635,69	
Підрозділ готової продукції																
силове:	53	2,53	50,6	610	20,0	0,60	0,80	0,8	365,84	274,37	24	1,17	428,73	274,37	509,02	
освітлювальне:				20,81									23,67	11,46		
Всього:									386,64	274,37			452,39	285,83	535,12	
Сховище матеріалів №4																
силове:	9	2,53	15,2	43	6,0	0,50	0,80	0,8	21,51	16,13	6	1,52	32,73	17,74	37,23	
освітлювальне:				9,39									7,04	3,41		
Всього:									30,9	16,13			39,77	21,15	45,04	
Зовнішня територія проммайданчика																
освітлювальне:				28,54									31,96	55,35		
Всього:									28,54	0			31,96	55,35	63,92	
Всього по ТП 4, 5, 6:																
силове:	266	2,53	142	6026	56,0	0,60	0,84	0,6	3611,58	2288,71	85	1,08	3916,75	2288,71	4536,42	
освітлювальне:				94,93									103,82	90,15		
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 4, 5, 6:									3706,5	2288,71			4020,58	2378,86	4671,61	
Втрати в трансформаторах:													44,16	231,43		
Кількість трансформаторів: 6																
Номинальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_3 = 0,66$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 4, 5, 6:													4064,74	2610,29	4830,7	

ТП 7																
Відділення пресування																
силове:	69	4,55	107	1961	23,6	0,66	0,81	0,7	1286,4	926,21	37	1,11	1427,9	926,21	1701,99	
освітлювальне:				12,47									14,18	6,86		
Всього:									1300,75	926,21			1446,59	939,57	1724,94	
Всього по ТП 7:																
силове:	69	4,55	107	1961	23,6	0,66	0,81	0,7	1286,4	926,21	37	1,11	1427,9	926,21	1701,99	
освітлювальне:				12,47									14,18	6,86		
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 7:									1300,75	926,21			1446,59	939,57	1724,94	
Втрати в трансформаторах:													16,33	85,2		
Кількість трансформаторів: 2																
Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,71$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 7:													1462,93	1024,77	1786,14	
ТП 8																
Насосна станція																
силове:	12	3,04	18,2	155	6,0	0,60	0,70	1	92,9	94,77	12	1,26	116,87	94,77	150,46	
освітлювальне:				5,65									6,43	3,11		
Всього:									98,55	94,77			123,3	97,88	157,41	
Компресорний вузол																
силове:	12	113	253	1530	2,2	0,60	0,70	1	918,09	936,64	12	1,26	1154,89	936,64	1486,96	
освітлювальне:				14,99									15,6	7,55		
Всього:									933,08	936,64			1170,49	944,19	1503,84	
Всього по ТП 8:																
силове:	24	3,04	253	1685	83,3	0,6	0,7	1	1010,99	1031,41	13	1,25	1259,58	1031,41	1627,98	
освітлювальне:				20,63									22,02	10,66		
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 8:									1031,62	1031,41			1281,6	1042,07	1651,79	
Втрати в трансформаторах:													13,88	72,97		
Кількість трансформаторів: 2																
Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,63$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 8:													1295,48	1115,03	1709,26	
ТП 9, 10																
Лінія виробництва паперу №4																

Продовж. табл. 1.3

силове:	51	5,06	55,7	1523	11	0,6	0,85	0,6	913,84	566,35	51	1,11	1016,33	566,35	1163,48
освітлювальне:				46,84									53,27	25,78	
Всього:									960,67	566,35			1069,6	592,13	1222,57
Відділення підготовки кислот															
силове:	10	30,4	121	607	4	0,5	0,8	0,8	309,67	232,25	10	1,37	423,73	255,48	494,8
освітлювальне:				13,06									12,33	5,97	
Всього:									322,74	232,25			436,06	261,45	508,44
Станція генерації кисню															
силове:	21	11,1	55,7	410	5,0	0,60	0,70	1	245,92	250,89	15	1,23	301,46	250,89	392,2
освітлювальне:				10,86									12,35	5,98	
Всього:									256,78	250,89			313,81	256,87	405,55
Сховище матеріалів №1															
силове:	16	4,55	18,2	252	4,0	0,50	0,80	0,8	125,99	94,49	16	1,29	161,93	94,49	187,48
освітлювальне:				22,97									17,23	8,34	
Всього:									148,96	94,49			179,16	102,83	206,58
Сховище матеріалів №2															
силове:	13	2,53	7,6	53	3,0	0,50	0,80	0,8	26,57	19,93	13	1,32	35,14	19,93	40,39
освітлювальне:				8,25									6,09	2,95	
Всього:									34,81	19,93			41,23	22,87	47,15
Сховище матеріалів №3															
силове:	15	2,53	11,1	62	4,4	0,50	0,80	0,8	30,87	23,14	11	1,36	41,87	23,14	47,84
освітлювальне:				13,02									9,61	16,64	
Всього:									43,89	23,14			51,48	39,79	65,06
Всього по ТП 9, 10:															
силове:	126	2,53	121	2907	48,0	0,57	0,81	0,7	1652,85	1187,05	48	1,13	1862,83	1187,05	2208,89
освітлювальне:				115,01									110,91	65,67	
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 9, 10:															
Втрати в трансформаторах:															
Кількість трансформаторів: 3															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: Кз = 0,65															
Всього на шинах 10 кВ ТП 9, 10:															
													1995,29	1365,8	2417,96

Продовж. табл. 1.3

Підсумкові показники по об'єкту																
силове:	750	2,53	253	19171	100,0	0,60	0,82	0,7	11553,8	8114,9	152	1,06	12253,97	8114,9	14697,33	
освітлювальне:				420,66									441,41	265,5		
Всього:									11974,5	8114,9			12695,43	8380,45	15212,03	
Втрати в трансформаторах:													142,47	746		
Всього по об'єкту (з втратами):													12837,9	9126,45	15751,3	
Високовольтне навантаження																
СД	2	630	630	1260		0,69	0,91	0,5	879,83	400,86			879,83	-400,86	966,84	
Всього високовольтного:													879,83	-400,86	966,84	
Всього по об'єкту 10 кВ:													13717,73	8725,59	16257,68	
$\tan\phi=0,64$																
Попереднє значення Q'кп														-6667,97		
Всього з урахуванням попередн. комп.													13717,73	2057,66	13871,2	

1.4 Графіки електричних навантажень паперового підприємства

Обчислення характеристик добових кривих електроспоживання та їхніх ключових показників здійснено, спираючись на алгоритми з джерела [1]. Здобуті підсумки структуровано і подано у форматі таблиць 1.4–1.6, а також проілюстровано графічним матеріалом на рисунках 1.1–1.5.

Таблиця 1.4. Відсоткові дані для розрахунку графіків навантажень.

№	Роб. дні		Вих.дні	
	P, %	Q, %	P, %	Q, %
1	76,9	92,1	29,3	56,7
2	61,7	82	29,3	56,7
3	46,6	68,8	29,3	56,7
4	46,6	68,8	29,3	56,7
5	41,5	63,8	29,3	56,7
6	51,6	69,8	29,3	56,7
7	46,6	68,8	29,3	56,7
8	82	88	29,3	56,7
9	87	94,1	26,3	51,6
10	100,2	84	26,3	51,6
11	84	92,1	26,3	51,6
12	80	88	26,3	51,6
13	83	92,1	26,3	51,6
14	94,1	97,2	26,3	51,6
15	101,2	101,2	26,3	51,6
16	82	91,1	26,3	51,6
17	61,7	81	26,3	51,6
18	76,9	87	27,3	51,6
19	80	88	27,3	53,6
20	80	88	27,3	53,6
21	76,9	87	29,3	56,7
22	80	88	29,3	56,7
23	84	90,1	29,3	56,7
24	76,9	90,1	29,3	56,7

Таблиця 1.5. Розрахунок графіків електричних навантажень

№	Зим. дні						Літн. дні					
	Роб. дні			Вих. і дні			Роб. дні			Вих. і дні		
	$P_{\text{д}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{д}}, \text{квар}$	$S_{\text{д}}, \text{кВА}$	$P_{\text{д}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{д}}, \text{квар}$	$S_{\text{д}}, \text{кВА}$	$P_{\text{д}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{д}}, \text{квар}$	$S_{\text{д}}, \text{кВА}$	$P_{\text{д}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{д}}, \text{квар}$	$S_{\text{д}}, \text{кВА}$
1	10426	1872	10593	3978	1152	4141	8862	1592	9004	3381	980	3520
2	8368	1667	8532	3978	1152	4141	7112	1417	7252	3381	980	3520
3	6310	1399	6463	3978	1152	4141	5364	1189	5494	3381	980	3520
4	6310	1399	6463	3978	1152	4141	5364	1189	5494	3381	980	3520
5	5625	1296	5772	3978	1152	4141	4781	1102	4906	3381	980	3520
6	6996	1420	7139	3978	1152	4141	5947	1206	6068	3381	980	3520
7	6310	1399	6463	3978	1152	4141	5364	1189	5494	3381	980	3520
8	11112	1790	11255	3978	1152	4141	9445	1521	9566	3381	980	3520
9	11797	1914	11951	3566	1049	3717	10028	1626	10158	3032	892	3160
10	13580	1707	13687	3566	1049	3717	11544	1451	11635	3032	892	3160
11	11386	1872	11539	3566	1049	3717	9678	1592	9808	3032	892	3160
12	10836	1790	10983	3566	1049	3717	9211	1521	9336	3032	892	3160
13	11248	1872	11403	3566	1049	3717	9561	1592	9693	3032	892	3160
14	12757	1975	12909	3566	1049	3717	10844	1679	10973	3032	892	3160
15	13718	2057	13871	3566	1049	3717	11660	1749	11791	3032	892	3160
16	11112	1852	11265	3566	1049	3717	9445	1574	9576	3032	892	3160
17	8368	1646	8528	3566	1049	3717	7112	1399	7249	3032	892	3160
18	10426	1769	10574	3704	1049	3850	8862	1504	8989	3148	892	3272
19	10836	1790	10983	3704	1090	3861	9211	1521	9336	3148	927	3282
20	10836	1790	10983	3704	1090	3861	9211	1521	9336	3148	927	3282
21	10426	1769	10574	3978	1152	4141	8862	1504	8989	3381	980	3520
22	10836	1790	10983	3978	1152	4141	9211	1521	9336	3381	980	3520
23	11386	1831	11533	3978	1152	4141	9678	1556	9802	3381	980	3520
24	10426	1831	10586	3978	1152	4141	8862	1556	8998	3381	980	3520

Р, кВт
Q, кВар

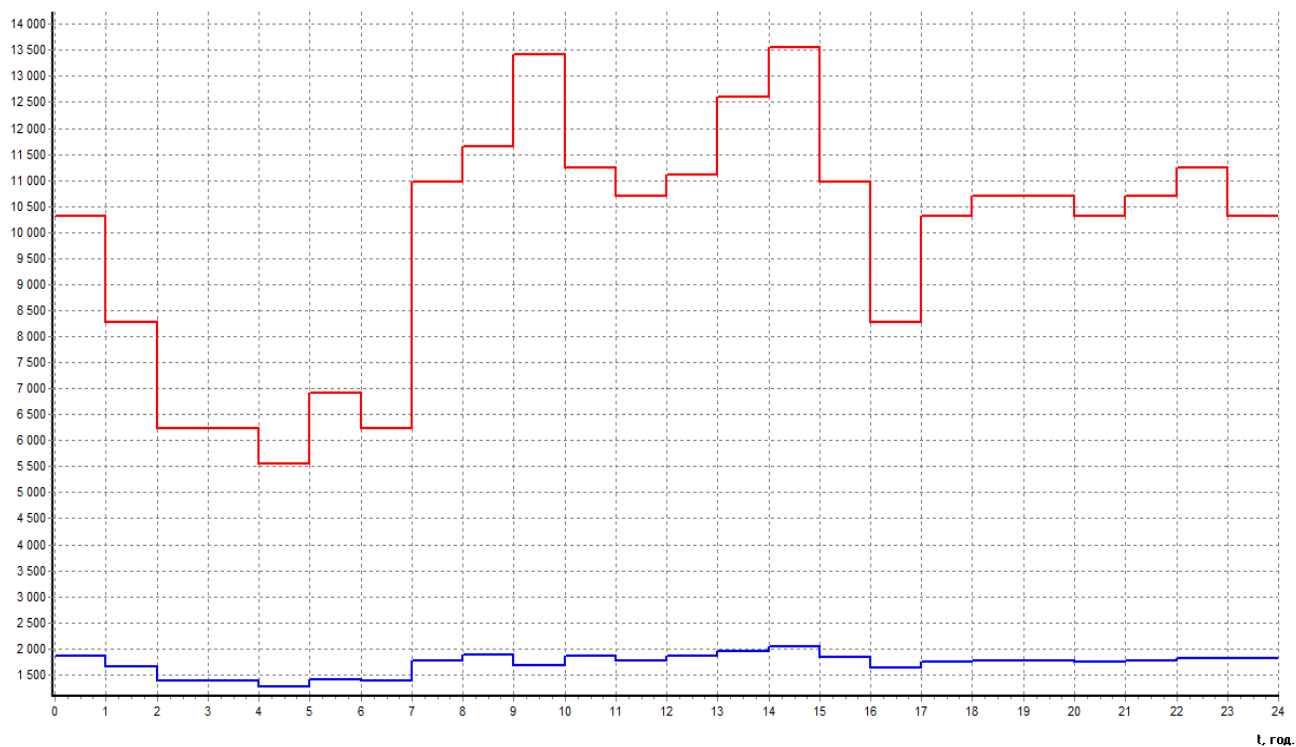


Рисунок 1.1. Ілюстрація добової динаміки потужностей P і Q протягом робочих зимових днів

Р, кВт
Q, кВар

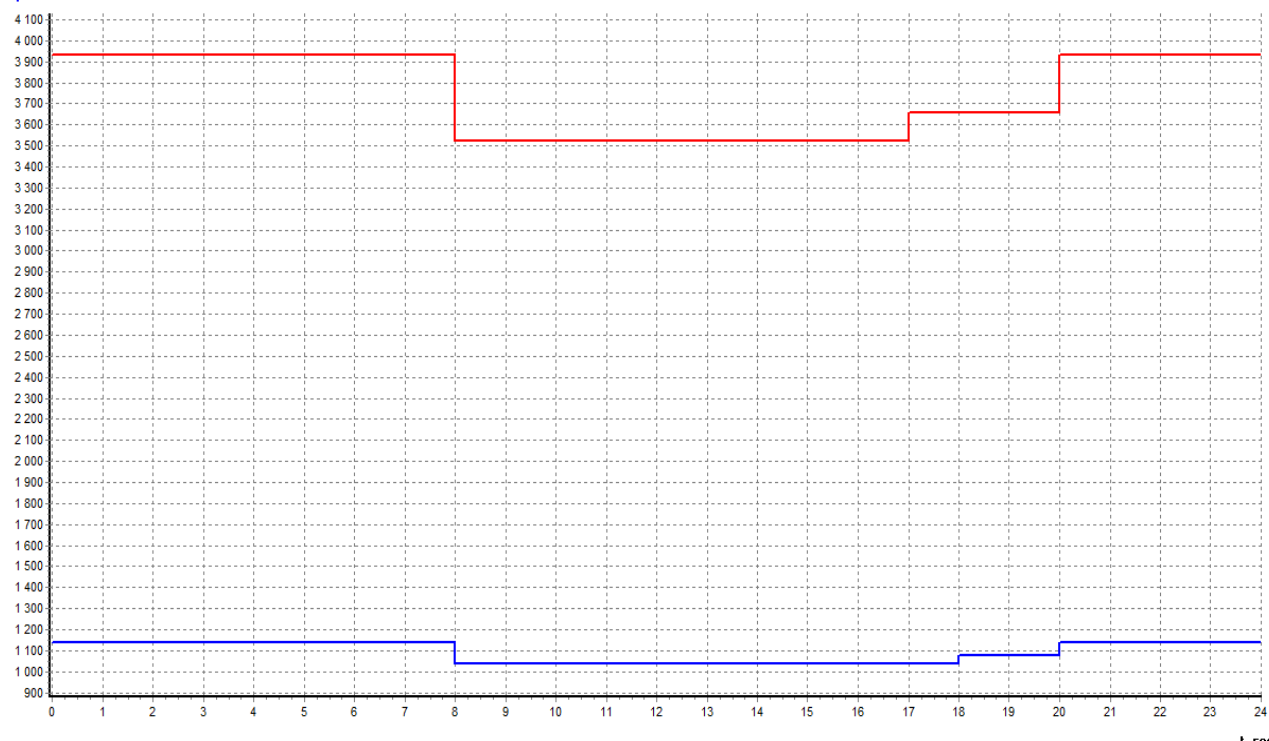


Рисунок 1.2. Ілюстрація добової динаміки потужностей P і Q протягом вихідних зимових днів

Ар.

20

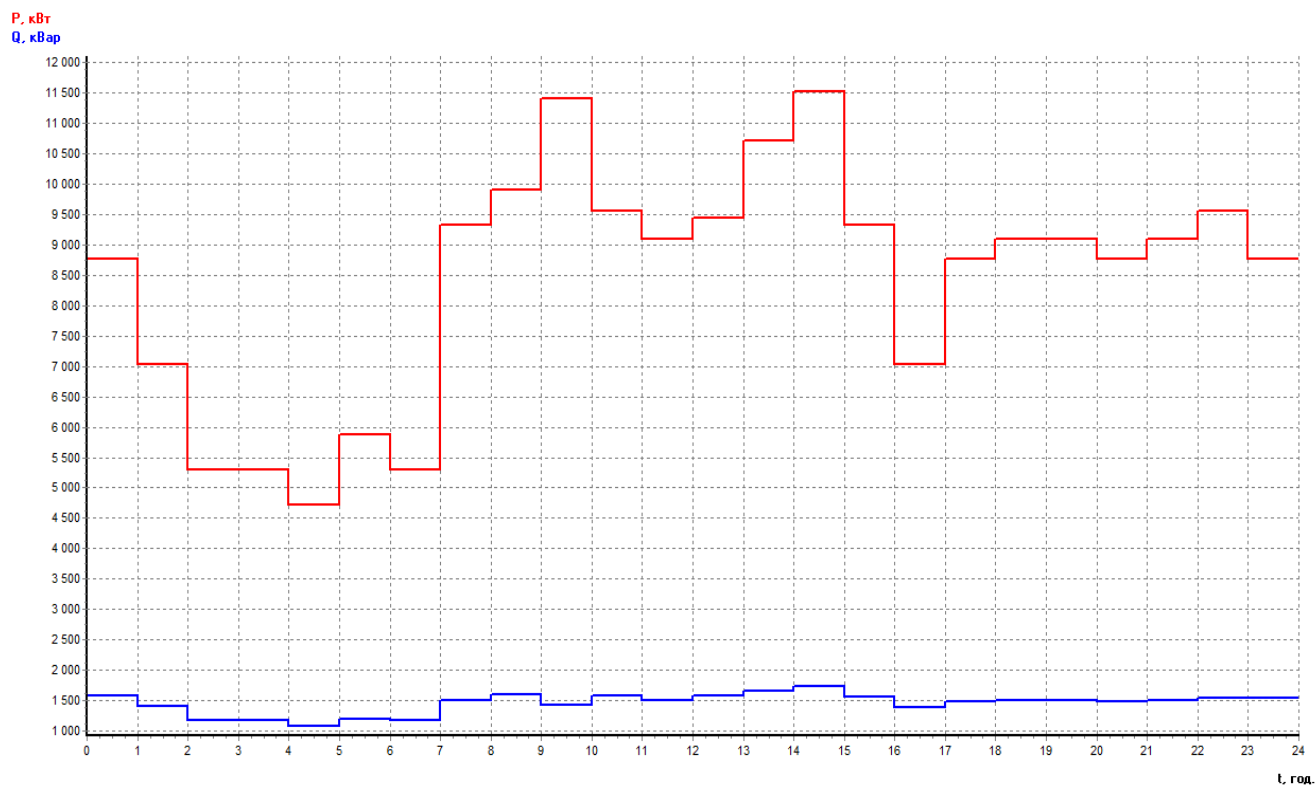


Рисунок 1.3. Ілюстрація добової динаміки потужностей P і Q
протягом робочих літніх днів

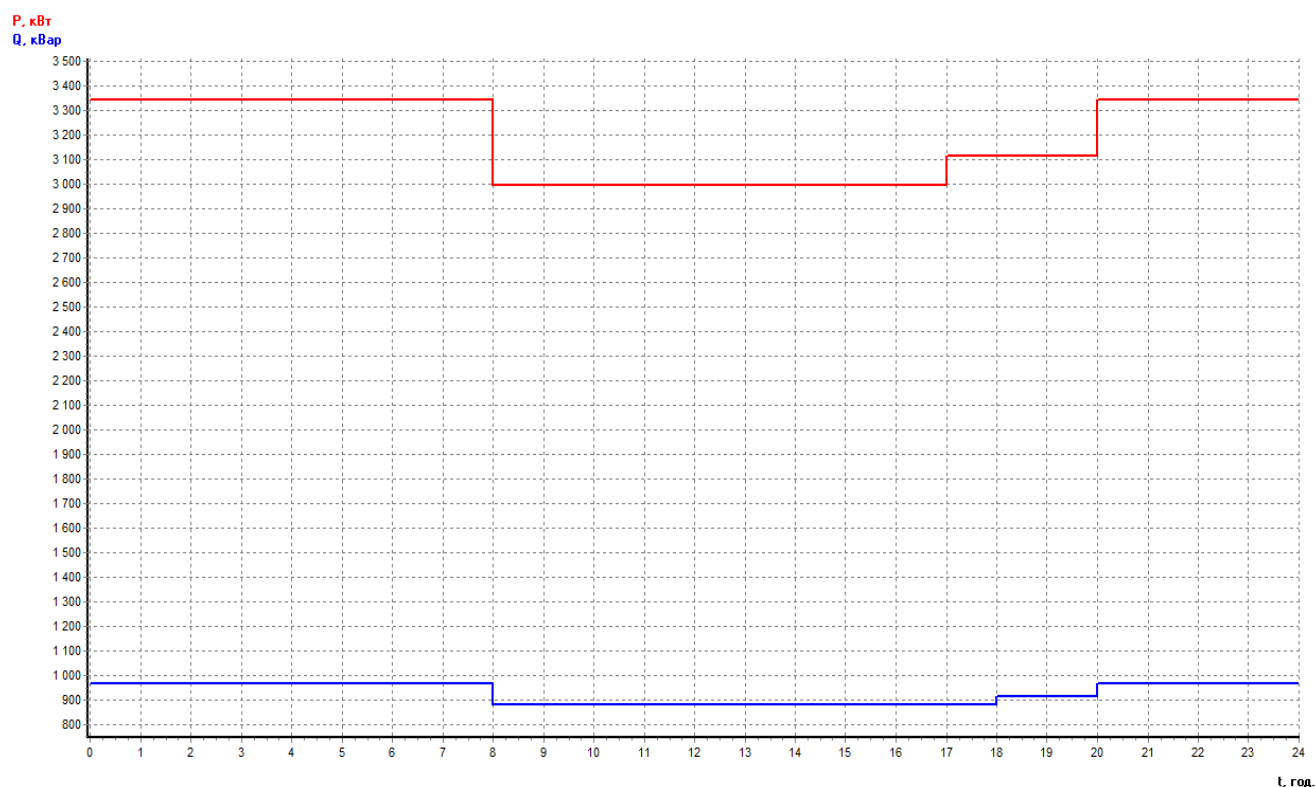


Рисунок 1.4. Ілюстрація добової динаміки потужностей P і Q
протягом вихідних літніх днів

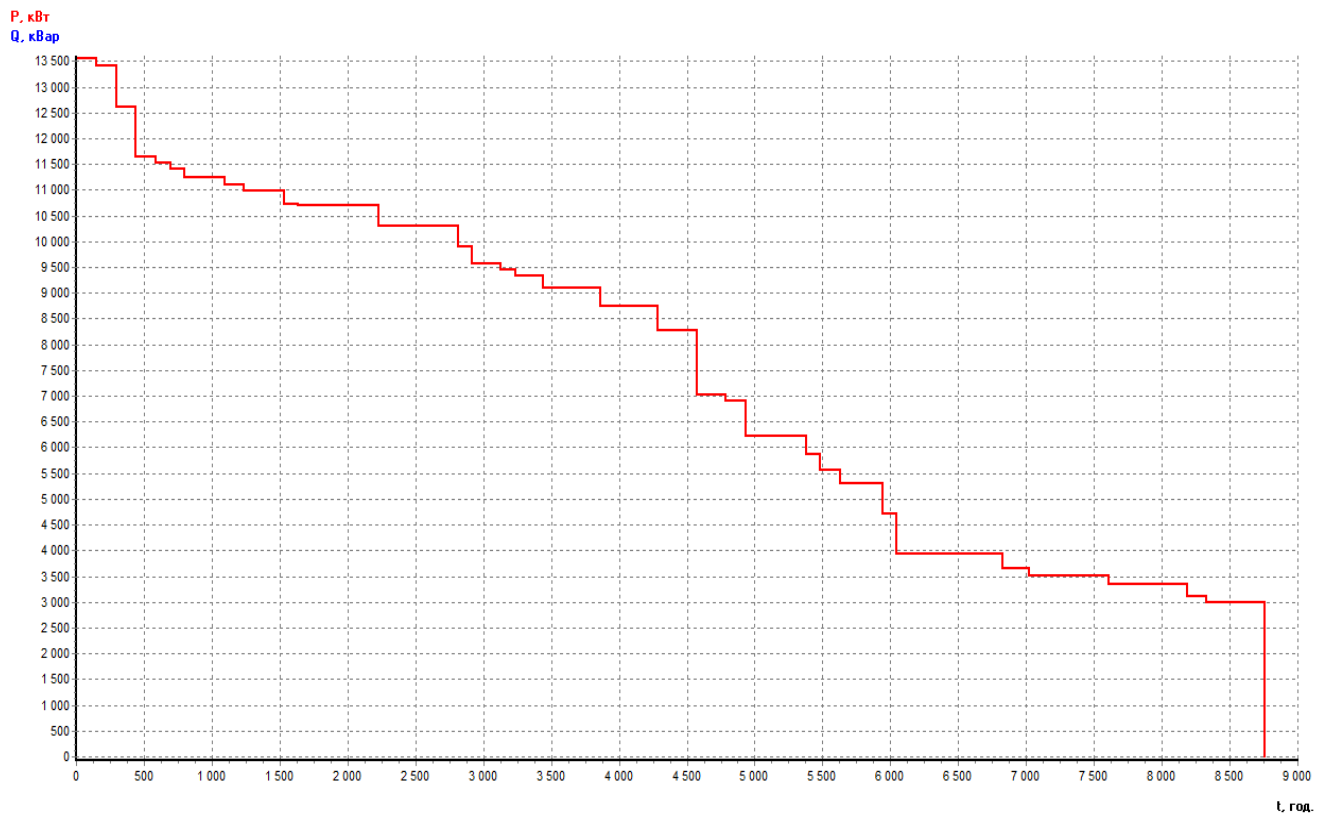


Рисунок 1.5. Ілюстрація річного графіка активної потужності за тривалістю

Таблиця 1.6 Розрахункові величини графіків навантаження

№	Назва параметру	Знач.	Од. вим.
1	$S_{\text{розр}}$	13871,09	МВА
2	$W_{\text{з.р.}}$	35490330	кВт·год
3	$V_{\text{з.р.}}$	6100067	квар·год
4	$W_{\text{з.в.}}$	5911517	кВт·год
5	$V_{\text{з.в.}}$	1722120	квар·год
6	$W_{\text{л.р.}}$	21547934	кВт·год
7	$V_{\text{л.р.}}$	3703480	квар·год
8	$W_{\text{л.в.}}$	3710672	кВт·год
9	$V_{\text{л.в.}}$	1081205	квар·год
10	$W_{\text{річн.}}$	66660453	кВт·год
11	$V_{\text{річн.}}$	12606873	квар·год
12	$T_{\text{м}}$	4949,59	год
13	$\tau_{\text{м}}$	3332,214	год

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

План-схема енергоспоживання (картограма) являє собою візуальне відображення просторового розподілу потужностей безпосередньо на кресленні або генеральному плані обраного об'єкта (промислового майданчика, окремого цеху тощо). У межах цього документа будь-який споживач струму (освітлювальні прилади, приводні механізми чи технологічні апарати) позначається кругом. Його площа строго пропорційна номінальній величині відповідного навантаження.

Подібні креслення дають можливість чітко побачити локалізацію головних енерговузлів, а також просторово оцінити розміщення активної і реактивної складових струму. Крім того, вони допомагають прокласти орієнтовні маршрути підключення від трансформаторів та попередньо прикинути товщину струмопровідних жил повітряних або кабельних магістралей.

Такі графічні моделі слугують чудовим інструментом задля вивчення обсягів споживання та пошуку найкращої архітектури електромережі під час її створення чи подальшої модернізації. Завдяки їхньому застосуванню вдається суттєво зменшити фінансові вкладення у монтаж трас, скоротити енергетичні втрати та комплексно вирішити супутні проблеми ефективності.

За допомогою картограм стає значно простіше виконувати багатофакторне порівняння різноманітних алгоритмів енергозабезпечення, зіставляти конкуруючі варіанти проходження кабелів, а також раціонально обґрунтовувати номінали силових перетворювачів.

Зразок розрахунку ключових параметрів для нанесення кіл продемонстровано на базі підрозділу Лінія виробництва паперу №1:

$$R_1 = \sqrt{\frac{P_1}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{P_{\text{сил.1}} + P_{\text{осв.1}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{1900,88 + 45,38}{3,14 \cdot 0,50}} = 35,21 \text{ мм}$$

						Ар.
						23

$$\alpha_1 = \frac{P_{\text{OСБ.1}} \cdot 360^\circ}{P_1} = \frac{45,38 \cdot 360^\circ}{1946,26} = 8,39^\circ$$

Обчислення відповідних характеристик стосовно решти виробничих ділянок систематизовано всередині табл. 2.1.

Точка концентрації електричних навантажень розміщується за такими координатами:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{4242048}{14357,32} = 295,46 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{1853519}{14357,32} = 129,10 \text{ М}$$

Отже, отримані просторові координати головного енергетичного ядра ($X = 295,46$ м, $Y = 129,10$ м) фізично збігаються із зоною розміщення виробничих корпусів заводу. Зважаючи на цей факт, оптимальну точку підключення доцільно перенести ближче до джерела зовнішньої магістралі. Це дозволить уникнути небажаних зустрічних перетікань струму. Остаточна локація головної підстанції відображена на генеральному плані об'єкта.

Таблиця 2.1. Результати розрахунку картограми електричних навантажень

№ п/п	Найменування	$P_{P, \text{силь}}$ кВт	$P_{P, \text{осв}}$ кВт	P_p , кВт	m	R , мм	a	x , м	y , м	$P \cdot x$, кВт · м	$P \cdot y$, кВт · м
1	Лінія виробництва паперу №1	1900,88	45,38	1946,26	0,50	35,21	8,39	207,30	77,70	403460,00	151224,00
2	Лінія виробництва паперу №2	1896,66	55,76	1952,42	0,50	35,26	10,28	471,20	119,00	919980,00	232338,00
3	Лінія виробництва паперу №3	2177,38	10,42	2187,80	0,50	37,33	1,71	260,30	72,90	569484,00	159491,00
4	Лінія виробництва паперу №4	1016,33	53,27	1069,60	0,50	26,10	17,93	348,10	79,30	372328,00	84819,00
5	Блок папероробних агрегатів №5-7	1392,03	30,73	1422,76	0,50	30,10	7,78	421,00	40,50	598982,00	57622,00
6	Відділення підготовки кислот	423,73	12,33	436,06	0,50	16,66	10,18	418,60	86,60	182535,00	37763,00
7	Ділянка обробки сировини	58,55	8,44	66,99	0,50	6,53	45,35	435,60	175,70	29181,00	11770,00
8	Варильний підрозділ №1	143,91	25,36	169,27	0,50	10,38	53,94	357,80	229,90	60565,00	38915,00
9	Ділянка відбілювання целюлози	186,29	20,13	206,42	0,50	11,47	35,11	117,40	365,10	24234,00	75364,00
10	Варильний підрозділ №2	187,73	35,43	223,16	0,50	11,92	57,15	117,40	250,20	26199,00	55835,00
11	Станція генерації кисню	301,46	12,35	313,81	0,50	14,14	14,17	314,10	168,40	98568,00	52846,00
12	Відділення пресування	1427,90	14,18	1442,08	0,50	30,31	3,54	355,40	180,50	512515,00	260295,00
13	Підрозділ готової продукції	428,73	23,67	452,40	0,50	16,97	18,83	355,40	156,30	160783,00	70710,00
14	Сховище матеріалів №1	161,93	17,23	179,16	0,50	10,68	34,61	55,10	274,50	9872,00	49179,00
15	Насосна станція	116,87	6,43	123,30	0,50	8,86	18,77	55,10	250,20	6794,00	30849,00
16	Компресорний вузол	1154,89	15,60	1170,49	0,50	27,30	4,80	70,40	193,50	82402,00	226490,00
17	Сховище матеріалів №2	35,14	6,09	41,23	0,50	5,12	53,18	223,40	345,70	9211,00	14253,00
18	Сховище матеріалів №3	41,87	9,61	51,48	0,50	5,73	67,20	117,40	274,50	6044,00	14131,00
19	Сховище матеріалів №4	32,73	7,04	39,77	0,50	5,03	63,73	119,00	218,60	4733,00	8694,00
20	Зовнішня територія проммайданчика	0,00	31,96	31,96	0,50	4,51	360,00	55,10	225,90	1761,00	7220,00
21	СД 10,5 кВ у насосній станції	879,83	0,00	879,83	0,50	23,67	0,00	184,60	242,90	162417,00	213711,00
Всього по заводу		13936,7	420,7	14357,3	-	-	-	-	-	4242048,0	1853519,0

РОЗДІЛ 3

Спираючись на глибоке інженерно-вартісне дослідження, знаходиться найкраща структура енергозабезпечення. Це досягається завдяки зважуванню сильних і слабких сторін усіх запропонованих рішень. В якості критерію для прийняття остаточного рішення часто використовують найменші значення приведених видатків. Правильно підібрана конфігурація ліній гарантує стабільне і цілком безпечне функціонування струмопровідних магістралей об'єкта, паралельно зводячи до мінімуму як стартові, так і щоденні фінансові затрати.

Аналізована фабрика має можливість отримувати електроенергію від системного трансформаторного вузла 110/10 кВ, віддаленого на 8,64 км. Доцільно проаналізувати дві альтернативи підведення зовнішньої напруги:

- застосування підземних кабелів 10 кВ;
- використання повітряних магістралей 110 кВ спільно зі спорудженням

На рис. 3.1 приведено два можливих варіанти схеми електропостачання.

						Ap.
						26

Таблиця 3.2. Поточні витрати для першого варіанту енергозабезпечення

Назва елемента схеми	К _і , тис.грн.	Р _{аі} , %	С _{аі} , тис.грн.	Р _{еі} , %	С _{еі} , тис.грн.	С _і , тис.грн.
КЛ 10 кВ	54432,00	5	2721,60	5	2721,60	5443,20
Траншея	3888,00	5	194,40	5	194,40	388,80
Шафи КРП серії КУ-10 Ц	2660,00	15	399,00	5	133,00	532,00
Всього						6364,00

З урахуванням параметрів надійності елементів системи зовнішнього електропостачання проведемо розрахунок грошового вираження збитку, який виникає внаслідок порушення електропостачання внаслідок технічних відмов елементів системи електропередачі:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,004 + 2,0736 = 2,0776 \text{ 1/рік}$$

$$T_B = \frac{\sum \lambda_i \cdot t_{Bi}}{\sum \lambda_i} = \frac{0,004 \cdot 0,00045 + 2,0736 \cdot 0,00179403}{2,0776} = 0,00179144 \text{ рік}$$

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

$$K_a = \sum \lambda_i \cdot T_B = 2,0776 \cdot 0,00179144 = 0,003722$$

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2K_{\Pi}^2 = 0,003722^2 + 2 \cdot 0,0024^2 = 0,000013853 + 0,000011520 = 0,000025373$$

$$T_a = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,000025373 \cdot 8760 = 0,2223 \text{ год}$$

$$Y_1 = Y_0 \cdot P_{cp} \cdot T_a = 69,02 \cdot 11,97 \cdot 0,2223 = 183,66 \text{ тис. грн.}$$

						Ар.
						29

Підсумкові приведені видатки для першого способу підключення становлять:

$$Z_1 = E_n \cdot K_1 + C_1 + C_{\text{втр.1}} + Y_1 = 0,12 \cdot 60980,00 + 6364,00 + 9479,29 + 183,66 \\ = 23344,55 \text{ тис. грн/рік}$$

Спираючись на аналогічний алгоритм, проведено необхідні обчислення стосовно другої конфігурації енергозабезпечення. Зіставлення отриманих результатів виконано у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Техніко-економічні показники варіантів схеми електропостачання

<i>Показники</i>	<i>Варіант 1 (КЛ 10 кВ)</i>	<i>Варіант 2 (ПЛ 110 кВ + ПС)</i>
Капітальні вкладення, тис. грн.	60980,00	65600,00
Поточні витрати, тис. грн.	6364,00	10960,00
Вартість втрат електроенергії, тис. грн.	9479,29	3495,00
Збиток, тис. грн.	183,66	40,05
Зведені витрати, тис. грн.	23344,55	22367,05

Аналізуючи дані табл. 3.3, стає цілком зрозуміло, що доцільніше впроваджувати другу конфігурацію, оскільки саме вона вимагає відчутно менших приведених фінансових затрат на реалізацію.

3.2 Архітектура внутрішніх електричних мереж заводу з виробництва паперу

Під час визначення оптимальної моделі передачі струму всередині виробничих комплексів традиційно аналізують декілька класичних просторових структур.

Радіальна топологія є найбільш елементарним підходом. У цьому випадку кожен окремий споживач підключається власною незалежною лінією безпосередньо до головного щита чи джерела живлення. До ключових плюсів

відносять надзвичайну легкість прокладання, зручне обслуговування та мінімальні початкові інвестиції. Головним мінусом виступає вразливість системи: пошкодження єдиного кабелю неминуче і повністю знеструмлює приєднане до нього обладнання.

Магістральна архітектура базується на використанні потужного центрального провідника, від якого монтуються відгалуження до конкретних приймачів. Зазвичай така структура живиться від кількох точок. Її перевагами вважаються покращена безперебійність завдяки дублюванню живлення та здатність відсікати аварійні ділянки. Серед недоліків варто виділити чималу ціну встановлення головних шин та ускладнений процес компенсації безватної енергії.

Комбінована конфігурація органічно поєднує елементи двох попередніх рішень. Великі струмопроводи тут слугують для об'єднання локальних груп, які підключені променевим способом. Сильними сторонами є відмінна надійність і здатність до легкої структурної трансформації. Слабким місцем залишається велика сумарна довжина прокладених трас і певні труднощі під час диспетчеризації.

Кільцева топологія формується шляхом створення замкнутого контуру живлення. Вона гарантує максимальний рівень стабільності постачання через двостороннє резервування шляхів струму та зручне блокування пошкоджених сегментів. Проте така модель вимагає серйозних капіталовкладень і відрізняється досить складними алгоритмами захисту.

Задля забезпечення енергією внутрішніх структурних підрозділів фабрики ми вирішили застосувати радіальну архітектуру. Такий крок продиктовано відносно короткими просторовими дистанціями між ГЗП та локальними ТП. Робоча напруга цієї розподільної ланки дорівнює 10 кВ.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Зниження обсягів втрат енергії виступає критично значущим кроком, спрямованим на покращення загальної результативності функціонування електричних комплексів виробничих та суміжних майданчиків. Цей процес передбачає нівелювання сплесків реактивного струму за допомогою встановлення відповідного спеціалізованого обладнання. Потреба у застосуванні таких засобів диктується специфікою роботи багатьох типів обладнання, які генерують індуктивну складову потужності. Наслідком цього стає збільшення струму, падіння напруги в лініях, а також виникнення зайвих втрат електроенергії.

Серед переваг впровадження подібних технологій варто виокремити: падіння обсягів розсіювання діючої потужності вздовж кабельних трас (іноді до сорока відсотків); стабілізацію номіналів напруги поблизу кінцевих споживачів та загальне зростання якісних показників живлення; розширення резервів пропускної здатності наявних провідників, що гарантує захист від імовірних перевантажень; мінімізацію теплових втрат усередині перетворювальних установок, що відчутно продовжує термін їхньої служби; скорочення фінансових видатків, пов'язаних із транзитом неактивних струмів та безпосередньою оплатою відповідних рахунків.

Зазвичай генерування необхідних ємнісних струмів виконують за допомогою конденсаторних установок, моторів синхронного типу або напівпровідникових тиристорних блоків. Таке устаткування приєднують паралельно до робочих мереж на території трансформаторних пунктів, вузлів розподілу чи безпосередньо поруч із найбільш енергоємними агрегатами. Пошук ідеальної локації для монтажу цих пристроїв завжди базується на виконанні детальних інженерних обчислень.

Підсумовуючи вищенаведене, раціональне керування безватною складовою дає змогу відчутно наростити енергетичну продуктивність інфраструктури живлення об'єкта, паралельно забезпечуючи збереження чималих фінансових ресурсів.

						Ар.
						32

4.1 Розрахунок балансу реактивної потужності

Вихідні параметри енергоспоживання, необхідні для розрахунку балансу реактивної потужності: $P_H = 12903$ кВт; $Q_H = 8380$ квар; $\Delta P_T = 143$ кВт; $\Delta Q_T = 746$ квар; ($P_B = 0$, $Q_B = 0$).

Знайдемо найбільше значення ємнісної енергії, яку здатний видавати синхронний мотор.

Обчислення параметрів балансу здійснюється за алгоритмом, наведеним у джерелі [1]:

$$Q_{CD} = P_{\text{НОМ}} \cdot \tan \varphi_{\text{НОМ}} = 630 \cdot 0,4556 = 287,03 \text{ квар}$$

$$P_{CD} = N \cdot P_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{ВИК}} = 2 \cdot 630 \cdot 0,69 = 869,40 \text{ кВт}$$

$$Q_{CD} = \frac{n \cdot P_{\text{НОМ.СД}} \cdot \tan \varphi_{\text{НОМ}}}{\eta_H} = \frac{2 \cdot 630 \cdot 0,4556}{0,957} = 599,85 \text{ квар}$$

$$Q_{CD.\text{max}} = \frac{n \cdot \alpha_M \cdot P_{\text{НОМ.СД}} \cdot \tan \varphi_{\text{НОМ}}}{\eta_H} = \frac{2 \cdot 1,27 \cdot 630 \cdot 0,4556}{0,957} = 761,81 \text{ квар}$$

$$P_p = P_H + \Delta P_T + P_B + P_{CD} = 12903 + 143 + 0 + 869,4 = 13915,40 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B - Q_{CD} = 8380 + 746 + 0 - 599,85 = 8526,15 \text{ квар}$$

$$Q_e = P_p \cdot \tan \varphi_c = 13915,40 \cdot 0,15 = 2087,31 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_e = 8526,15 - 2087,31 = 6438,84 \text{ квар}$$

						Ар.
						33

Для транзиту в мережу 0,4 кВ визначеного обсягу активної потужності знадобиться мінімально така кількість трансформаторів:

$$N_0 = \frac{P_H}{\beta \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{12903}{0,7 \cdot 1000} \approx 18,43 \Rightarrow 19 \text{ шт.}$$

Розглянемо перший сценарій компенсації, де кількість трансформаторів дорівнює розрахованому мінімуму ($N_T = N_0 = 19$). Розподіл генеруючих пристроїв виглядатиме так:

$$Q_1 = \sqrt{(N_1 \cdot \beta \cdot S_{\text{ном}})^2 - P_H^2} = \sqrt{(19 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 12903^2} = 3230,06 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КН}} = Q_H - Q_1 = 8380 - 3230,06 = 5149,94 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КВ}} = Q_p - Q_{\text{КН}} - Q_e = 8526,15 - 5149,94 - 2087,31 = 1288,90 \text{ квар}$$

За тотожною методикою здійснюються підрахунки номіналів для умов $N_T = N_0 + 1 = 20$ та $N_T = N_0 + 2 = 21$. Здобуті підсумки систематизовано всередині таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Розрахунки потужності компенсуючих пристроїв за варіантами компенсації реактивної потужності

№ варіанту	Кількість трансформаторів	Q_1 , квар	$Q_{\text{КН}}$, квар	$Q_{\text{КВ}}$, квар
1	19	3230,06	5149,94	1288,9
2	20	5422,9	2957,1	3481,74
3	21	7057,75	1322,25	5116,59

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв

У наступних таблицях (від 4.2 до 4.4) систематизовано результати підбору конденсаторних батарей 0,4 кВ. Також продемонстровано схему їхньої розстановки по трансформаторних підстанціях для трьох різних конфігурацій: $N_T = 19$, $N_T = 20$ та $N_T = 21$.

Таблиця 4.2. Вибір типу та потужності БК при $N_T = N_0 = 19$

№ КТП	К-сть т-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	$Q_{пр}$, кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	Кількість та потужність БК, шт. · кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп} - Q_{бк}$, кВАр	K_z	S_p , кВА
1, 2, 3	6	4180,6	2767,2	766,9	2000,3	6 · 335	2010	-9,7	0,7	4248,7
4, 5, 6	6	4020,6	2378,9	1378,7	1000,0	6 · 166	996	4,0	0,7	4251,7
7	2	1446,6	939,6	0,0	939,5	2 · 402; 1 · 133	937	2,5	0,71	1446,6
8	2	1281,6	1042,1	604,1	438,1	2 · 225	450	-11,9	0,7	1411,7
9, 10	3	1973,73	1252,71	787,9	464,8	3 · 150	450	14,8	0,7	2130,7

На шинах 0,4 кВ сумарна потужність становить $Q_{кн} = 4843$ квар.

На шинах 10 кВ встановлюємо: $Q_{кв} = 2 \times 900 = 1800$ квар.

Таблиця 4.3. Вибір типу та потужності БК при $N_T = N_0 + 1 = 20$

№ КТП	К-сть т-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	$Q_{пр}$, кВАр	$Q_{кп}$, кВАр	Кількість та потужність БК, шт. · кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп} - Q_{бк}$, кВАр	K_z	S_p , кВА
1, 2, 3	7	4180,6	2767,2	2666,8	100,4	1 · 100	100	0,4	0,7	4959,0
4, 5, 6	6	4020,6	2378,9	1378,7	1000,0	6 · 166	996	4,0	0,7	4251,7
7	2	1446,6	939,6	0,0	939,5	2 · 402; 1 · 133	937	2,5	0,71	1446,6
8	2	1281,6	1042,1	604,1	438,1	2 · 200	400	38,1	0,71	1433,4
9, 10	3	1973,73	1252,71	787,9	464,8	3 · 150	450	14,8	0,7	2130,7

На шинах 0,4 кВ сумарне значення $Q_{кн} = 2883$ квар.

На шинах 10 кВ використано: $Q_{кв} = 2 \times 1800 = 3600$ квар.

Таблиця 4.4. Вибір типу та потужності БК при $N_T = N_0 + 2 = 21$

№ КТП	К-сть т-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , кВАр	$Q_{кн}$, кВАр	Кількість та потужність БК, шт. кВАр	Сума $Q_{БК}$, кВАр	$Q_{кп} - Q_{БК}$, кВАр	K_3	S_p , кВА
1, 2, 3	7	4180,6	2767,2	2666,8	100,4	-	0	100,4	0,71	5013,5
4, 5, 6	7	4020,6	2378,9	2902,5	0,0	-	0	0,0	0,66	4671,6
7	2	1446,6	939,6	0,0	939,5	2·402	804	135,5	0,72	1452,9
8	2	1281,6	1042,1	604,1	438,1	2·100	200	238,1	0,76	1533,5
9, 10	3	1973,73	1252,71	787,9	464,8	-	0	464,8	0,77	2337,7

Потужність для шин 0,4 кВ складає $Q_{кн} = 1004$ квар.

Високовольтна лінія 10 кВ забезпечена: $Q_{кв} = 2 \times 2700 = 5400$ квар.

Тепер обчислимо загальні видатки на впровадження системи компенсації для випадку з 19 трансформаторами.

Знайдемо сумарні фінансові видатки щодо впровадження компенсуючого обладнання для сценарію $N_T = 19$.

Обсяги розсіяної робочої енергії всередині компонентів мережі за першою конфігурацією обчислюються так:

$$\Delta P_{кн} = P_{пит} \cdot Q_{кн} = 0,0045 \cdot 4843 = 21,79 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{кв} = P_{пит} \cdot Q_{кв} = 0,003 \cdot 1800 = 5,40 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{тп} = \frac{P_H^2 + Q_1^2}{U_H^2} \cdot R_{екв} \cdot 10^{-3} = \frac{12903^2 + 3230,06^2}{10^2} \cdot 0,0506 \cdot 10^{-3} = 89,52 \text{ кВт}$$

де

$$R_{екв} = \frac{U_{ном}^2 \cdot \Delta P_K}{N_T \cdot S_{ном}^2} = \frac{10^2 \cdot 8,6 \cdot 10^3}{19 \cdot 1000^2} = 0,0506 \text{ Ом}$$

$$\Delta P_{сд} = Q_{сд} \left(\frac{D_1}{Q_{ном}} + \frac{2D_2 Q_{сд}}{Q_{ном}^2 N_{сд}} \right) + Q_{сд}^2 \frac{D_2}{Q_{ном}^2 N_{сд}} =$$

$$= 761,81 \cdot \left(\frac{0,9}{287,03} + \frac{2 \cdot 0,751 \cdot 761,81}{287,03^2 \cdot 2} \right) + 761,81^2 \cdot \frac{0,751}{287,03^2 \cdot 2} = 10,32 \text{ кВт}$$

Капіталовкладення у встановлення батарей на шинах 0,4 кВ і 10 кВ, а також локальних підстанцій дорівнюватимуть (у тисячах гривень):

$$K_{\text{КН}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{КН}i} \cdot K_{\text{КН}i} = 2421,50$$

$$K_{\text{КВ}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{КВ}i} \cdot K_{\text{КВ}i} = 1440,00$$

$$K_{\text{КТП}} = N_{\text{КТП}(2)} \cdot K_{\text{КТП}(2)} + N_{\text{КТП}(1)} \cdot K_{\text{КТП}(1)} = 47500,00$$

Сукупні щорічні витрати за першою моделлю оптимізації реактивних струмів досягнуть:

$$\begin{aligned} Z_1 &= E_{\text{Н}}(K_{\text{КН}} + K_{\text{КВ}} + K_{\text{КТП}}) + C_0 \cdot t_{\text{м}}(\Delta P_{\text{КН}} + \Delta P_{\text{КВ}} + \Delta P_{\text{ТП}} + \Delta P_{\text{СД}}) \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,12 \cdot (2421,50 + 1440,00 + 47500,00) + 7,77 \cdot 3332,21 \\ &\quad \cdot (21,79 + 5,40 + 89,52 + 10,31) \cdot 10^{-3} = 9452,05 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

Підсумкові економічні показники для всіх проаналізованих варіантів було приведено у вигляді табл. 4.5.

Найнижчий показник сумарних видатків (9452,05 тис. грн.) зафіксовано у першій конфігурації, тому саме її затверджуємо як базову.

Відповідно до прийнятого варіанту компенсації перераховано таблицю електричних навантажень в мережі понад 1 кВ, яка приведена в табл. 4.6.

						Ар.
						37

Таблиця 4.5. Результати розрахунків по варіантам компенсації приведених витрат

Варіант	$Q_{\text{кн}}, \text{кВАр}$	$\Delta P_{\text{кн}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{кв}}, \text{квар}$	$\Delta P_{\text{кв}}, \text{кВт}$	$N_{\text{тр}}, \text{шт.}$	$R_{\text{екв}}, \text{Ом}$	$S_{\text{пр}}, \text{кВА}$	$\Delta P_{\text{тп}}, \text{кВт}$	$K_{\text{кн}}, \text{т. грн.}$	$K_{\text{кв}}, \text{т. грн.}$	$K_{\text{тп}}, \text{т. грн.}$	$З, \text{т. грн.}$
1	4843	21,79	1800	5,4	19	0,0506	13300	89,52	2421,5	1440	47500	9452,05
2	2883	12,97	3600	10,8	20	0,043	14000	84,23	1441,5	2880	50000	9581,74
3	1004	4,52	5400	16,2	21	0,041	14700	88,68	502	4320	52500	9978,05

Таблиця 4.6. Електричні навантаження вище 1 кВ з урахуванням розстановки КП

Назва	$N_{\text{спож}}$ шт	$P_{\text{одн.сп.}}$		$P_{\text{сум.}}$ кВт	m	$K_{\text{в}}$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	Сер. зм. нав.		$n_{\text{сф}}$	$K_{\text{р}}$	Розрах. навантаж.		
		мін, кВт	макс, кВт						$P_{\text{зм}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{зм}}, \text{квар}$			$P_{\text{розр}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{розр}}, \text{квар}$	$S_{\text{розр}}, \text{кВА}$
ТП 1, 2, 3															
Лінія виробництва паперу №1															
— силове:	91	3,04	55,7	2735	18,3	0,65	0,85	0,6	1778,03	1101,93	91	1,07	1900,88	1101,93	2197,17
— освітлювальне:				39,9									45,38	21,96	
— Всього:									1817,93	1101,93			1946,26	1123,89	2247,45
Лінія виробництва паперу №2															
— силове:	91	3,04	55,7	2729	18,3	0,65	0,85	0,6	1774,09	1099,48	91	1,07	1896,66	1099,48	2192,3
— освітлювальне:				49,02									55,76	26,99	
— Всього:									1823,11	1099,48			1952,42	1126,47	2254,08
Ділянка обробки сировини															
— силове:	16	5,06	10,1	157	2,0	0,24	0,50	1,7	37,65	65,2	16	1,56	58,55	65,2	87,64
— освітлювальне:				7,42									8,44	4,08	
— Всього:									45,07	65,2			66,99	69,28	96,39
Варильний підрозділ №1															
— силове:	26	5,06	30,4	309	6,0	0,34	0,70	1	104,94	107,07	20	1,37	143,91	107,07	179,37
— освітлювальне:				26,53									25,36	12,27	
— Всього:									131,47	107,07			169,27	119,34	207,1
Ділянка відбілювання целюлози															
— силове:	16	5,06	22,3	255	4,4	0,60	0,70	1	153,01	156,1	16	1,22	186,29	156,1	243,04
— освітлювальне:				17,7									20,13	9,74	
— Всього:									170,71	156,1			206,42	165,84	264,78
Варильний підрозділ №2															
— силове:	25	11,1	18,2	407	1,6	0,35	0,70	1	142,39	145,26	25	1,32	187,73	145,26	237,36
— освітлювальне:				37,06									35,43	17,15	
— Всього:									179,45	145,26			223,16	162,41	275,99
Всього по ТП 1, 2, 3:															
— силове:	265	3,04	55,7	6592	18,3	0,61	0,83	0,7	3990,11	2675,04	237	1,00	3990,11	2675,04	4803,83
— освітлювальне:				177,65									190,52	92,2	
БК 0,4 кВ										2010				2010	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 1, 2, 3:									4180,63	665,04			4180,63	757,24	4248,66

Продовження табл. 4.6

Втрати в трансформаторах:														47,49	248,09	
Кількість трансформаторів: 6																
Номинальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,70$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 1, 2, 3:														4228,12	1005,33	4346,06
ТП 4, 5, 6																
Лінія виробництва паперу №3																
— силове:	103	5,06	142	3243	28,0	0,60	0,85	0,6	1946,08	1206,07	46	1,12	2177,38	1206,07	2489,1	
— освітлювальне:				9,16									10,42	5,04		
— Всього:									1955,24	1206,07			2187,8	1211,12	2500,66	
Блок папероробних агрегатів №57																
— силове:	101	5,06	55,7	2130	11,0	0,60	0,85	0,6	1278,16	792,13	77	1,09	1392,03	792,13	1601,63	
— освітлювальне:				27,02									30,73	14,87		
— Всього:									1305,18	792,13			1422,76	807,01	1635,69	
Підрозділ готової продукції																
— силове:	53	2,53	50,6	610	20,0	0,60	0,80	0,8	365,84	274,37	24	1,17	428,73	274,37	509,02	
— освітлювальне:				20,81									23,67	11,46		
— Всього:									386,64	274,37			452,39	285,83	535,12	
Сховище матеріалів №4																
— силове:	9	2,53	15,2	43	6,0	0,50	0,80	0,8	21,51	16,13	6	1,52	32,73	17,74	37,23	
— освітлювальне:				9,39									7,04	3,41		
— Всього:									30,9	16,13			39,77	21,15	45,04	
Зовнішня територія проммайданчика																
— освітлювальне:				28,54									31,96	55,35		
— Всього:									28,54	0			31,96	55,35	63,92	
Всього по ТП 4, 5, 6:																
— силове:	266	2,53	142	6026	56,0	0,60	0,84	0,6	3611,58	2288,71	85	1,08	3916,75	2288,71	4536,42	
— освітлювальне:				94,93									103,82	90,15		
БК 0,4 кВ										996				996		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 4, 5, 6:									3706,5	1292,71			4020,58	1382,86	4251,74	
Втрати в трансформаторах:													47,56	248,46		
Кількість трансформаторів: 6																
Номинальна потужність, кВА: 1000																

Продовження табл. 4.6

Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,70$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 4, 5, 6:														4068,14	1631,32	4382,78
ТП 7																
Відділення пресування																
— силове:	69	4,55	107	1961	23,6	0,66	0,81	0,7	1286,4	926,21	37	1,11	1427,9	926,21	1701,99	
— освітлювальне:				12,47									14,18	6,86		
— Всього:									1300,75	926,21			1446,59	939,57	1724,94	
Всього по ТП 7:																
— силове:	69	4,55	107	1961	23,6	0,66	0,81	0,7	1286,4	926,21	37	1,11	1427,9	926,21	1701,99	
— освітлювальне:				12,47									14,18	6,86		
БК 0,4 кВ										937				937		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 7:									1300,75	10,79			1446,59	2,57	1446,59	
Втрати в трансформаторах:													16,33	85,2		
Кількість трансформаторів: 2																
Номинальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,71$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 7:													1462,92	87,77	1465,55	
ТП 8																
Насосна станція																
— силове:	12	3,04	18,2	155	6,0	0,60	0,70	1	92,9	94,77	12	1,26	116,87	94,77	150,46	
— освітлювальне:				5,65									6,43	3,11		
— Всього:									98,55	94,77			123,3	97,88	157,41	
Компресорний вузол																
— силове:	12	113	253	1530	2,2	0,6	0,7	1	918,09	936,64	12	1,26	1154,89	936,64	1486,96	
— освітлювальне:				14,99									15,6	7,55		
— Всього:									933,08	936,64			1170,49	944,19	1503,84	
Всього по ТП 8:																
— силове:	24	3,04	253	1685	83,3	0,6	0,7	1	1010,99	1031,41	13	1,25	1259,58	1031,41	1627,98	
— освітлювальне:				20,63									22,02	10,66		
БК 0,4 кВ										450				450		
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 8:									1031,62	581,41			1281,6	592,07	1411,75	
Втрати в трансформаторах:													15,76	82,33		
Кількість трансформаторів: 2																
Номинальна потужність, кВА: 1000																

Продовження табл. 4.6

Коефіцієнт завантаження: $K_3 = 0,70$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 8:														1297,36	674,4	1462,33
ТП 9, 10																
Лінія виробництва паперу №4																
— силове:	51	5,06	55,7	1523	11	0,6	0,85	0,6	913,84	566,35	51	1,11	1016,33	566,35	1163,48	
— освітлювальне:				46,84									53,27	25,78		
— Всього:									960,67	566,35			1069,6	592,13	1222,57	
Відділення підготовки кислот																
— силове:	10	30,4	121	607	4,0	0,51	0,80	0,8	309,67	232,25	10	1,37	423,73	255,48	494,8	
— освітлювальне:				13,06									12,33	5,97		
— Всього:									322,74	232,25			436,06	261,45	508,44	
Станція генерації кисню																
— силове:	21	11,1	55,7	410	5,0	0,60	0,70	1	245,92	250,89	15	1,23	301,46	250,89	392,2	
— освітлювальне:				10,86									12,35	5,98		
— Всього:									256,78	250,89			313,81	256,87	405,55	
Сховище матеріалів №1																
— силове:	16	4,55	18,2	252	4,0	0,50	0,80	0,8	125,99	94,49	16	1,29	161,93	94,49	187,48	
— освітлювальне:				22,97									17,23	8,34		
— Всього:									148,96	94,49			179,16	102,83	206,58	
Сховище матеріалів №2																
— силове:	13	2,53	7,6	53	3,0	0,50	0,80	0,8	26,57	19,93	13	1,32	35,14	19,93	40,39	
— освітлювальне:				8,25									6,09	2,95		
— Всього:									34,81	19,93			41,23	22,87	47,15	
Сховище матеріалів №3																
— силове:	15	2,53	11,1	62	4,4	0,50	0,80	0,8	30,87	23,14	11	1,36	41,87	23,14	47,84	
— освітлювальне:				13,02									9,61	16,64		
— Всього:									43,89	23,14			51,48	39,79	65,06	
Всього по ТП 9, 10:																
— силове:	126	2,53	121	2907	48,0	0,57	0,81	0,7	1652,85	1187,05	48	1,13	1862,83	1187,05	2208,89	
— освітлювальне:				115,01									110,91	65,67		
БК 0,4 кВ														450	450	
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 9, 10:														1767,86	737,05	2130,68

Продовження табл. 4.6

Втрати в трансформаторах:													23,85	124,6	
Кількість трансформаторів: 3															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,70$															
Всього на шинах 10 кВ ТП 9, 10:													1997,58	927,31	2202,43
Підсумкові показники по об'єкту															
— Всього базового навантаження:	750	2,53	253	19171					11974,5	8114,9			12903,13	8380,45	15406,87
Потужність БК 0,4 кВ:										4843				4843	
Втрати в трансформаторах:													150,99	788,68	
Всього по об'єкту (0,4 кВ + втрати):													13054,12	4326,13	13752,51
Високовольтне навантаження															
СД	2	630	630	1260		0,69	0,91	0,5	879,83	400,86			879,83	-400,86	966,84
Всього високовольтного:													879,83	-400,86	966,84
Всього по об'єкту 10 кВ:													13933,95	3925,27	14476,21
КП 10 кВ:														-1800	
Всього 10 кВ з КП:													13933,95	2125,27	14095,16
$\tan\varphi=0,152$															

РОЗДІЛ 5

ОБҐРУНТУВАННЯ ЧИСЕЛЬНОСТІ ТА НОМІНАЛІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Визначимо оптимальні робочі параметри для трансформаторів центральної понижуючої підстанції.

$$S_{\text{НОМ.Т}} = \frac{0,85 \cdot S_{\text{max}}}{1,4(n-1)} = \frac{0,85 \cdot 14,095}{1,4(2-1)} = 8,558 \text{ МВА}$$

Для монтажу на головній підстанції затверджуємо марку ТДН 10000/110 із такими заводськими характеристиками: $\Delta P_{\text{xx}} = 14 \text{ кВт}$, $\Delta P_{\text{кз}} = 60 \text{ кВт}$, $u_{\text{к}} = 10,5\%$.

За умов штатного функціонування рівень навантаженості становитиме:

$$K_3 = \frac{S_{\text{max}}}{n \cdot S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{14095,16}{2 \cdot 10000} = 0,705$$

Цей показник цілком відповідає нормативним інженерним критеріям.

Для локальних розподільчих пунктів призначаємо установки з базовим номіналом 1000 кВА (модель ТП-1000/10/04). Здійснимо обов'язкову перевірку їхньої придатності, спираючись на наступні співвідношення (на прикладі ТП-1:

$$K_3 = \frac{S_{\text{p}}}{n \cdot S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{1416,22}{2 \cdot 1000} = 0,708$$

$$n \cdot S_{\text{НОМ.Т}} \geq \frac{S_{\text{p}}}{K_1} \Rightarrow 2000 \geq \frac{1416,22}{1,08} = 1311,3 \text{ кВА}$$

$$S_{\text{НОМ.Т}} \geq \frac{S_{\text{p}}}{K_2} \Rightarrow 1000 \geq \frac{1416,22}{1,4} = 1011,6 \text{ кВА}$$

						Ар.
						44

Таким чином, трансформатори серії ТП-1000/10/04 успішно проходять розрахунковий контроль. Підсумки перевірки решти цехових трансформаторів структуровано у табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Перевірка цехових ТП за уомвами вибору

№ ТП	К-сть	$S_{роз}, \text{кВА}$	K_3	$S_{ном} > S_p/K_1$	$S_{ном} > S_p/K_2$
ТП-1	2	1416,22	0,708	1311,3	1011,6
ТП-2	2	1416,22	0,708	1311,3	1011,6
ТП-3	2	1416,22	0,708	1311,3	1011,6
ТП-4	2	1417,25	0,709	1312,3	1012,3
ТП-5	2	1417,25	0,709	1312,3	1012,3
ТП-6	2	1417,25	0,709	1312,3	1012,3
ТП-7	2	1446,59	0,723	1339,4	1033,3
ТП-8	2	1411,75	0,706	1307,2	1008,4
ТП-9	2	1420,45	0,71	1315,2	1014,6
ТП-10	1	710,23	0,71	657,6	507,3

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів коротких замкнень

За методикою [1], виконаємо знаходження характеристик аварійних режимів. Для цього використаємо розрахункову схему рис. 6.1 та відповідну їй схему заміщення рис. 6.2.

Знайдемо реактивні й омичні опори для кожної ланки мережі:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з.}} = \frac{115^2}{97150} = 0,136 \text{ Ом}$$

$$R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{0,136}{25} = 0,005 \text{ Ом}$$

$$R_l = r_0 \cdot l = 0,422 \cdot 8,64 = 3,646 \text{ Ом}$$

$$X_l = x_0 \cdot l = 0,444 \cdot 8,64 = 3,836 \text{ Ом}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_{ср.ном}^2}{S_{ном}^2} \cdot 10^3 = \frac{60 \cdot 10,5^2}{10000^2} \cdot 10^3 = 0,066 \text{ Ом}$$

$$X_T = \frac{u_{к\%} \cdot U_{ср.ном}^2}{100 \cdot S_{ном}} = \frac{10,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 10} = 1,158 \text{ Ом}$$

$$X_{K0} = X_c + X_l = 0,136 + 3,836 = 3,972 \text{ Ом}$$

$$R_{K0} = R_c + R_l = 0,005 + 3,646 = 3,651 \text{ Ом}$$

						Ар.
						46

$$Z_{K0} = \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2} = \sqrt{3,651^2 + 3,972^2} = 5,395 \text{ Ом}$$

Зважаючи на отримані вище дані, обчислимо параметри аварійного струму безпосередньо для локації K0:

$$I''_{K0} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K0}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 5,395} = 12,306 \text{ кА}$$

$$T_{a0} = \frac{X_{K0}}{\omega \cdot R_{K0}} = \frac{3,972}{314 \cdot 3,651} = 0,0035 \text{ с}$$

$$k_{yд0} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a0}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0035}} = 1,056$$

$$i_{yд0} = \sqrt{2} \cdot k_{yд0} \cdot I''_{K0} = \sqrt{2} \cdot 1,056 \cdot 12,306 = 18,373 \text{ кА}$$

Здійснимо перерахунок значень опорів цієї ділянки відносно шин головної підстанції з напругою 10 кіловольт:

$$X'_{K0} = X_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}}\right)^2 = 3,972 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,033 \text{ Ом}$$

$$R'_{K0} = R_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}}\right)^2 = 3,651 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,030 \text{ Ом}$$

$$Z'_{K0} = Z_{K0} \cdot \left(\frac{U_{\text{HH}}}{U_{\text{BH}}}\right)^2 = 5,395 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,045 \text{ Ом}$$

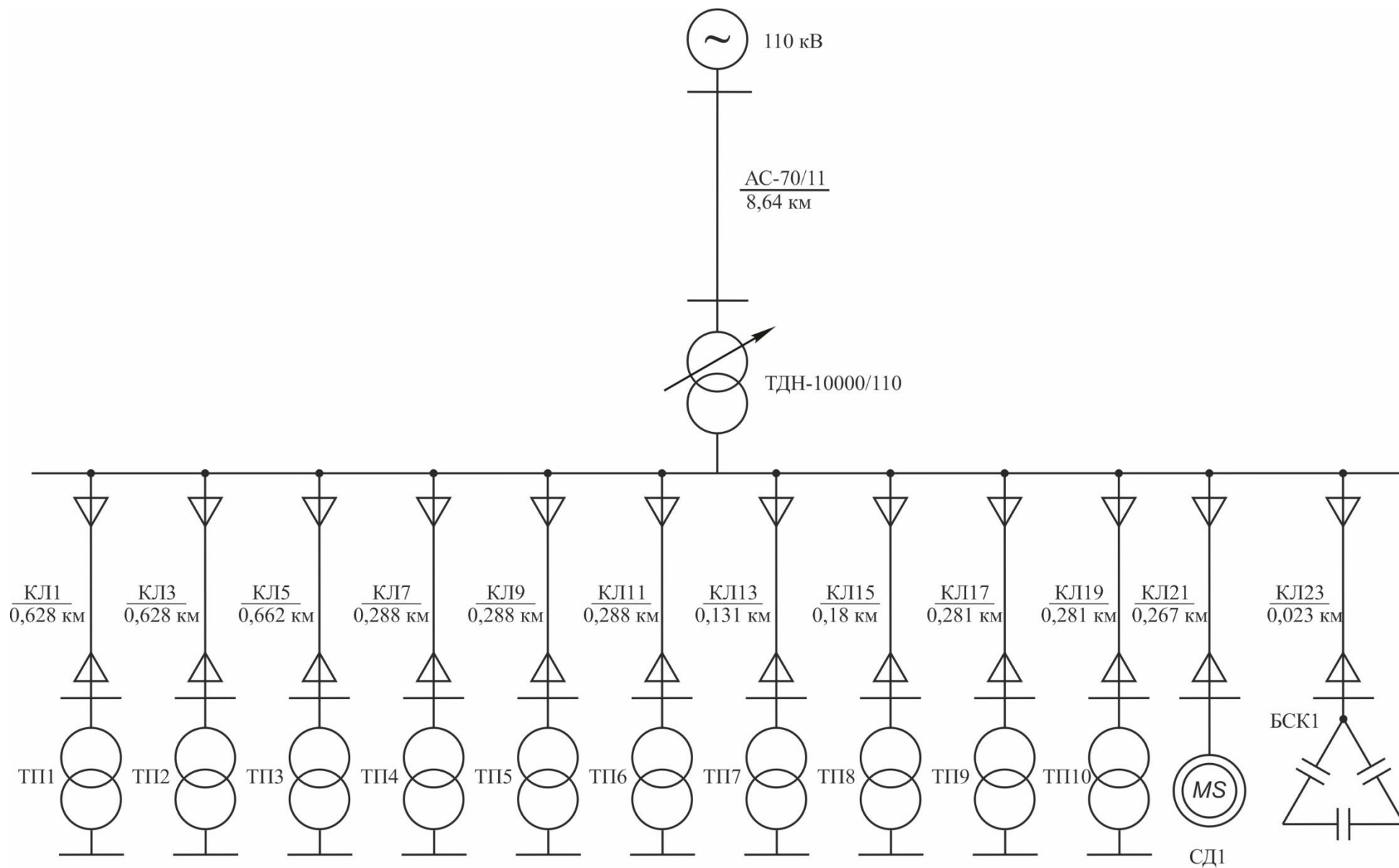


Рисунок 6.1. Розрахункова схема системи електропостачан.

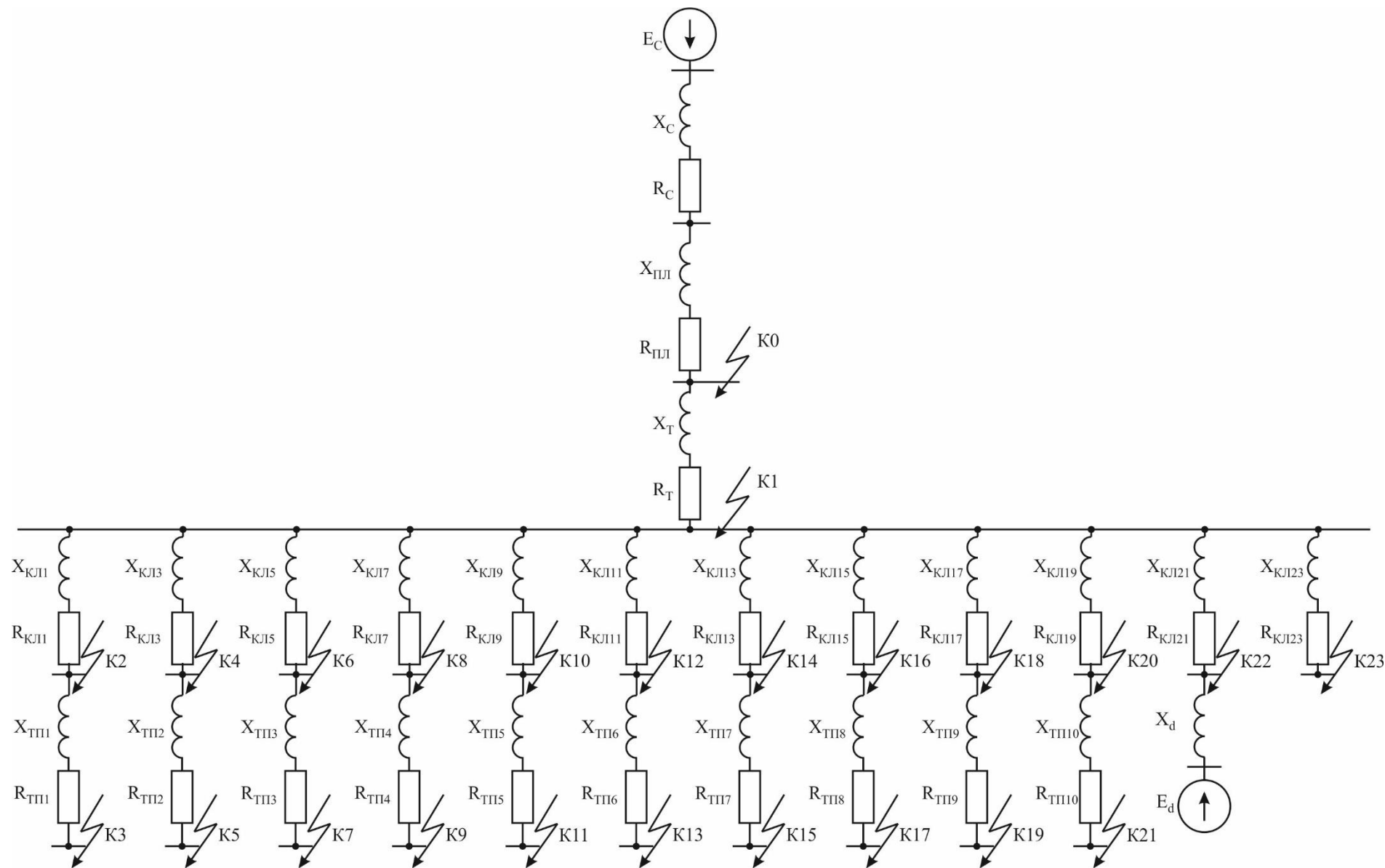


Рисунок 6.2. Схема заміщення системи електропостачан.

Визначення еквівалентних параметрів опору для локації К1:

$$X_{K1} = X'_{K0} + X_T = 0,033 + 1,158 = 1,191 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R'_{K0} + R_T = 0,030 + 0,066 = 0,096 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,096^2 + 1,191^2} = 1,195 \text{ Ом}$$

Характеристики струмів аварійного замикання у вузлі К1:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,195} = 5,073 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,191}{314 \cdot 0,096} = 0,0395 \text{ с}$$

$$k_{yд1} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0395}} = 1,776$$

$$i_{yд1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{yд1} \cdot I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,776 \cdot 5,073 = 12,742 \text{ кА}$$

Розрахуємо додатковий струм, який генерується високовольтними синхронними машинами (10 кВ) у момент виникнення аварії:

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{0,63}{0,91 \cdot 0,957} = 0,723 \text{ МВА}$$

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{0,723}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,0398 \text{ кА}$$

						Ар.
						50

$$I''_{K1(CD)} = \frac{n \cdot E''_d \cdot I_{ном}}{x''_d} = \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 0,0398}{0,151} = 0,580 \text{ кА}$$

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

$$k_{удCD} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{aCD}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0478}} = 1,811$$

$$i_{уд1(CD)} = \sqrt{2} \cdot k_{удCD} \cdot I''_{K1(CD)} = \sqrt{2} \cdot 1,811 \cdot 0,580 = 1,485 \text{ кА}$$

Підсумкові значення аварійних параметрів з урахуванням спільного впливу магістральної енергосистеми та моторів:

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(CD)} = 5,073 + 0,580 = 5,653 \text{ кА}$$

$$i_{уд1} = i_{уд1(c)} + i_{уд1(CD)} = 12,742 + 1,485 = 14,227 \text{ кА}$$

Знайдемо базові критерії задля правильного підбору струмопровідних магістралей:

В якості основного провідника застосуємо марку ААШВ-10(3х70).

Значення активного та реактивного опорів для ділянки КЛ1 обчислено далі, а показники решти ліній згруповано у таблиці 6.1:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot 1,73 \cdot U_{ср.ном}} = \frac{1416,22}{2 \cdot 1,73 \cdot 10,5} = 38,98 \text{ А}$$

$$B_k = I''_{K1}{}^2 \cdot (t_{п.з.} + T_a) = 5,653^2 \cdot (1,025 + 0,0395) = 34,02 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{min} = \frac{10^3 \cdot \sqrt{B_k}}{C} = \frac{10^3 \cdot \sqrt{34,02}}{94} = 62,05 \text{ мм}^2$$

						Ар.
						51

Характеристики аварійного струму в локації К2 обчислюються наступним чином:

$$I''_{K2} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,302} = 4,656 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega \cdot R_{K2}} = \frac{1,246}{314 \cdot 0,378} = 0,0105 \text{ с}$$

$$k_{\text{уд}2} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0105}} = 1,386$$

$$i_{\text{уд}2} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}2} \cdot I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,386 \cdot 4,656 = 9,125 \text{ кА}$$

Обчислення параметрів опору для вузла К3:

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

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

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_{\text{тр}}) \cdot \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{вн}}} \right)^2 = (1,246 + 6,064) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0106 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_{\text{тр}}) \cdot \left(\frac{U_{\text{нн}}}{U_{\text{вн}}} \right)^2 = (0,378 + 0,948) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,0019 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0019^2 + 0,0106^2} = 0,0108 \text{ Ом}$$

						Ар.
						53

Характеристики аварійного режиму на ділянці КЗ:

$$I''_{K3} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,0108} = 21,424 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0106}{314 \cdot 0,0019} = 0,0176 \text{ с}$$

$$k_{\text{уд3}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0176}} = 1,566$$

$$i_{\text{уд3}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд3}} \cdot I''_{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,566 \cdot 21,424 = 47,439 \text{ кА}$$

За тотожним алгоритмом знаходяться величини струмів пошкодження стосовно решти елементів мережі. Підсумки цих математичних операцій структуровано всередині таблиці 6.2.

Аналогічно розраховуються показники короткого замикання для інших точок, а результати приведені в табл. 6.2.

						Ар.
						54

Таблиця 6.2. Струмів короткого замикання в точках розрахункової схеми

Точ.к.з.	R, Ом	X, Ом	I _{к''} , кА	T _а , с	к _{уд}	і _{уд} , кА
0	3,651	3,972	12,306	0,0035	1,056	18,373
1	0,096	1,191	5,653	0,0395	1,776	14,227
2	0,378	1,246	4,656	0,0105	1,386	9,125
3	0,002	0,011	21,424	0,0176	1,566	47,439
4	0,378	1,246	4,656	0,0105	1,386	9,125
5	0,002	0,011	21,424	0,0176	1,566	47,439
6	0,394	1,263	4,696	0,0103	1,375	9,128
7	0,002	0,011	21,424	0,0176	1,566	47,439
8	0,227	1,231	4,959	0,0175	1,561	10,95
9	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
10	0,227	1,231	4,959	0,0175	1,561	10,95
11	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
12	0,227	1,231	4,959	0,0175	1,561	10,95
13	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
14	0,156	1,216	5,06	0,0252	1,673	11,942
15	0,002	0,011	22,051	0,0212	1,624	50,519
16	0,178	1,22	5,03	0,0221	1,636	11,608
17	0,002	0,011	21,839	0,0214	1,627	50,124
18	0,223	1,23	4,969	0,0178	1,57	11,011
19	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
20	0,223	1,23	4,969	0,0178	1,57	11,011
21	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
22	0,217	1,229	4,979	0,0183	1,579	11,102
23	0,217	1,229	4,979	0,0183	1,579	11,102

6.2 Вибір та перевірка кабельних ліній розподільчої мережі 10 кВ

Для здійснення коректного підбору кабельних провідників напругою 10 кВ спочатку обчислимо величину тривалого розрахункового струму для першої магістралі КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1416,22}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 10,5} = 38,98 \text{ А}$$

Затверджуємо до впровадження трижильний броньований кабель марки ААШв-10(3х70) та виконаємо його розрахункову перевірку за основними технічними критеріями.

Контроль за умов штатного тривалого навантаження:

$$I_p = 38,98 \text{ А} \leq K_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 130 = 119,6 \text{ А}$$

Контроль за умов протікання струму в післяаварійному режимі:

$$I_{\text{р.ав}} = 77,96 \text{ А} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} = 1,25 \cdot 1 \cdot 130 = 162,5 \text{ А}$$

Контроль провідника на здатність протистояти тепловому руйнуванню (термічна стійкість під час аварійних замикань):

$$B_k = I_{K1}''^2 \cdot (t_{\text{р.з.}} + T_{a1}) = 5,653^2 \cdot (1,025 + 0,0395) = 34,02 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{10^3 \cdot \sqrt{B_k}}{C} = \frac{10^3 \cdot \sqrt{34,02}}{94} = 62,05 \text{ мм}^2$$

Враховуючи, що фактичний переріз жили вибраного кабелю 70 мм² більший за мінімально допустимий за умов нагрівання 62,05 мм², його використання є повністю обґрунтованим. Підсумки аналогічних обчислень для решти кабельних ліній підприємства зведено у таблиці 6.3.

						Ар.
						56

Таблиця. 6.3. Зведені результати перевірки та підбору кабельних ліній напругою 10 кВ

$N_{\text{ж.л.}}$	n , шт	S_p , МВА	I_p , А	$I_{p.\text{ав.}}$, А	B_k , $\text{кА}^2\text{с}$	F_{min} , мм^2	Марка кабелю	$I_{\text{дон}}$, А	K_n	$K_n I_{\text{дон}}$, А	$K_{\text{ан}}$	K'_n	$K_{\text{ан}} K'_n I_{\text{дон}}$, А
1, 2	2	1416,22	38,98	77,96	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
3, 4	2	1416,22	38,98	77,96	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
5, 6	2	1417,25	39,01	78,02	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
7, 8	2	1417,25	39,01	78,02	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
9, 10	2	1417,25	39,01	78,02	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
11, 12	2	1446,59	39,81	79,62	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
13, 14	2	1411,75	38,85	77,7	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
15, 16	2	1420,45	39,09	78,18	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
17, 18	2	1420,45	39,09	78,18	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
19	1	710,23	39,09	-	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	1	130	-	-	-
20	1	483,42	26,58	-	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	1	130	-	-	-
21	1	483,42	26,58	-	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	1	130	-	-	-
22	1	910,8	50,08	-	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	1	130	-	-	-
23	1	910,8	50,08	-	34,02	62,05	ААШВ-10 (3 х 70)	130	1	130	-	-	-

6.3 Підбір високовольтного комутаційного устаткування

Далі продемонстровано процедуру визначення оптимальних характеристик для головних вимикачів 110 кВ в табл. 6.4.

Визначимо допоміжні параметри для вибору вимикача для точки К0:

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

$$i_{a\tau} = \sqrt{2}I''_{K0} e^{-\frac{\tau}{T_{a0}}} = 1,41 \cdot 12,306 \cdot e^{-\frac{0,042}{0,0035}} \approx 0 \text{ кА}$$

$$B_k = (I''_{K0})^2 (t_{с.в.} + t_{p.з.max} + T_{a0}) = 12,306^2 \cdot (0,022 + 1,02 + 0,0035) \\ = 158,33 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Таблиця 6.4. Вибір ввідного вимикача 110 кВ

Параметр комутатора	Умови перевірки	Математичне підтвердження
За класом напруги	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$110 \leq 110$
За тривалим струмом	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$73,98 \leq 3150$
За здатністю до розриву кола:		
- симетрична складова	$I''_{K0} \leq I_{відкл.ном}$	$12,306 \leq 40$
- аперіодична складова	$i_{a\tau} \leq \sqrt{2}\beta_n I_{відкл.ном}$	$0 \leq 19,8$
- повна складова	$\sqrt{2}I_{пт} + i_{a\tau} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл}(1 + \beta_n)$	$1,41 \cdot 12,306 + 0 \leq 1,41 \cdot 40 \cdot (1 + 0,35)$ $17,35 \leq 76,14$
За динамічною стійкістю:		
- симетрична складова	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$	$12,306 \leq 52$
- ударне навантаження	$i_{уд} \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст.}$	$18,373 \leq 132,37$
За термічною стійкістю	$B_k \leq I_{тн}^2 t_{тн}$	$158,33 \leq 1200$

Враховуючи отримані показники, приймаємо рішення змонтувати елегазовий апарат серії LTB-145D1/B як на головному високовольтному вводі, так і для секціонування.

6.4 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Схема приєднання перетворювачів, які забезпечують енергією власні потреби головної підстанції на базі змінного оперативного струму проілюстрована на рис. 6.3.

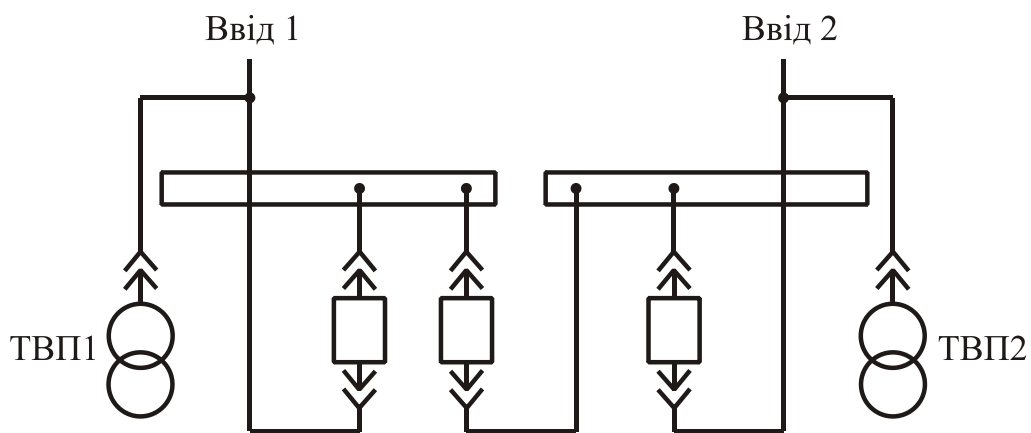


Рисунок 6.3. Під'єднання ТВП на ГЗП

Загальний обсяг встановленої потужності, необхідної для функціонування допоміжних механізмів, становить:

$$S_{уст} = \sqrt{P_{уст}^2 + Q_{уст}^2} = \sqrt{107,78^2 + 43,52^2} = 116,23 \text{ кВА}$$

Обчислимо реальне розрахункове споживання з урахуванням коефіцієнта попиту:

$$S_p = K_c \cdot S_{уст} = 0,8 \cdot 116,23 = 92,98 \text{ кВА}$$

Затверджуємо до монтажу пару трансформаторів марки ТМ-63/10. Рівень їхнього експлуатаційного завантаження дорівнюватиме:

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{92,98}{2 \cdot 63} = 0,74$$

Показник завантаження (74%) є абсолютно нормальним та залишає достатній резерв надійності.

						Ар.
						60

РОЗДІЛ 7

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ВІТРО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Щоб об'єктивно оцінити техніко-економічну доцільність та експлуатаційну ефективність розробленої автономної системи генерації, виникає нагальна потреба у проведенні її верифікації шляхом математичного та імітаційного симулювання. Як основний інструментарій для створення віртуального прототипу було обрано потужне програмне середовище MATLAB із розширенням Simulink. Цей вибір обґрунтовується високою точністю вбудованих вирішувачів при знаходженні розв'язків систем жорстких диференціальних рівнянь, які описують перехідні електромагнітні та електромеханічні процеси в енергетичному обладнанні.

Платформа Simulink являє собою інтегроване візуальне середовище, орієнтоване на багатокритеріальне імітаційне моделювання об'єктів різної фізичної природи. Зазначений програмний комплекс надає досліднику можливість синтезувати складні динамічні моделі, що містять нелінійні елементи та характеризуються нестационарними або аперіодичними робочими процесами. Архітектура таких систем реалізується через структурні блок-схеми, котрі концептуально нагадують спрямовані графи проходження інформаційних сигналів або потоків потужності.

Завдяки наявності спеціалізованої бібліотеки компонентів (зокрема, Simscape Electrical), розробник отримує зручний доступ до широкого спектра готових моделей електротехнічних, гідродинамічних та класичних механічних підсистем. Використання модельно-орієнтованого підходу суттєво оптимізує етап проектування алгоритмів управління (наприклад, контролерів пошуку точки максимальної потужності), дозволяючи аналізувати відгук системи та здійснювати налаштування параметрів пристроїв у масштабі реального часу.

7.1. Синтез імітаційної моделі вітроенергетичної генераторної установки

Для поглибленого дослідження динамічних властивостей була сформована топологія комбінованої енергосистеми, базовим джерелом генерації у якій виступає вітрова електростанція. За уточненими результатами розрахунку енергетичного балансу, абсолютний максимум споживаного навантаження (пікова потужність) цільового об'єкта становить приблизно $P_{load.max} = 11,2$ кВт.

Відповідно до актуальних критеріїв надійності електропостачання, архітектура генеруючого комплексу передбачає застосування наступного силового обладнання:

- вітрогенератор із номінальною вихідною потужністю $P_{w.nom} = 8,2$ кВт;
- резервна дизель-генераторна установка (ДГУ) потужністю $P_{dg} = 6,4$ кВт;
- буферна система накопичення енергії у вигляді блоку акумуляторних батарей (АКБ) із сумарною електричною ємністю $C_{bat} = 460$ А·год.

Узгодження параметрів постійного та змінного струму в мережі покладено на головний силовий інвертор потужністю $S_{inv} = 15,5$ кВА.

Для математичного обґрунтування обраної ємності накопичувача варто зазначити, що при стандартній номінальній напрузі шини постійного струму $U_{dc} = 48$ В, повна розрахункова енергоемність батареї складатиме:

$$W_{bat} = C_{bat} \cdot U_{dc} = 460 \cdot 48 = 22080 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 22,08 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Такого запасу акумульованої електроенергії, з урахуванням допустимої глибини розряду свинцево-кислотних чи літєвих комірок (на рівні 80%), буде достатньо для підтримки автономного живлення критичних споживачів протягом кількох годин за умов повного аеродинамічного штилю та відключеної резервної ДГУ.

З метою комплексного вивчення критеріїв ефективності запропонованого гібридного комплексу, розроблено відповідну віртуальну модель ВЕУ малої потужності. Ця модель здатна враховувати флуктуації (відхилення) швидкості

обертання роторного валу залежно від кінетичної енергії вітру. Теоретичним підґрунтям блоку вітротурбіни виступає класичне рівняння аеродинамічної потужності P_w , яка відбирається ротором:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta)$$

де ρ - густина повітряного середовища (при стандартних умовах $\approx 1,225 \text{ кг/м}^3$);

A – площа обмітання ротора вітроколеса;

v – миттєва швидкість вітрового потоку;

$C_p(\lambda, \beta)$ – коефіцієнт використання енергії вітру, що є нелінійною функцією від параметрів швидкохідності λ та кута атаки (повороту) лопатей β .

Візуалізована структурна схема сформованої імітаційної моделі вітрової установки представлена на рис. 7.1.

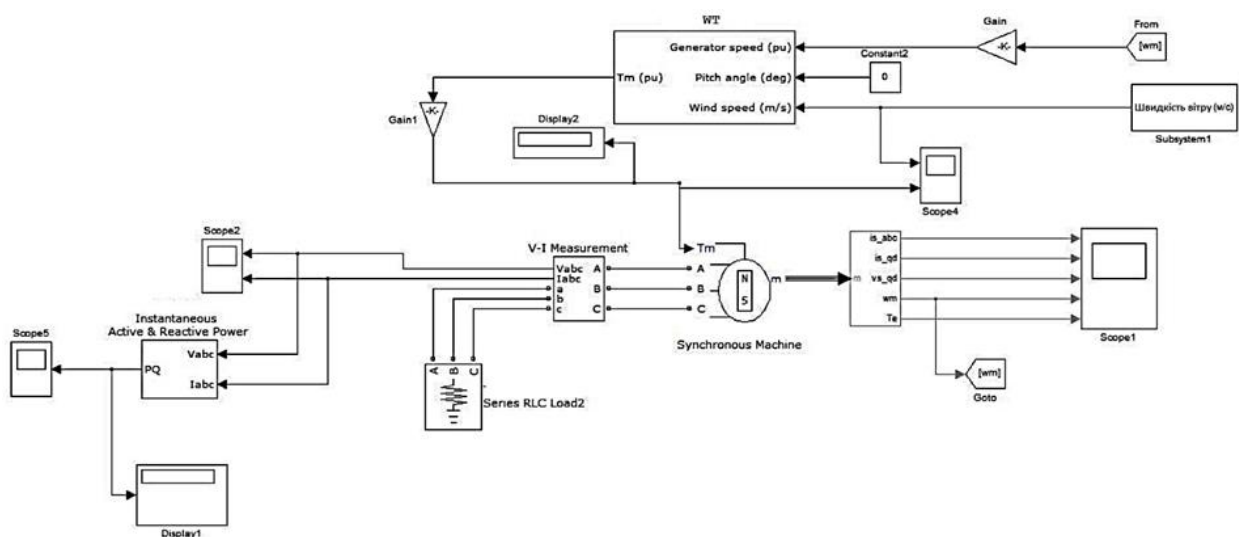


Рисунок 7.1. Структурна блок-схема імітаційної моделі вітроенергетичної установки у середовищі MATLAB/Simulink

Як можна детально побачити з наведеної топології на рисунку, алгоритмічним ядром системи є субблок вітрової турбіни (Wind Turbine), на вхід якого надходять дані про швидкість вітру та кут нахилу лопатей. Турбіна генерує еквівалентний механічний момент T_m (у відносних одиницях). Цей обертальний

момент безпосередньо передається на вал синхронної машини з постійними магнітами (блок Synchronous Machine). Згенерована змінна напруга статора надходить на трифазне навантаження (Series RLC Load2). У свою чергу, моніторинг показників струму, напруги та обчислення миттєвої активної й реактивної потужності (підсистема PQ) здійснюється блоком вимірювальних трансформаторів (V-I Measurement) із подальшим виведенням кривих перехідних процесів на екрани віртуальних осцилографів (Scope1, Scope2, Scope5).

З огляду на виражену фізичну нелінійність та складність електромеханічних процесів вітроенергетичної установки (BEU), її дослідження вимагає попередньої декомпозиції на простіші, зручні для аналізу функціональні блоки. Запропонована комплексна модель структурно інтегрує дві ключові підсистеми: аеродинамічну модель вітрової турбіни та електромеханічну модель синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням (СГПМ). Робочий цикл системи ґрунтується на трансформації кінетичної енергії набігаючого повітряного потоку через обертальний рух лопатевого апарату у механічну енергію валу. Далі генератор перетворює її в електричну енергію, яка крізь ланку силового напівпровідникового перетворювача спрямовується до кінцевого споживача або акумулюється в буферній батареї (АКБ) у періоди надлишку генерації.

Інформаційним входом для керуючого модуля турбіни (WT) слугує миттєве значення швидкості вітру v , виражене в [м/с]. На виході формується еквівалентний обертальний механічний момент турбіни T_{mech} , значення якого нормоване у системі відносних одиниць (в.о. або pu – per unit). Залежність генерованого моменту від швидкості повітряного потоку та кутової частоти обертання жорстко детермінується аеродинамічними профілями лопатей.

Математично, механічний крутний момент на валу турбіни розраховується як відношення розвиненої аеродинамічної потужності P_w до кутової швидкості обертання ротора ω_r :

$$T_{mech} = \frac{P_w}{\omega_r} = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta)}{\omega_r}$$

Перехід до відносних величин у середовищі Simulink реалізується через ділення абсолютних фізичних параметрів на їх відповідні базові константи: номінальний електромагнітний момент $T_{m.base}$ та базову кутову частоту ротора $\omega_{n.base}$.

Графічна інтерпретація цієї математичної залежності у вигляді сімейства механічних характеристик наведена на рис. 7.2.

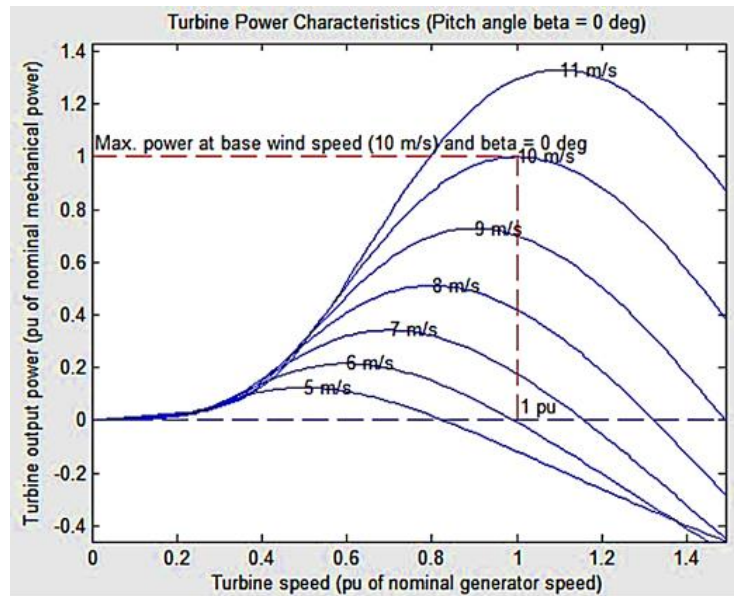


Рисунок 7.2. Сімейство аеродинамічних характеристик вітрової турбіни при різних швидкостях вітрового потоку (кут атаки лопаті $\beta=0^\circ$)

Як чітко простежується з номограм (рис. 7.2), кожному фіксованому значенню швидкості набігаючого потоку (від 5 м/с до 11 м/с) відповідає своя унікальна точка локального екстремуму, в якій турбіна здатна розвинути максимальну вихідну потужність. Для конфігурації досліджуваного об'єкта розрахунковою (базовою) прийнято швидкість вітру $v_{base} = 10,15$ м/с (на графіку відображено класичну криву для 10 м/с), при якій досягається номінальна одинична потужність ($P_{pu} = 1,0$) за умови номінальної швидкості обертання генератора.

Електромагнітний момент синхронної машини виступає основним інструментом керування експлуатаційними режимами вітротурбіни. Залежно від поточних потреб електричного навантаження, система управління генератором формує гальмівний момент, який дозволяє або прискорювати роторну систему (при зниженні навантаження), або сповільнювати її (при зростанні енергоспоживання).

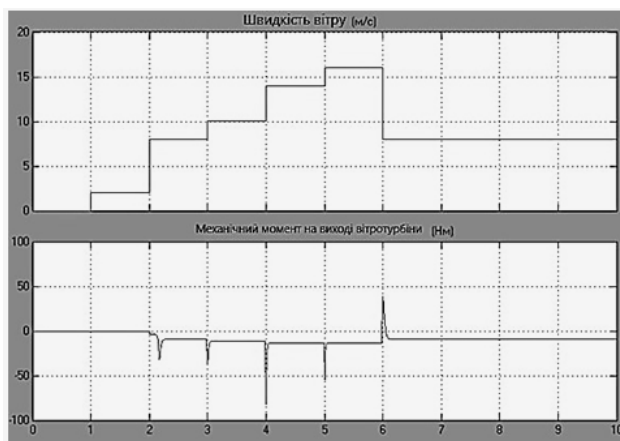
Таке безперервне варіювання кутової швидкості ротора у відповідь на флуктуації сили вітру спричиняє зміну аеродинамічного моменту на лопатях. Завдяки цій властивості реалізується сучасна стратегія пошуку точки максимальної потужності (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Її суть полягає у динамічному переміщенні робочої точки ВЕУ виключно по вершинах екстремумів наведених механічних характеристик, що гарантує підтримання найвищого загального коефіцієнта корисної дії (ККД) генеруючого комплексу за будь-яких метеорологічних умов.

Одержані результати віртуального симулювання базових електромеханічних та енергетичних показників роботи генераторної установки графічно проілюстровано на комплексному рис. 7.3.

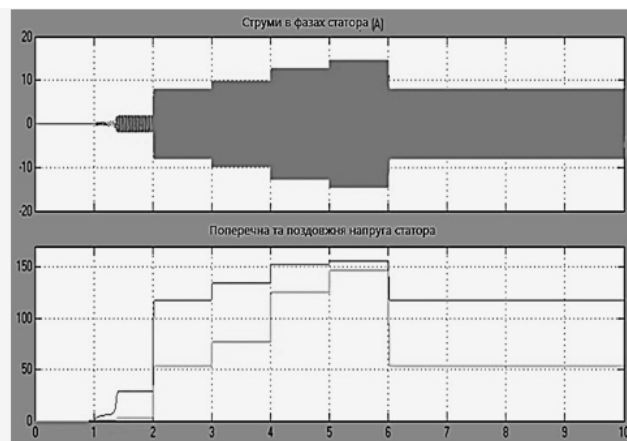
Аналіз наведених осцилограм засвідчує, що тестовий профіль вітрового потоку було свідомо сформовано у вигляді серії дискретних сходинок. Такий підхід класично застосовується в теорії автоматичного керування для ідентифікації динамічної стійкості, часу перехідного процесу та величини перерегулювання системи при жорстких збуреннях.

Детальне дослідження динаміки (рис. 7.3, а) показує, що на інтервалі від 1,0 с швидкість повітряних мас зростає до стартового значення 2,0 м/с, долаючи поріг рушання та ініціюючи початковий розгін ротора. Проте, зважаючи на кубічну залежність механічної потужності від швидкості вітру, згенерованої кінетичної енергії на цьому ранньому етапі критично мало для помітної електричної віддачі.

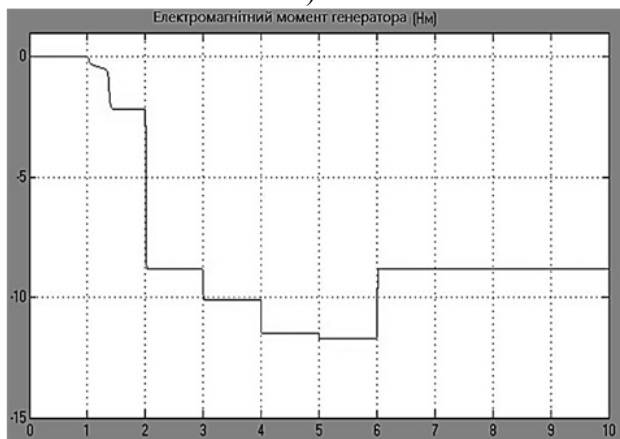
Починаючи з моменту $t = 2,0$ с, імітується різкий порив вітру до позначки 8,0 м/с. Цей стрибок супроводжується інтенсивним прискоренням роторної системи (рис. 7.3, е) та відповідним наростанням генерованої активної потужності (рис. 7.3, д). Подальші сходинкові збурення при $t = 3,0$ с ($v = 10,0$ м/с) та $t = 4,0$ с ($v = 14,0$ м/с) демонструють стабільну та адекватну реакцію контуру збудження машини: фазні струми та напруги статора (рис. 7.3, б, г) пропорційно збільшуються, зберігаючи симетричну синусоїдальну форму без небезпечних резонансних сплесків.



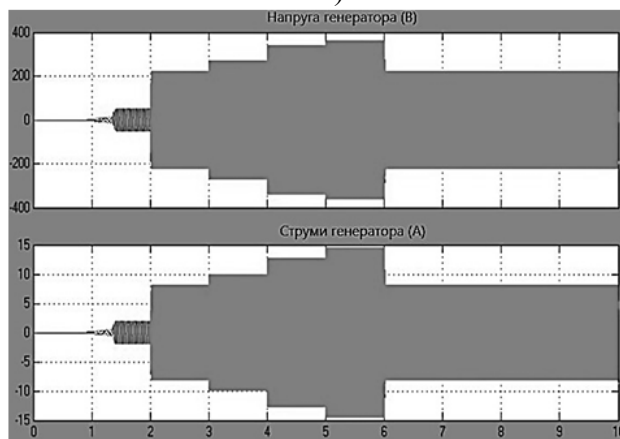
а)



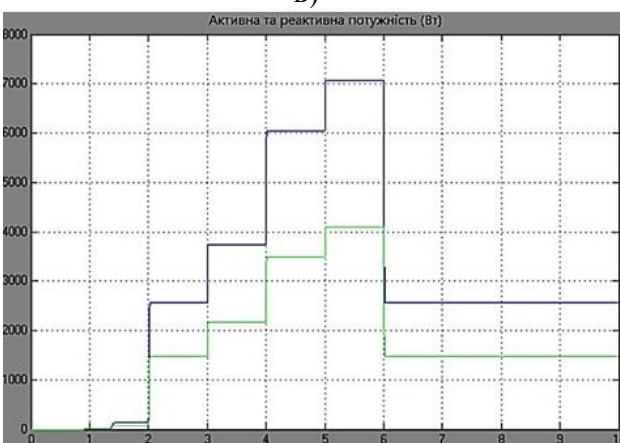
б)



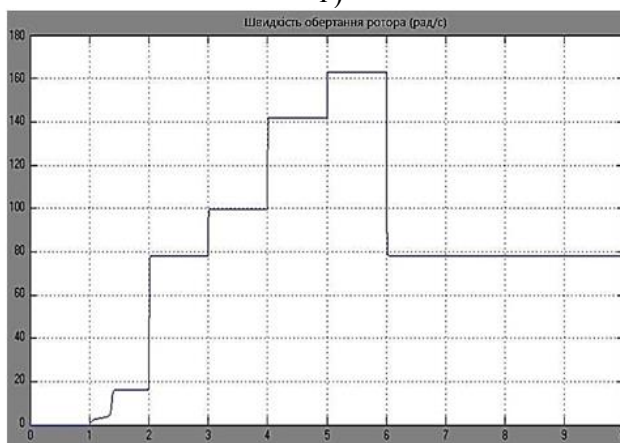
в)



г)



д)



е)

а – вхідний профіль швидкості вітру та еквівалентний механічний момент турбіни; **б** – миттєві значення фазних струмів, а також поперечної і поздовжньої складових напруги статора; **в** – електромагнітний момент на валу синхронної машини; **г** – амплітудні огинаючі лінійних напруг та струмів генератора; **д** – динаміка генерації активної (синя лінія) та реактивної (зелена лінія) потужностей; **е** – кутова частота обертання ротора.

Рисунок 7.3. Осцилограми перехідних процесів електромеханічних та енергетичних координат вітрогенераторної установки

На п'ятій секунді віртуального експерименту ($t = 5,0$ с) швидкість набігаючого потоку сягає свого максимуму в рамках розробленого тесту – 16,0 м/с. Цей експлуатаційний режим перевищує базовий та виводить установку на номінальні параметри генерації. Електромагнітний момент (рис. 7.3, в) стабілізується на робочому рівні ≈ -12 Н·м (від'ємне значення вказує на генераторний режим гальмування), а вихідна активна потужність досягає пікової позначки у 7,1 кВт. За таких умов енергетичний надлишок, що перевищує поточні потреби підключеного споживача, автоматично перенаправляється через випрямний блок на поповнення ємності локальних акумуляторних батарей. Після зниження вітру на шостій секунді ($t = 6,0$ с) до 8,0 м/с, система без зривів синхронізації повертається до попереднього енергетичного стану.

Справедливо зауважити, що застосований ступінчастий закон зміни аеродинамічного напору є ідеалізованим математичним патерном. У реальних фізичних умовах вітер характеризується яскраво вираженою стохастичною природою з наявністю турбулентних високочастотних флуктуацій. Динаміка перехідних процесів у такому випадку суворо підпорядковується диференціальному рівнянню руху обертових мас агрегату:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_{mech} - T_e - F\omega_r$$

де J – сумарний момент інерції вітроколеса та генератора;

ω_r – кутова швидкість обертання;

T_{mech} – механічний рушійний момент;

T_e – електромагнітний гальмівний момент;

F – еквівалентний коефіцієнт в'язкого тертя.

Саме інерційність махових мас J виступає природним демпфером, що дозволяє згладжувати короткочасні пориви вітру, захищаючи електричну мережу від різких коливань потужності. Відповідно, для підвищення валідності та точності подальших експлуатаційних розрахунків, доцільно інтегрувати в створену Simulink-модель емпіричні вітрові профілі (наприклад, згенеровані на базі

						Ар.
						68

розподілу Вейбулла або отримані з реальних метеорологічних трендів заданої географічної локації).

7.2. Розробка та дослідження імітаційної моделі дизель-генераторної установки

З метою оптимізації обчислювальних ресурсів комп'ютера та уникнення надмірної математичної перевантаженості, під час створення віртуального прототипу резервного джерела живлення було введено цілком обґрунтоване інженерне припущення. Воно полягає у тому, що первинний тепловий двигун (дизель) функціонує в режимі жорсткої стабілізації механічної потужності. Таке допущення є максимально наближеним до реальності для сучасних агрегатів, які обладнані швидкодіючими електронними регуляторами обертів (гувернерами), що підтримують сталу кутову швидкість валу незалежно від зовнішніх збурень.

У зв'язку з цим, базовим елементом генеруючої підсистеми виступає математична модель трифазної синхронної машини. Електромагнітні процеси в такому генераторі класично описуються системою диференціальних рівнянь Парка-Горєва, а згенерована активна електрична потужність P_e у сталому режимі роботи визначається за відомим кутовим співвідношенням:

$$P_e = \frac{3 \cdot E_q \cdot U}{X_d} \sin \delta + \frac{3 \cdot U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta$$

де E_q – електрорушійна сила (ЕРС) холостого ходу, що залежить від струму збудження;

U – діюче значення напруги на затискачах статора;

X_d та X_q – відповідно поздовжній та поперечний синхронні індуктивні опори машини;

δ – просторовий кут навантаження (вибігу) ротора відносно магнітного поля статора.

Синтезована архітектура розробленої імітаційної моделі дизель-генераторного комплексу наочно представлена на рис. 7.4.

Як можна пересвідчитися з наведеної топології, центральним вузлом віртуальної схеми є стандартний бібліотечний блок Synchronous Machine SI Fundamental. На його механічний вхід (порт Pm) подається керуючий сигнал стабільного рівня, який імітує номінальну вихідну потужність первинного рушія. На схемі зафіксовано базову константу 8000 Вт, проте під час проведення комплексних експериментів це значення гнучко коригується в діапазоні від 6,1 кВт до 8,4 кВт, що відповідає різним експлуатаційним сценаріям роботи гібридної системи.

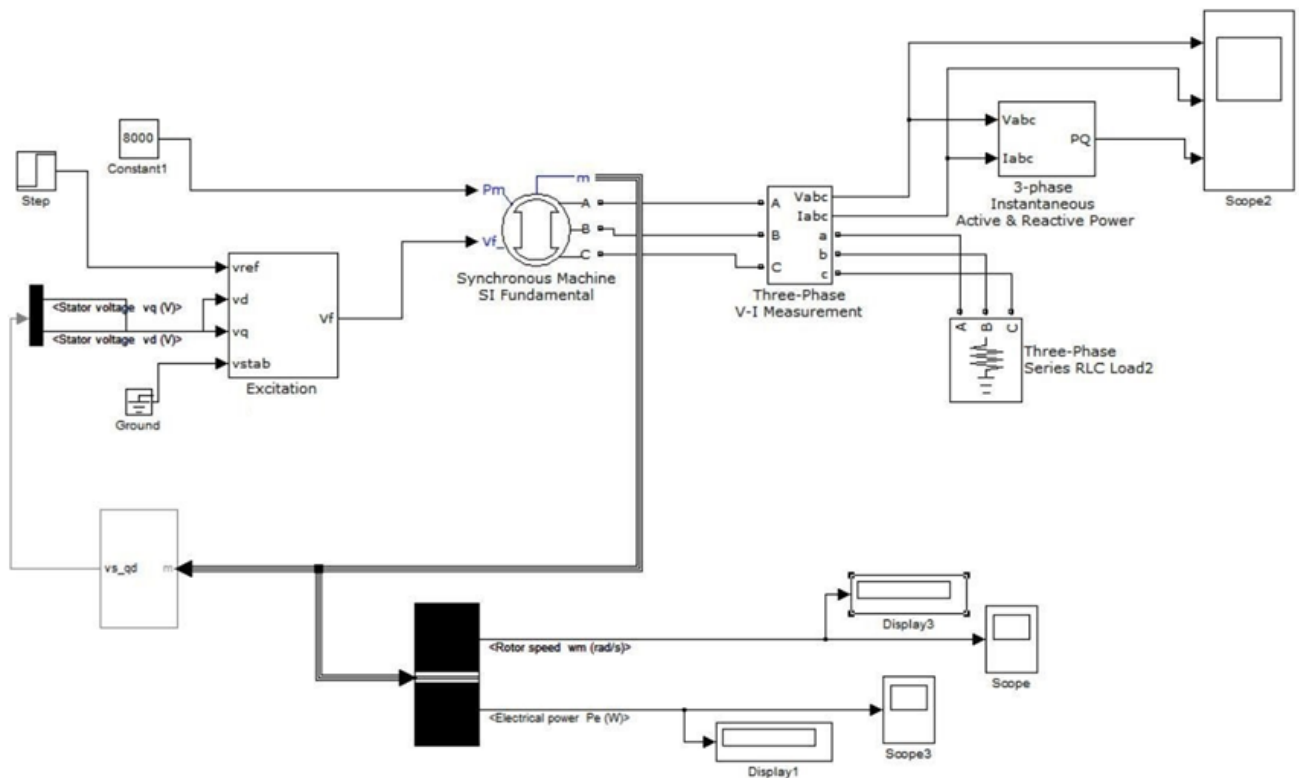


Рисунок 7.4 – Структурна блок-схема імітаційної моделі дизельного електрогенератора у програмному середовищі MATLAB/Simulink

Електромагнітне живлення обмоток ротора забезпечується автоматизованою підсистемою Excitation. Даний модуль формує необхідну напругу збудження (сигнал Vf), безперервно опрацьовуюючи вхідний еталонний сигнал vref (задається блоком Step) та враховуючи зворотні зв'язки за поздовжньою (vd) і поперечною

(vq) складовими вектора статорної напруги. Зазначені складові генеруються допоміжним конвертером координат vs_qd, який аналізує загальний вимірювальний вектор машини m.

Згенерований трифазний змінний струм (порти A, B, C) проходить через вимірювальний термінал Three-Phase V-I Measurement і живить еквівалентне симетричне навантаження, реалізоване блоком Three-Phase Series RLC Load2. Для постійного моніторингу енергетичних характеристик у модель впроваджено аналізатор миттєвої активної та реактивної потужностей (підсистема PQ), дані з якого передаються на осцилограф Scope2.

Крім того, для оцінки електромеханічної стійкості, загальний вектор стану m демультимплексується за допомогою спеціальних селекторів шини на два ключові параметри: механічну частоту обертання ротора ω_m (вимірюється у рад/с) та фактичну віддану електричну потужність P_e (у Вт). Зняття цих показників здійснюється через цифрові дисплеї та графічні вікна Scope і Scope3, що дозволяє фіксувати перехідні процеси у режимі реального часу.

7.2.1. Моделювання контуру автоматичного регулювання збудження.

Ключовим функціональним вузлом імітаційної моделі автономного дизель-генератора є віртуальний модуль Excitation. Дана підсистема детально відтворює динаміку системи автоматичного регулятора напруги (АРН) та контуру магнітного збудження синхронної машини, котра функціонує в ізолюваному генеруючому режимі. Внутрішня структурна організація цього керуючого алгоритму наочно проілюстрована на рис. 7.5.

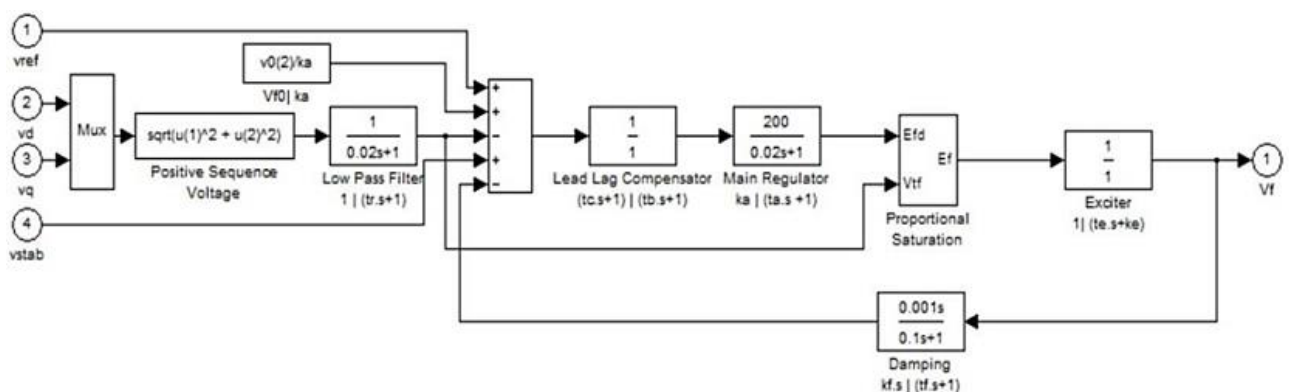


Рисунок 7.5. Структурна блок-схема імітаційної моделі системи автоматичного збудження «Excitation»

Базова архітектура розробленого модуля регулювання спирається на класичну теорію автоматичного керування і містить чотири вхідні інформаційні канали. На перший термінал (v_{ref}) надходить статичний еталонний сигнал бажаної напруги статора. Другий і третій порти (v_d та v_q) приймають поточні миттєві значення проекцій вектора статорної напруги, розкладені за синхронно обертовими осями Парка-Горєва (поздовжньою d та поперечною q). З метою отримання скалярного діючого значення модуля вектора напруги статора $|V_s|$, ці ортогональні компоненти проходять через математичний блок Positive Sequence Voltage, що реалізує геометричне додавання за формулою:

$$|V_s| = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}$$

Отриманий сигнал випрямленої напруги згладжується аперіодичною ланкою першого порядку (фільтром низьких частот Low Pass Filter) з постійною часу $T_r = 0,02$ с, що дозволяє нівелювати високочастотні гармоніки. Четвертий вхід (v_{stab}) алгоритмічно зарезервовано для інтеграції системного стабілізатора (Power System Stabilizer), цільова функція якого полягає у демпфуванні низькочастотних коливань електромагнітної потужності. Усі операнди на входах і виходах підсистеми масштабовані та нормовані у системі відносних одиниць (в.о.).

Головний алгоритм роботи зворотного зв'язку полягає у безперервному обчисленні сигналу неузгодженості (помилки регулювання) ΔU на центральному багатоканальному суматорі. Мікропроцесорний регулятор напруги зіставляє задану еталонну величину з відфільтрованою фактичною напругою та додатковими сигналами стабілізаційного контуру. Сформоване відхилення напруги обробляється основним пропорційно-інтегральним підсилювачем Main Regulator, передаточна функція якого в операторній формі Лапласа записується як:

$$W_R(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1}$$

Згідно з налаштуваннями моделі (рис. 7.5), коефіцієнт підсилення регулятора приймається рівним $K_a = 200$, а його інерційна стала часу становить $T_a = 0,02$ с.

Наступним кроком посилений керуючий вплив пропускається через блок пропорційного обмеження Proportional Saturation, що імітує фізичні межі магнітного потоку та запобігає перенасиченню магнітопроводу ротора. Безпосередньо збуджувач (Exciter) генерує необхідний струм намагнічування в обмотці синхронного генератора, утворюючи фінальний вихідний сигнал V_f .

Для підвищення динамічного запасу стійкості замкненого контуру регулювання у схемі також передбачено внутрішній гнучкий зворотний зв'язок Damping із диференціюючою передаточною функцією $W_f(s) = 0,001s/(0,1s + 1)$. Комплексна математична взаємодія цих блоків гарантує високоточну стабілізацію вихідної напруги електрогенератора та надійне підтримання енергетичного балансу як у квазіусталених режимах, так і під час глибоких перехідних процесів навантаження.

7.2.2. Аналіз динамічних режимів та перехідних процесів дизель-генераторної установки. Результати віртуального симулювання, що відображають динаміку зміни основних електромагнітних координат автономного синхронного генератора під час пускових та комутаційних процесів, візуалізовано на осцилограмах рис. 7.6.

Під час раптового підключення еквівалентного симетричного навантаження до затисків генератора виникає класичний електромагнітний перехідний процес. Фізика цього явища зумовлена інерційністю магнітних полів в індуктивностях обмоток статора та ротора (згідно з законом комутації, потікозчеплення не може змінитися миттєво). Відповідно, миттєве значення перехідного фазного струму статора $i_s(t)$ у початковий момент часу характеризується наявністю не лише періодичної, але й затухаючої аперіодичної (постійної) складової:

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_{st} \sin(\omega t + \gamma_0) + i_{dc}e^{-t/T_a}$$

де I_{st} – діюче (середньоквадратичне) значення струму у встановленому

номінальному режимі;

γ_0 – початкова фаза ввімкнення;

i_{dc} – амплітуда вільної аперіодичної складової струму в момент $t = 0$;

T_a – електромагнітна постійна часу статорного кола, яка визначає швидкість затухання перехідного процесу.

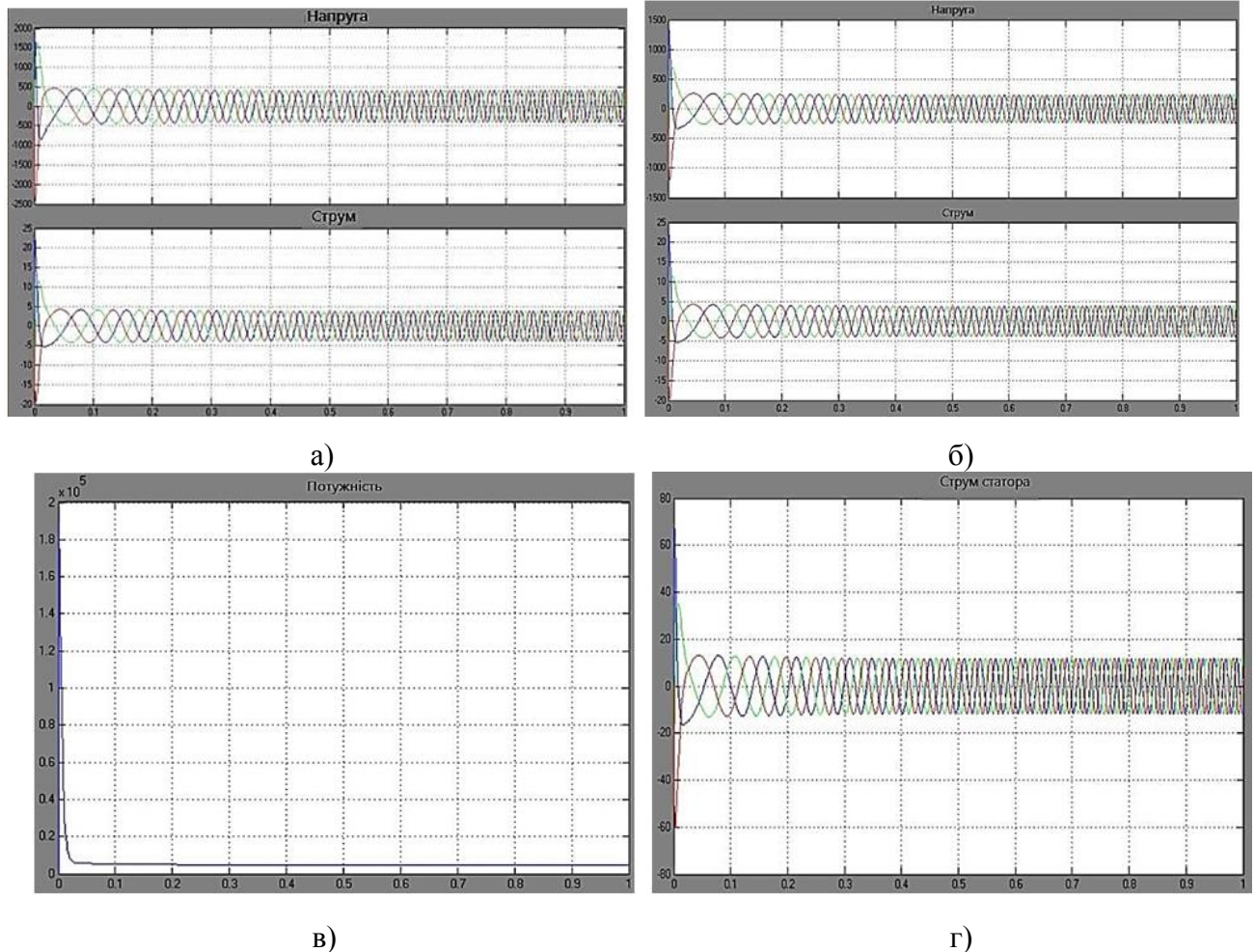


Рисунок 7.6. Комплексні графічні результати імітаційного моделювання електромагнітних перехідних режимів у резервному генераторі

Саме наявність компоненти $i_{dc}e^{-t/T_a}$ пояснює асиметрію струмових огинаючих на початковому етапі осцилограм, що детально показано нижче.

Детальний аналіз наведених осцилограм (рис. 7.6, а, б) дозволяє констатувати, що система автоматичного регулювання збудження (АРЗ) демонструє високу швидкодію. Після моменту підключення навантаження ($t = 0$ с), напруга на затискачах генератора зазнає короткочасного провалу, проте вже через $\Delta t \approx 0,08 \dots 0,12$ с регулятор успішно форсує струм ротора і відновлює номінальний рівень фазної напруги. Надалі форма кривих напруги та струму набуває ідеальної синусоїдальності без ознак небезпечних вищих гармонік, що свідчить про високу якість генерованої електроенергії.

Особливий інтерес становить графік генеруємої потужності (рис. 7.6, в). У момент пуску (прямого підключення RLC-навантаження) спостерігається інтенсивний кидок потужності (аж до рівня $1,8 \times 10^5$ Вт), зумовлений зарядом реактивних елементів мережі та ударними пусковими струмами. Однак, завдяки високому демпфуючому моменту обмоток ротора та адекватному налаштуванню ПІ-регулятора напруги, цей надперехідний сплеск стрімко нівелюється. Вже на позначці часу $t = 0,15$ с генератор виходить на стаціонарний енергетичний режим, видаючи у мережу стабільну робочу потужність на рівні $\approx 5,2$ кВт (з урахуванням внутрішніх втрат).

Динаміка струму статора (рис. 7.6, г) повністю підтверджує описану вище математичну модель. Конвергенція (звуження) зовнішньої амплітудної огинаючої струму до свого усталеного значення свідчить про повне затухання вільних струмів у контурах машини, після чого дизель-генератор готовий до сприйняття наступних експлуатаційних збурень.

7.3. Математичне моделювання та імітаційне дослідження буферної системи накопичення енергії

Для забезпечення безперебійного електропостачання локальних споживачів у періоди аеродинамічного штилю або під час проходження пікових навантажень, до складу гібридного енергетичного комплексу інтегровано підсистему акумулювання електричної енергії. В рамках комп'ютерного експерименту розроблено віртуальну модель акумуляторної батареї (АКБ), базова топологія якої

складається з чотирьох послідовно з'єднаних комірок. Загальна проектна енергоємність цього накопичувального блоку розрахована таким чином, щоб повністю компенсувати енергетичний дефіцит та відповідати генеруючій здатності встановленої вітроелектричної установки.

Під час тривалої циклічної експлуатації багатоеlementних накопичувачів (особливо літій-іонного типу) неминуче виникає явище експлуатаційної асиметрії – розбалансування ємностей, внутрішніх опорів та, як наслідок, напруг на окремих комірках. Це призводить до передчасного спрацьовування систем захисту від перезаряду або глибокого розряду, що штучно обмежує ефективну ємність усієї батареї. Щоб нівелювати цей негативний фактор, у розробленій моделі імплементовано пристрій активного вирівнювання заряду на базі комутуючих конденсаторів (Switched-Capacitor Equalizer).

Фізичний принцип дії такої системи базується на порційному перенесенні енергії від комірки з вищим потенціалом до комірки з нижчим. Кількісно об'єм транспортованого електричного заряду Δq між двома суміжними акумуляторами за один повний такт комутації можна описати диференціальним рівнянням перехідного процесу в RC-ланцюзі:

$$\Delta q = C_{eq} \cdot (U_A - U_B) \cdot (1 - e^{-t_c/\tau})$$

де C_{eq} – електрична ємність комутуючого конденсатора;

U_A, U_B – електрорушійні сили першої та другої комірок відповідно;

t_c – тривалість такту (час замкненого стану напівпровідникового ключа);

$\tau = R_{eq} C_{eq}$ – постійна часу зарядно-розрядного контуру, що враховує сумарний еквівалентний опір ключів, з'єднувальних провідників та внутрішній опір самих акумуляторів R_{eq} .

Комплексна архітектура розробленої Simulink-моделі системи керування та активного балансування накопичувача наочно продемонстрована на рис. 7.7.

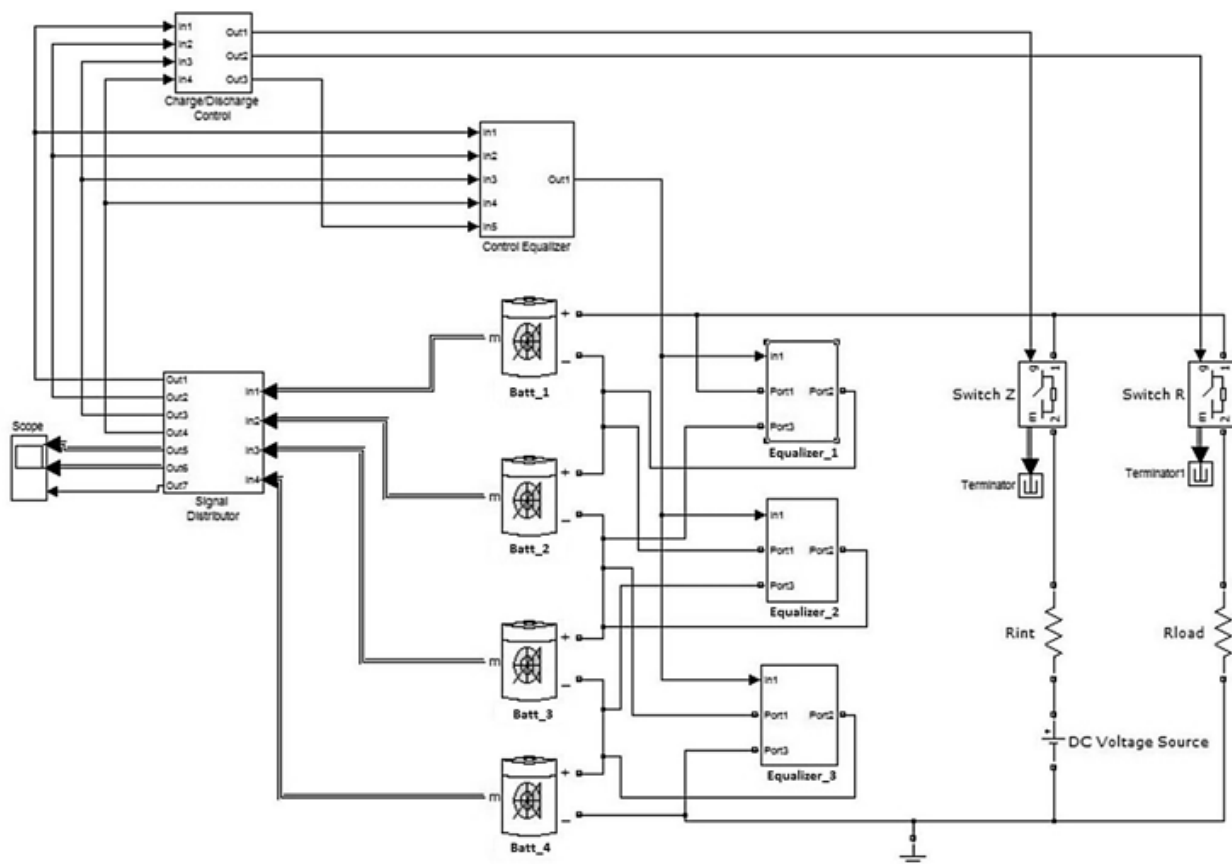


Рисунок 7.7. Структурна імітаційна модель акумуляторної батареї з пристроєм активного конденсаторного балансування

Як випливає з наведеної топологічної схеми, силовий тракт містить чотири акумуляторні модулі (Batt_1, Batt_2, Batt_3, Batt_4). Між кожною парою суміжних елементів паралельно інтегровано локальні балансувальні модулі (Equalizer_1, Equalizer_2, Equalizer_3), всередині яких циклічно перемикаються конденсатори. Зміна глобальних експлуатаційних режимів роботи накопичувача здійснюється за допомогою двох головних силових напівпровідникових контакторів: Switch Z забезпечує шлях струму для заряджання від віртуального джерела живлення (DC Voltage Source), тоді як Switch R підключає батарею до еквівалентного опору навантаження (Rload).

Високорівневий алгоритмічний контроль за станом системи покладено на інформаційно-вимірювальний хаб Signal Distributor. Цей мультиплексорний вузол безперервно зчитує поточні фазові координати (струми, напруги, актуальний ступінь заряду – SOC) з кожної окремої комірки. Далі відфільтровані масиви даних паралельно передаються до логічного модуля керування зарядом-розрядом

Charge/Discharge Control, а також до компараторного блоку Control Equalizer. Саме останній обчислює градієнт напруг між комірками і формує дискретні керуючі імпульси для дозволу чи блокування роботи конденсаторних балансирів, гарантуючи тим самим безпечну та симетричну експлуатацію всього акумуляторного стека.

Функціональна архітектура ємнісного балансира ґрунтується на використанні ланцюгової топології послідовно з'єднаних акумуляторних комірок. До кожної суміжної пари таких комірок паралельно підключається спеціалізований перетворювальний модуль «транспортування заряду». Основним робочим елементом цього модуля виступає комутуючий конденсатор, який по черзі підключається до батарей за допомогою мостової схеми напівпровідникових ключів. Принципова структурна схема цього вирівнюючого пристрою детально відображена на рис. 7.8.

Аналізуючи наведену конфігурацію (рис. 7.8), можна простежити, що проміжні блоки переносу енергії (позначені індексами B2...B4) утворюють надійний каскадний зв'язок між усіма сусідніми елементами накопичувача. Завдяки такій схемотехнічній реалізації, порції електричного заряду здатні хвилеподібно "перетікати" вздовж усього послідовного ланцюга: від комірки з найвищим потенціалом до комірки з найнижчим, послідовно долаючи проміжні ланки.

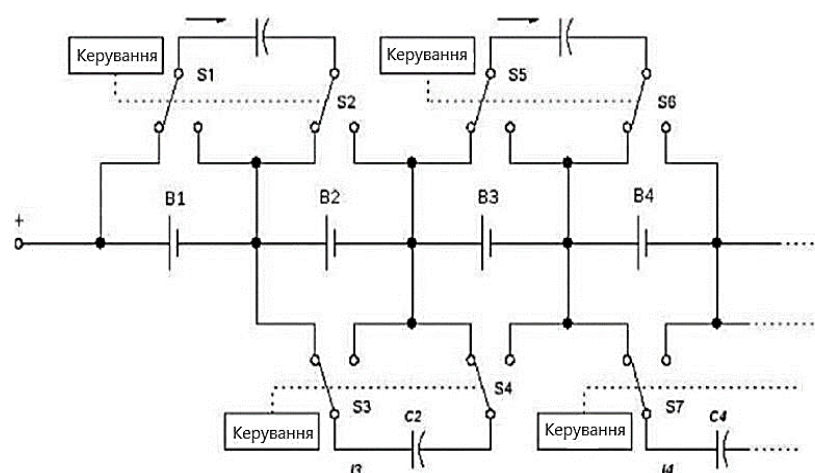


Рисунок 7.8. Структурна схема каскадного пристрою активного балансування акумуляторів на базі комутуючих конденсаторів

Застосування описаного ітераційного алгоритму перерозподілу енергії гарантує високий ступінь симетризації напруг на клеммах окремих комірок. Це, у свою чергу, дозволяє максимізувати глибину корисного розряду (Depth of Discharge) усього акумуляторного стека та суттєво пролонгувати його загальний експлуатаційний ресурс. Для автономних та гібридних мікромереж, які акумулюють надлишки генерації від відновлюваних джерел, підтримка батареї у суворо збалансованому стані є критично важливою умовою забезпечення надійного та безперебійного живлення споживачів.

Разом з тим, віртуальне моделювання та аналіз поведінки системи вказують на певні технічні обмеження обраної топології.

Низька швидкість збіжності: процес пошуку «глобального мінімуму» напруги та транспортування до нього енергії через увесь ланцюжок вимагає значних витрат часу, оскільки заряд передається мікропорціями і лише між суміжними ланками.

Схемотехнічна надмірність: для апаратного втілення такої топології необхідна значна кількість керованих напівпровідникових комутаторів. Їх загальна кількість N_{sw} лінійно зростає залежно від числа послідовних акумуляторів m і визначається за формулою:

$$N_{sw} = 4 \cdot (m - 1)$$

Незважаючи на збільшену кількість електронних компонентів (наприклад, для чотирьох комірок знадобиться $4 \cdot (4 - 1) = 12$ транзисторних ключів), фізичні масогабаритні показники таких балансирів залишаються доволі компактними завдяки використанню сучасних інтегральних MOSFET-модулів. Уніфікований дизайн дозволяє легко масштабувати систему: при встановленні додаткових комірок до масиву АКБ, пропорційно добудовуються відповідні модулі транспортування заряду.

Для проведення імітаційного дослідження у середовищі MATLAB/Simulink було синтезовано збірку з чотирьох послідовно з'єднаних літій-іонних модулів.

Електротехнічні параметри кожного окремого модуля прийняті наступними: номінальна напруга $U_{nom} = 12,0$ В, паспортна електрична ємність $C_{nom} = 480$ А·год. Таким чином, еквівалентний запас енергії однієї комірки становить $W_{cell} = U_{nom} \cdot C_{nom} \approx 5,76$ кВт·год.

З метою жорсткої перевірки працездатності алгоритму вирівнювання, в імітаційну модель було штучно введено стан глибокої експлуатаційної асиметрії. Початкові значення ступеня заряду (SOC_{init}) були розподілені з кроком у 5\%, формуючи сумарний градієнт розбалансування на рівні 15\%:

Модуль 1 (Batt_1): $SOC_1 = 90,0\%$;

Модуль 2 (Batt_2): $SOC_2 = 85,0\%$;

Модуль 3 (Batt_3): $SOC_3 = 80,0\%$;

Модуль 4 (Batt_4): $SOC_4 = 75,0\%$.

Подальша симуляція перехідних процесів здійснювалася у двох критичних експлуатаційних режимах:

- режим стабілізованого заряду (CC-режим), при якому акумулювання енергії відбувається струмом постійної величини $I_{ch} = 3,0$ А (що відповідає щадному струму заряду приблизно 0,006C). Процес математичного моделювання автоматично переривається, щойно напруга хоча б на одній з комірок сягає верхньої межі безпеки (cut-off voltage) $U_{max} = 13,8$ В.

Режим інтенсивного розряду: Віддача накопиченої енергії на еквівалентне навантаження імітується розрядним струмом $I_{dis} = 20,0$ А. Зупинка віртуального експерименту ініціюється системою керування в момент падіння напруги на будь-якому з елементів нижче критичного порогу $U_{min} = 10,5$ В, що повною мірою відтворює захисні функції реальної BMS плати.

7.4. Алгоритмічне та структурне моделювання контурів керування зарядно-розрядними циклами акумуляторів

Для забезпечення адекватної імітації фізичних процесів, що протікають в енергосховищі, віртуальна модель містить розгалужену логіку маршрутизації

						Ар.
						80

струмів. Накопичення енергії від генеруючих установок (BEU) реалізується шляхом замикання головного контактора Switch Z, що забезпечує підключення акумуляторів до шини постійного струму. Натомість, віддача потужності в автономну мережу споживача відбувається через активацію розрядного ключа Switch R. Для уникнення математичних сингулярностей під час обчислень матриць стану у середовищі Simulink, усі неактивні цифрові та аналогові порти термінуються узгоджувальними елементами – Terminator.

Проведемо поглиблений функціональний аналіз ключових керуючих модулів, які формують архітектуру системи (згідно базової топології на рис. 7.7).

А. Підсистема інформаційної маршрутизації (Signal Distributor). Даний блок виконує роль високошвидкісного терміналу збору даних (DAQ-модуля). Його головне завдання полягає у безперервному агрегуванні телеметрії з кожної окремої комірки. Цифрові сенсори фіксують миттєві значення фазних напруг $U_i(t)$ та динамічно транслюють розрахований рівень залишкової ємності $SOC_i(t)$. Отримані масиви інформації не лише візуалізуються на віртуальних осцилографах для аналізу, але й слугують критично важливими вхідними операндами для модулів Charge/Discharge Control та Control Equalizer.

Окрім ретрансляції сигналів, вбудований арифметичний співпроцесор на виході Out 7 формує сигнал максимального градієнта розбалансування:

$$\Delta SOC_{max} = \max_{i \in \{1..4\}} (SOC_i) - \min_{j \in \{1..4\}} (SOC_j)$$

Цей параметр є прямим індикатором загального "здоров'я" акумуляторного стека (State of Health) і дозволяє системі управління своєчасно активувати алгоритми симетризації (вирівнювання) зарядів.

В. Логічний модуль контролю енергетичних режимів (Charge/Discharge Control). Цей мікропроцесорний контролер виконує класичні захисні функції інтелектуальної плати керування (BMS), автоматично генеруючи дискретні керуючі імпульси для силових транзисторів Switch Z та Switch R. Внутрішня логіка прийняття рішень спирається на жорсткі компараторні обмеження:

						Ар.
						81

- *стандартний режим (зарядження)*, при нормальних умовах генерується керуючий вектор [Out1 = 1; Out2 = 0];

- *захист від перенапруги (OVP - Overvoltage Protection)*, якщо потенціал хоча б однієї банки перевищує безпечну межу експлуатації ($U_{max} \geq 13,85$ В), система миттєво розриває ланцюг заряду і переводить комплекс у режим живлення навантаження (керуючий вектор змінюється на [Out1 = 0; Out2 = 1]);

- *захист від глибокого розряду (UVP - Undervoltage Protection)*, при падінні напруги на будь-якому елементі нижче критичного порогу відсікання ($U_{min} \leq 10,55$ В), контролер генерує сигнал переривання (interrupt), який примусово зупиняє роботу математичного вирішувача для запобігання незворотній деградації хімічної структури катода.

Варто відмітити, що налаштування цих порогових значень є гнучким і має строго відповідати електрохімічній специфікації (наприклад, LiFePO₄, NMC, LTO) застосованих акумуляторних комірок.

С. Апаратна модель локальних конденсаторних балансирів (Equalizer 1-3). Для апаратного усунення експлуатаційної асиметрії застосовано три паралельні балансувальні контури.

Розглянемо фізику процесів на прикладі модуля Equalizer 1 (рис. 7.9).

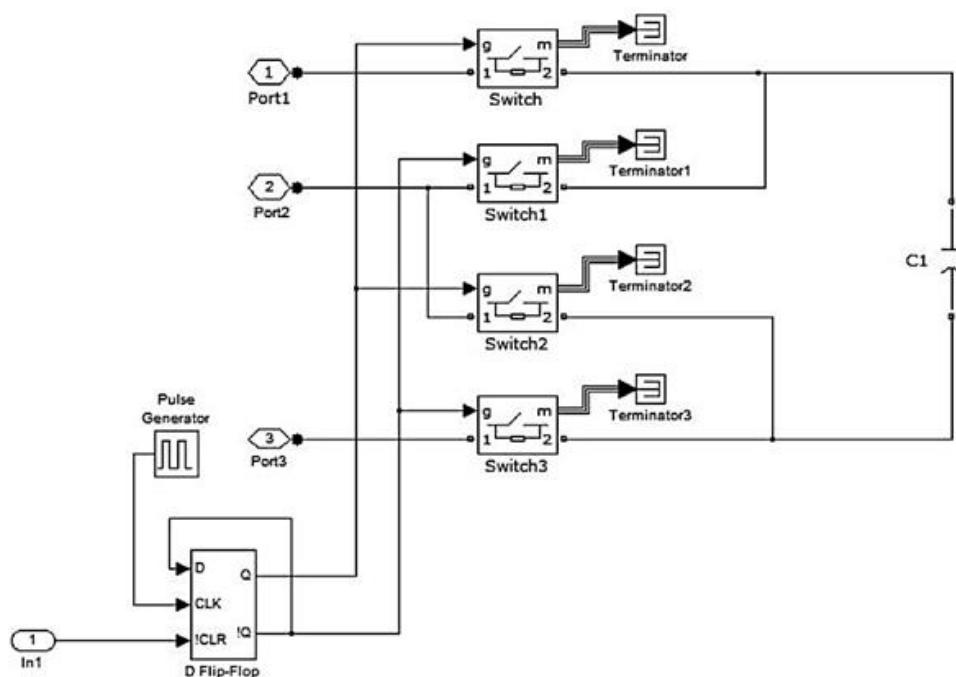


Рисунок 7.9. Схема імітаційної моделі конденсаторного балансира типу Equalizer

Його топологія містить буферний ємнісний накопичувач C_1 , який за допомогою мостової транзисторної групи (Switch1...Switch4) по черговому шунтує акумулятори Batt_1 та Batt_2 через інтерфейси Port1...Port3. Керування ключами реалізовано на базі синхронного D-тригера Flip-Flop1 з інверсним зворотним зв'язком, що забезпечує генерацію суворо протифазних сигналів керування (dead-time control). Робоча тактова частота перемикачів f_{sw} детермінується блоком Pulse Generator.

З точки зору теорії електричних кіл, інтенсивність струму вирівнювання I_{bal} обмежується еквівалентним опором комутованого конденсатора, який описується наступним рівнянням:

$$R_{eq} = \frac{1}{f_{sw} \cdot C_1}$$

Отже, для оптимізації та прискорення процесу симетризації (перекачування енергії) розробник може масштабувати значення C_1 або збільшувати частоту імпульсів f_{sw} . Проте, варто враховувати, що надмірне підвищення частоти неминуче призведе до зростання динамічних теплових втрат на комутацію у самих напівпровідникових ключах, що знизить загальний ККД пристрою.

D. Високорівневий компараторний модуль (Control Equalizer)

Функціональне призначення даного логічного блоку – глобальний моніторинг доцільності проведення циклу балансування. Математичний апарат модуля безперервно відстежує глобальний розкид напруг у масиві: $\Delta U = U_{max} - U_{min}$.

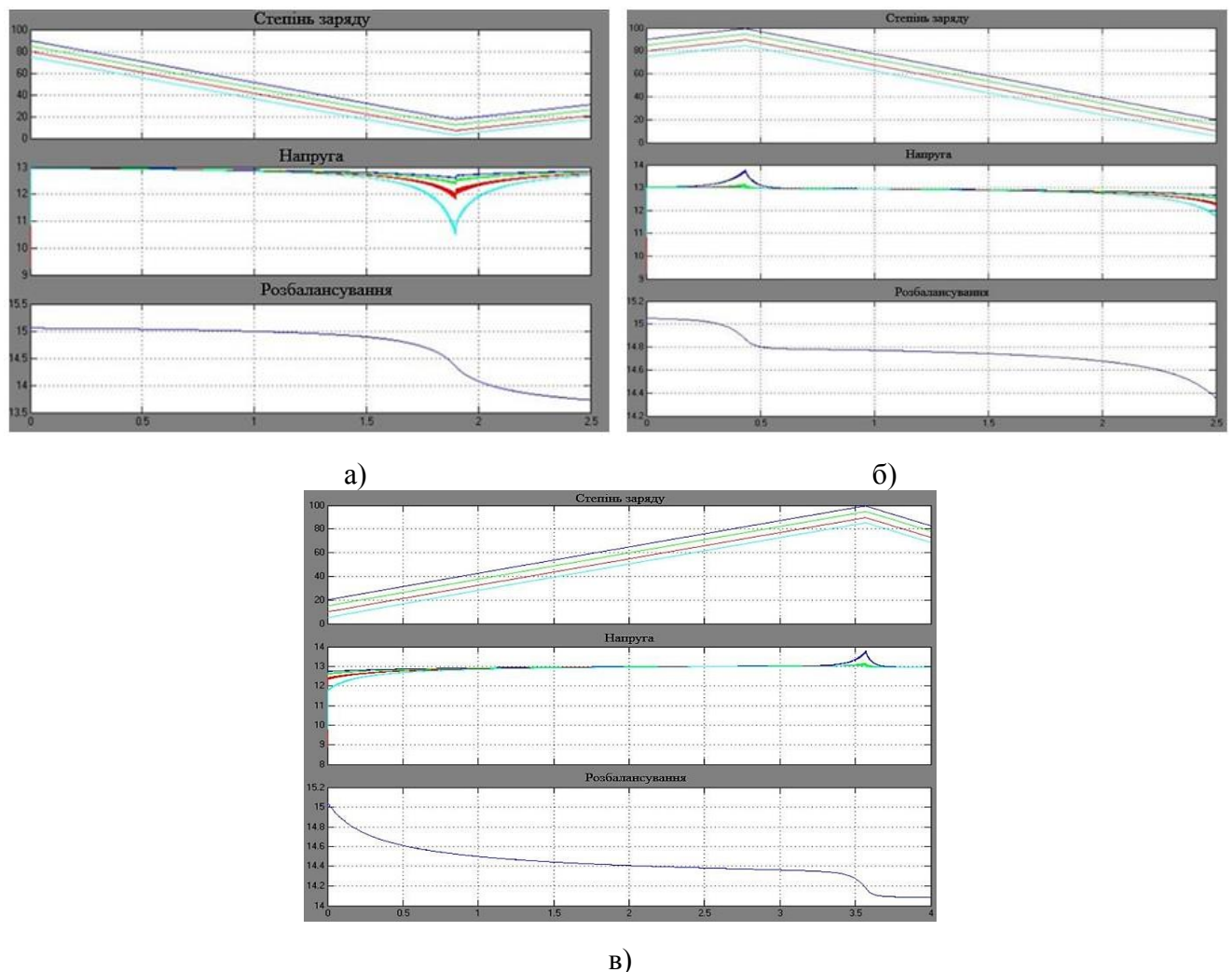
У випадку, коли вирахований диференціал напруг стає меншим за встановлений поріг чутливості (зону гістерезису) $\Delta U_{th} = 0,12$ В, контролер формує сигнал заборони, який апаратно деактивує всі три підсистеми балансування (Equalizer1 – Equalizer3). Це необхідно для уникнення автоколивальних процесів перетікання мікрострумів, коли розбіжність ємностей вже лежить у межах допустимої статистичної похибки.

Ключовою інженерною особливістю є те, що активація системи вирівнювання жорстко синхронізована із сигналами модуля Charge/Discharge Control. Процес дозволяється виключно на термінальних (кінцевих) стадіях заряду

						Ар.
						83

або глибокого розряду. Таке алгоритмічне рішення зумовлене тим фактом, що розрядна напругова крива літій-іонних комірок має яскраво виражену "пласку" ділянку (плато). На цій ділянці різниця напруг залишається мінімальною навіть при суттєвому розбалансуванні ємностей, тому вирівнювання буде некоректним і малоефективним. Натомість, на "краях" кривої (біля повної зарядки або розрядки) градієнт напруг експоненційно зростає, що дозволяє компараторам працювати з максимальною інформаційною точністю.

Одержані масиви даних щодо динаміки зміни основних електротехнічних координат накопичувача енергії під час робочих циклів (віддача та споживання потужності) візуалізовано у формі комплексних осцилограм на рис. 7.10.



а – режим глибокого розрядження на еквівалентне навантаження; б – форсований заряд від номінального стану; в – повний цикл заряджання з глибоко розрядженого стану

Рисунок. 7.10. Часові осцилограми перехідних процесів у багатоелементній акумуляторній батареї

Детальне дослідження сімейства характеристик на рис. 7.10, а (режим генерації) дозволяє зафіксувати наступні експлуатаційні показники:

Загальна тривалість автономного живлення навантаження до моменту спрацювання апаратного захисту (падіння потенціалу на лімітуючому модулі Batt_4 нижче порогу відсікання у 10,55 В) склала $t_{dis} \approx 5,3$ години.

За цей часовий інтервал інтегральний показник розбалансування стека деградував (покращився) з початкового градієнта $\Delta SOC_{max} = 15,0 \%$ до рівня 14,25 %.

Відповідно, інтенсивність конденсаторної симетризації в розрядному режимі становить лише близько 0,14 % за годину. Така низька швидкість збіжності має чітке електротехнічне пояснення. Під час протікання значного розрядного струму I_{dis} , на внутрішньому еквівалентному опорі акумуляторів R_{in} виникає суттєве падіння напруги:

$$\Delta U_{drop} = I_{dis} \cdot R_{in}$$

Це явище спотворює реальну картину електрорушійної сили (ЕРС) комірок, зменшуючи ефективну різницю потенціалів, яка і є головною рушійною силою для перетікання мікропорцій заряду через комутовані конденсатори $C_1 - C_3$.

Натомість, розглядаючи осцилограму штатного заряджання (рис. 7.10, б), спостерігається принципово інша кінематика процесу:

Процес акумулювання енергії до досягнення верхньої межі безпеки $U_{max} = 13,85$ В на лідерній комірці (Batt_1) тривав лише $t_{ch} \approx 1,25$ години.

За цей порівняно короткий проміжок часу інтелектуальна система спромоглася зменшити експлуатаційну асиметрію на 0,8 % (з 15,0 % до 14,2 %).

Звідси випливає, що ефективність роботи ємнісного балансира під час заряду зростає майже в 4 рази порівняно з розрядним циклом. Це явище має суворе фізико-хімічне обґрунтування: на фінальній стадії заряду (режим наближення до Constant Voltage) вольт-кулонна характеристика літєвої комірки $U = f(SOC)$ набуває різко вираженого експоненційного характеру. Градієнт напруг між банками стає максимальним, що прямо пропорційно збільшує величину транспортованого заряду у конденсаторних ланках. Крім того, зовнішнє джерело живлення генерує

						Ар.
						85

надлишкову потужність, необхідну для компенсації теплових втрат на перемикання ключів.

Нарешті, графіки на рис. 7.10, в ілюструють найважчий сценарій: повний цикл відновлення ємності глибоко розрядженого масиву.

Тривалість цього безперервного процесу склала $t_{full} \approx 10,1$ години.

Проте фінальне розбалансування знизилося лише до позначки 14,1 %.

Така надзвичайно низька інтегральна ефективність (близько 0,09 % за годину) на довгому інтервалі зумовлена наявністю широкого "пологого плато" на кривій розряду літєвих елементів. У діапазоні SOC від 20\% до 80\% внутрішня ЕРС комірок залишається практично незмінною, незалежно від фактичного запасу енергії. Оскільки миттєвий струм вирівнювання I_{bal} прямо залежить від різниці напруг ($I_{bal} = \frac{U_A - U_B}{R_{eq}}$), на ділянці плато цей струм прямує до нуля, і процес симетризації фактично призупиняється, активізуючись лише на краях робочого діапазону.

З огляду на виявлені технічні недоліки (переважно низьку швидкість збіжності напруг), для підвищення загального ККД гібридного енергокомплексу доцільно впровадити наступні інженерні рішення та шляхи оптимізації та модернізації алгоритмів керування:

Апаратна модернізація. Збільшення робочої частоти комутації f_{sw} транзисторних мостів з одночасним розширенням ємності буферних конденсаторів $C_1 - C_3$, що дозволить мінімізувати еквівалентний опір передачі R_{eq} .

Алгоритмічна адаптація. Застосування багатоступеневого алгоритму заряду з динамічним зменшенням струму I_{ch} на фінальних стадіях (фаза абсорбції). Це надасть балансирам додаткове "вікно часу" для перекачування енергії до моменту неминучого відключення системи за порогом U_{max} .

Топологічна заміна. Перспективним вектором розвитку є перехід від пасивно-конденсаторної (Switched Capacitor) до активної індуктивної (Switched Inductor) або трансформаторної (Flyback) схеми вирівнювання. Такі конфігурації здатні забезпечувати значно вищі та стабільні струми балансування, які практично не залежать від поточної різниці потенціалів між суміжними комірками.

						Ар.
						86

ВИСНОВКИ

У рамках даного кваліфікаційного проекту було успішно розроблено комплексну енергетичну інфраструктуру для заводу, що спеціалізується на виготовленні паперу.

Виконаний детальний аналіз обсягів споживання струму, побудова добових експлуатаційних профілів, оптимізація балансу ємнісних та індуктивних струмів, а також точне знаходження параметрів аварійних пошкоджень дали змогу науково обґрунтувати підбір усього необхідного високовольтного устаткування.

Запропонована архітектура розподільчої мережі повністю задовольняє актуальні інженерні стандарти, гарантуючи промислому об'єкту максимальний рівень безперебійності, зручність планового обслуговування, структурну гнучкість та загальну економічну рентабельність.

У рамках роботи над спеціальним розділом здійснено успішний синтез та багатокритеріальну верифікацію комплексної імітаційної моделі автономного вітро-дизельного енергетичного комплексу в програмному середовищі MATLAB/Simulink. Розроблений математичний апарат дозволив детально дослідити електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси, об'єктивно оцінивши динамічну стійкість генеруючого обладнання під впливом стохастичних збурень швидкості набігаючого вітрового потоку та раптових комутацій електричного навантаження.

Окрім базових джерел генерації, глибокому аналізу піддано алгоритми функціонування буферного накопичувача енергії та його інтелектуальної системи керування (BMS). На базі віртуального експерименту доведено технічну доцільність застосування локальних конденсаторних балансирів для нівелювання експлуатаційної асиметрії акумуляторних комірок. Загалом, одержані результати комп'ютерного симулювання повністю підтверджують проектну надійність розробленої гібридної топології та її здатність гарантувати безперебійне електропостачання цільових споживачів за будь-яких метеорологічних умов.

						Ар.
						87

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.