

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ

ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

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

Виконав здобувач вищої освіти

ІІІ курсу, групи ЕЕ-23мб,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Дмитро МУЗИКАНТ

«____» _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Валентин СОЛДАТЕНКО

«____» _____ 2026 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2026 р.

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

Музиканта Дмитра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

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

Development of a power supply system for an industrial facility of a textile profile

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 текстильного 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 _____

Дмитро МУЗИКАНТ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 95 с.; 16 рис.; 21 табл.; 5 джерел

Музикант Д. М. Розробка системи електропостачання промислового об'єкта текстильного 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 текстильного профілю.

Виконані ґрунтовні розрахунки енергетичних потреб виробничого майданчика, знаходження ключових характеристик добових змін потужності, оцінка балансу реактивних струмів і вивчення аварійних режимів роботи ліній сформували міцну базу задля аргументованого підбору високовольної комутаційної апаратури. Спроекована завдяки цим всебічним вишукуванням конфігурація енергомережі абсолютно відповідає жорстким інженерним стандартам новітньої індустрії. Вона гарантує бездоганну безперебійність роботи, належну адаптивність до навантажень і зручність технічного обслуговування застосованих агрегатів.

У спеціальному розділі досліджено систему автоматичного керування вітроелектричною установкою на базі генератора подвійного живлення. Шляхом моделювання в MATLAB/Simulink верифіковано ефективність частотного перетворювача з Віденським випрямлячем в умовах нестабільного вітру. Спектральний аналіз підтвердив високу якість струму: коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) становить 2,71%, що повністю задовольняє вимогам стандартів електромагнітної сумісності.

Ключові слова: текстильне виробництво, електричні мережі, вітроелектрична установка

ABSTRACT

Qualification work: 95 p.; 16 Fig.; 21 tables; 5 sources

Muzykant D. M. Development of a power supply system for an industrial facility of a textile profile. – 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 a textile profile.

The performed thorough calculations of the energy needs of the production site, finding the key characteristics of daily power changes, assessing the balance of reactive currents and studying the emergency modes of operation of the lines formed a solid basis for the reasoned selection of high-voltage switching equipment. The power grid configuration designed thanks to these comprehensive searches fully complies with the strict engineering standards of the modern industry. It guarantees impeccable uninterrupted operation, proper adaptability to loads and ease of maintenance of the units used.

In a special section, the automatic control system of a wind turbine based on a dual-feed generator is investigated. The efficiency of a frequency converter with a Vienna rectifier in unstable wind conditions is verified by modeling in MATLAB/Simulink. Spectral analysis confirmed the high quality of the current: the total harmonic distortion (THD) is 2.71%, which fully meets the requirements of electromagnetic compatibility standards.

Keywords: textile production, electrical networks, wind power plant

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	9
1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ...	10
1.2 Розрахунок освітлювальних електричних навантажень	11
1.3 Електричні навантаження в силових мережах вище 1 кВ	12
1.4 Графіки електричних навантажень	18
РОЗДІЛ 2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПІДПРИЄМСТВА	23
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА	26
3.1 Схема зовнішнього електропостачання підприємства текстилю	27
3.2 Схема внутрішнього електропостачання підприємства текстилю	30
РОЗДІЛ 4. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	32
4.1 Баланс реактивної потужності підприємства текстилю	33
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв	35
РОЗДІЛ 5. ВИБІР КІЛЬКОСТІ І ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА	38
РОЗДІЛ 6. ПІДРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ОБРАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	40
6.1 Підрахунок струмів коротких замкнень	40
6.2 Підбір кабельних ліній напругою 10 кВ	49
6.3 Підбір електричних апаратів високої напруги	51
6.4 Підбір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб	51
РОЗДІЛ 7. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ АГРЕГАТІВ	53
7.1 Еволюція використання енергії повітряних мас	53
7.2 Специфікація інженерних параметрів вітроагрегатів та їхнє значення для оптимізації експлуатаційних режимів	61
7.3 Моделювання експлуатаційних режимів вітроенергетичного комплексу з використанням віденської топології випрямляча	74
ВИСНОВКИ	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Музикант Д.М.			Розробка системи електропостачання промислового об'єкта текстильного профілю Development of a power supply system for an industrial facility of a textile profile	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перев.		Солдатенко В.П.					6	95	
Н. контр.		Солдатенко В.П.				ЦНТУ гр. ЕЕ-23мб			
Затвер.		Плешков П.Г.							

ВСТУП

Сьогоднішній прогрес індустрії і постійне збільшення споживання енергії ставлять надзвичайно жорсткі критерії щодо безвідмовності, рентабельності та екологічної безпеки мереж живлення сучасних заводів. Це особливо важливо для сфер з великим рівнем енергозатрат, куди безпосередньо входить текстильне виробництво. Безперервний цикл виготовлення продукції, апаратура, що гостро реагує на найменші перепади напруги, необхідність гарантування раціонального використання ресурсів та безперебійного функціонування роблять створення висококласних проектів електрозабезпечення подібних об'єктів дуже нагальним завданням.

Підприємства з випуску тканин характеризуються величезними енергетичними потребами, тому вони завжди потребують надійної, продуктивної та постійної подачі струму. Гарантування безвідмовного функціонування електричних машин, відмінних параметрів мережі, мінімізації марнотратства в лініях, разом із неухильним виконанням нормативів раціонального енергокористування та захисту персоналу виступають фундаментальними нюансами під час створення інженерних планів живлення промислових майданчиків.

Розробка конфігурації електричної мережі охоплює цілу низку обчислювальних процедур, детальне фінансове доведення доцільності висунутих ідей, підбір найкращих топологій та апаратури. При цьому обов'язково береться до уваги специфічний профіль роботи підприємства, реальні графіки використання потужностей та ймовірність майбутнього масштабування цехів.

Метою кваліфікаційної роботи є створення повноцінного проекту електропостачання об'єкта текстильного профілю. Інфраструктура мусить повністю задовольняти суворі критерії безпеки, експлуатаційної безвідмовності, фінансової вигоди та інженерної раціональності.

Щоб успішно реалізувати вказану ціль, потрібно виконати такі базові кроки:

						Ар.
						7

- обчислити очікувані параметри силової потужності для всього заводу загалом;
- створити план просторового розподілу струмоприймачів, спираючись на специфіку локалізації виробничих механізмів;
- здійснити фінансово-інженерний аналіз для остаточного затвердження конфігурації електричної мережі;
- оцінити баланс перетоків та підібрати засоби компенсації реактивної енергії;
- визначити оптимальну чисельність і номінали перетворювальних підстанцій для задоволення безперебійних потреб фабрики;
- знайти величини струмів аварійних режимів і вибрати відповідне високовольтне обладнання;
- виконати аналіз функціонування та автоматизації контролю роботи вітроенергетичних агрегатів в спеціальному розділі.

Результати проектування придатні для безпосереднього впровадження на реальних об'єктах.

						Ар.
						8

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Базовими даними під час розробки схем живлення виступають величини споживаної потужності. Саме ці показники безпосередньо впливають на конфігурацію мережі, підбір електротехнічних апаратів, вибір джерел живлення, а також формування стратегії раціонального використання ресурсів і гарантування безпечних умов праці. Визначення очікуваної потужності споживачів становить фундаментальну стадію проектування. Завдяки цьому процесу гарантується безперебійна робота енергосистеми промислового об'єкта, високий рівень надійності, безвідмовність підключених струмоприймачів і дотримання всіх державних стандартів.

Ця частина роботи присвячена оцінці енергетичних потреб підприємства легкої промисловості, зважаючи на специфіку його технології. Детально проаналізовано споживачів напругою до 1 кВ. До цієї категорії належать різноманітні приводи, насосні станції, системи вентиляції, компресорні установки та інші промислові механізми. Окремо проведено розрахунок потужності, необхідної для функціонування освітлювальних приладів. Враховано потреби систем чергового та основного освітлення, адже це є критично важливим фактором для створення належного робочого середовища.

Значний акцент зроблено на аналізі споживачів, що підключені до ліній понад 1 кВ. Від цих розрахунків безпосередньо залежить правильність підбору силових трансформаторів, перерізу магістральних кабелів та високовольтних комутаційних пристроїв. Усі математичні операції здійснено базуючись на актуальних нормативних документах. При цьому обов'язково враховувалися графіки завантаження механізмів, показники попиту та ймовірність їх одночасного вмикання. Такий підхід гарантує високу точність даних для майбутнього аргументування обраних інженерних рішень.

Знайдені величини споживання енергії стануть міцним фундаментом для подальших кроків створення проекту електромережі підприємства. Вони

						Ар.
						9

допоможуть досягти оптимальної енергоефективності, високого ступеня безвідмовності та повної відповідності поточним правилам технічної експлуатації.

1.1 Розрахунок силових електричних навантажень в мережі напругою до 1 кВ

Нижче наведено приклад знаходження очікуваної споживаної потужності (для електроприймачів до 1000 В) на прикладі ткацького цеху №1:

$$m = \frac{P_{н.мах}}{P_{н.мін}} = \frac{51,6}{4,56} = 11,3$$

$$P_{зм} = \Sigma P_{н} \cdot K_{в} = 2784,4 \cdot 0,66 = 1837,69 \text{ кВт}$$

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 1837,69 \cdot 0,65 = 1194,5 \text{ квар}$$

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \cdot \Sigma P_{н}}{P_{н.мах}} = \frac{2 \cdot 2784,38}{51,64} = 107,8$$

Оскільки знайдене число виявилось більшим за фактичну кількість пристроїв, тоді приймаємо ефективну кількість $n_{\text{еф}} = 89$, що дорівнює реальному числу струмоприймачів.

Відповідно до довідника [1] беремо показник розрахункового коефіцієнта $K_p = 1,07$.

Таким чином, очікувані енергетичні потреби для ткацького цеху №1 становлять:

$$P_p = P_{зм} \cdot K_p = 1862,6 \cdot 1,07 = 1992,98 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{зм} = 1210,69 \text{ квар}$$

						Ар.
						10

Зведені дані щодо інших підрозділів представлені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Силіві навантаження до 1000 В

№	Назва цеху	N _{спож} шт	P одн.сп.		P _{сум} , кВт	m	K _в	cos φ	tgφ	Сер. зм. нав.		n _{эф}	K _p	Розрах. навант.		
			min, кВт	max, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
1	Прядильний корпус	89	4,56	51,6	2784,4	11	0,66	0,84	0,65	1837,69	1194,5	89	1,07	1966,3	1194,5	2300,71
2	Ткацький корпус	92	5,06	52,7	2683,1	10	0,65	0,85	0,62	1744,03	1080,85	92	1,07	1863,8	1080,85	2154,53
3	Оздоблювальний корпус	104	4,76	149	3219,8	31	0,6	0,85	0,62	1931,85	1197,25	43	1,12	2170,3	1197,25	2478,66
4	Швейний корпус	48	4,05	55,7	1498,5	14	0,6	0,85	0,62	899,1	557,21	48	1,12	1003,4	557,21	1147,77
5	Блок виробничих корпусів № 5–7	110	5,06	55,7	2176,9	11	0,6	0,85	0,62	1306,13	809,46	78	1,09	1421,7	809,46	1635,95
6	Цех сортування	11	48,6	106	617,63	2,2	0,5	0,8	0,75	308,81	231,61	11	1,36	418,9	231,61	478,67
7	Дільниця первинної очистки	16	8,1	12,2	151,88	1,5	0,25	0,5	1,73	37,97	65,76	16	1,54	58,44	65,76	87,98
8	Ткацька дільниця № 1	24	9,11	32,4	313,88	3,6	0,35	0,7	1,02	109,86	112,07	19	1,37	150,83	112,07	187,91
9	Крутильно-нитковий цех	14	9,11	21,3	258,19	2,3	0,6	0,7	1,02	154,91	158,04	14	1,24	191,36	158,04	248,18
10	Ткацька дільниця № 2	26	11,1	17,2	415,13	1,5	0,35	0,7	1,02	145,29	148,23	26	1,31	190,53	148,23	241,4
11	Автогараж	21	11,1	48,6	415,13	4,4	0,6	0,7	1,02	249,08	254,11	17	1,21	301,36	254,11	394,2
12	Фарбувально-бракувальний цех	69	4,66	108	1964,3	23	0,66	0,8	0,75	1296,41	972,3	36	1,11	1439,7	972,3	1738,92
13	Склад матеріально-технічного забезпечення	51	2,03	48,6	612,56	24	0,6	0,8	0,75	367,54	275,65	25	1,17	429,26	275,65	510,15
14	Склад готових виробів	16	4,05	16,2	243	4	0,5	0,8	0,75	121,5	91,13	16	1,29	156,16	91,13	180,8
15	Насосна станція	9	2,84	14,7	146,81	5,2	0,6	0,7	1,02	88,09	89,87	9	1,31	115,16	98,86	151,77
16	Компресорна станція	10	12,7	243	1569,4	19	0,6	0,7	1,02	941,63	960,65	10	1,29	1212,8	1056,72	1608,61
17	Термінал сировини № 1	11	2,73	11,1	52,65	4,1	0,5	0,8	0,75	26,33	19,74	9	1,4	36,94	21,72	42,85
18	Термінал сировини № 2	13	2,43	12,2	62,78	5	0,5	0,8	0,75	31,39	23,54	10	1,38	43,24	25,89	50,4
19	Термінал сировини № 3	9	2,94	11,1	42,53	3,8	0,5	0,8	0,75	21,26	15,95	8	1,43	30,49	17,54	35,17
	Всього	743	2	243	19228	120	0,6	0,82	0,71	11619	8250,46	158	1,06	12305	8250,5	14814,6

1.2 Розрахунок освітлювальних електричних навантажень

Приклад знаходження параметрів споживання освітлювальних установок для Прядильного корпусу продемонстровано нижче.

$$P_{\text{BCT}} = F \cdot p_0 \cdot 10^{-3} = 2014 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 40,28 \text{ кВТ}$$

$$P_p = K_{\Pi} \cdot K_1 \cdot P_{\text{БСТ}} = 0,95 \cdot 1,2 \cdot 40,28 = 45,92 \text{ кВт}$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 45,92 \cdot 0,484 = 22,23 \text{ кВар}$$

Підсумкові дані щодо решти об'єктів зведено у таблицю 1.2.

						Ap.
						11

Таблиця 1.2. Потужність систем освітлення

№	Назва цеху	$F, \text{ м}^2$	$P_0, \text{ Вт/м}^2$	$P_{\text{вст}}, \text{ кВт}$	$K_{\text{п}}$	K_1	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$P_{\text{р}}, \text{ кВт}$	$Q_{\text{р}}, \text{ квар}$	$S_{\text{р}}, \text{ кВА}$
1	Прядильний корпус	2014	20	40,28	0,95	1,2	0,9	0,48	45,92	22,2	51,01
2	Ткацький корпус	2444	20	48,88	0,95	1,2	0,9	0,48	55,72	27	61,92
3	Оздоблювальний корпус	462	20	9,24	0,95	1,2	0,9	0,48	10,53	5,1	11,7
4	Швейний корпус	2338	20	46,76	0,95	1,2	0,9	0,48	53,31	25,8	59,22
5	Блок виробничих корпусів № 5–7	1380	20	27,6	0,95	1,2	0,9	0,48	31,46	15,2	34,96
6	Цех сортування	929	14	13,01	0,8	1,2	0,9	0,48	12,49	6,05	13,88
7	Дільниця первинної очистки	370	20	7,4	0,95	1,2	0,9	0,48	8,44	4,09	9,38
8	Ткацька дільниця № 1	1470	18	26,46	0,8	1,2	0,9	0,48	25,4	12,3	28,22
9	Крутильно-нитковий цех	1103	16	17,65	0,95	1,2	0,9	0,48	20,12	9,74	22,35
10	Ткацька дільниця № 2	2048	18	36,86	0,8	1,2	0,9	0,48	35,39	17,1	39,32
11	Автогараж	763	14	10,68	0,95	1,2	0,9	0,48	12,18	5,9	13,53
12	Фарбувально-бракувальний цех	690	18	12,42	0,95	1,2	0,9	0,48	14,16	6,85	15,73
13	Склад матеріально-технічного забезпечення	1174	18	21,13	0,95	1,2	0,9	0,48	24,09	11,7	26,76
14	Склад готових виробів	2270	10	22,7	0,6	1,2	0,9	0,48	16,34	7,91	18,15
15	Насосна станція	451	12	5,41	0,95	1,2	0,9	0,48	6,17	2,99	6,86
16	Компресорна станція	1250	12	15	0,85	1,2	0,9	0,48	15,3	7,41	17
17	Термінал сировини № 1	825	10	8,25	0,6	1,2	0,9	0,48	5,94	2,87	6,6
18	Термінал сировини № 2	1300	10	13	0,6	1,2	0,5	1,73	9,36	16,2	18,73
19	Термінал сировини № 3	932	10	9,32	0,6	1,2	0,9	0,48	6,71	3,25	7,46
20	Заводська територія	144371	0,2	28,87	1	1,1	0,5	1,73	32,33	56	64,67
	Всього	168854		420,9					441,4	266	515,2

1.3 Електричні навантаження в силових мережах вище 1 кВ

Результати розрахунків навантажень вище 1 кВ показані в табл. 1.3.

Таблиця 1.3. Силові навантаження вище 1 кВ

Назва	N спож шт	P одн.сп.		P сум. , кВт	m	K _в	cosφ	tgφ	Сер. зм. нав.		n _{еф}	K _р	Розрах. навантаж.		
		мін, кВт	мак, кВт						P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар			P _{розр} , кВт	Q _{розр} , квар	S _{розр} , кВА
ТП1, 2, 3															
Прядильний корпус															
силове:	89	4,56	51,64	2784,38	11,3	0,66	0,84	0,65	1837,69	1194,5	89	1,07	1966,33	1194,5	2300,71
освітлювальне:				40,28					45,92	22,23					
Всього:				1877,97	1195				2012,25	1216,73			2351,72		
Ткацький корпус															
силове:	92	5,06	52,65	2683,13	10,4	0,65	0,85	0,62	1744,03	1080,85	92	1,07	1863,8	1080,85	2154,53
освітлювальне:				48,88					55,72	26,97					
Всього:				1792,91	1081				1919,52	1107,82			2216,33		
Дільниця первинної очистки															
силове:	16	8,1	12,15	151,88	1,5	0,25	0,5	1,73	37,97	65,76	16	1,54	58,44	65,76	87,98
освітлювальне:				7,4					8,44	4,09					
Всього:				45,37	65,76				66,88	69,85			96,69		
Ткацька дільниця № 1															
силове:	24	9,11	32,4	313,88	3,6	0,35	0,7	1,02	109,86	112,07	19	1,37	150,83	112,07	187,91
освітлювальне:				26,46					25,4	12,29					
Всього:				136,32	112,1				176,23	124,36			215,67		
Крутильно-нитковий цех															
силове:	14	9,11	21,26	258,19	2,3	0,6	0,7	1,02	154,91	158,04	14	1,24	191,36	158,04	248,18
освітлювальне:				17,65					20,12	9,74					
Всього:				172,56	158				211,48	167,78			269,96		
Ткацька дільниця № 2															
силове:	26	11,14	17,21	415,13	1,5	0,35	0,7	1,02	145,29	148,23	26	1,31	190,53	148,23	241,4
освітлювальне:				36,86					35,39	17,13					
Всього:				182,15	148,2				225,92	165,36			279,92		
Всього по ТП1, 2, 3:															
силове:	264	4,55	52,62	6603	11,7	0,62	0,84	0,69	4028	2750,62	254	1,01	4028	2750,62	4877,37
освітлювальне:				177,5					190,98	92,45					
БК 0,4 кВ				-3093					-3093						
Всього на шинах 0.4 кВ ТП1, 2, 3:				4205,26	-342				4218,74	-249,6			4226,12		

Продовження табл. 1.3

Втрати в трансформаторах:									47,23	246,78					
Кількість трансформаторів: 6															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,7$															
Всього на шинах 10 кВ ТП1, 2, 3:									4265,97	-2,81			4265,97		
ТП 4, 5, 6															
Оздоблювальний корпус															
силове:	104	4,76	148,8	3219,75	31,3	0,6	0,85	0,62	1931,85	1197,25	43	1,12	2170,33	1197,25	2478,66
освітлювальне:				9,24					10,53	5,1					
Всього:				1941,09	1197				2180,86	1202,35			2489,08		
Блок виробничих корпусів № 5–7															
силове:	110	5,06	55,69	2176,88	11	0,6	0,85	0,62	1306,13	809,46	78	1,09	1421,65	809,46	1635,95
освітлювальне:				27,6					31,46	15,23					
Всього:				1333,73	809,5				1453,11	824,69			1669,93		
Склад матеріально-техн. забезп.															
силове:	51	2,03	48,6	612,56	24	0,6	0,8	0,75	367,54	275,65	25	1,17	429,26	275,65	510,15
освітлювальне:				21,13					24,09	11,66					
Всього:				388,67	275,7				453,35	287,31			536,47		
Термінал сировини № 3															
силове:	9	2,94	11,14	42,53	3,8	0,5	0,8	0,75	21,26	15,95	8	1,43	30,49	17,54	35,17
освітлювальне:				9,32					6,71	3,25					
Всього:				30,58	15,95				37,2	20,79			42,57		
Заводська територія															
освітлювальне:				28,87					32,33	56					
Всього:				28,87	0				32,33	56			64,67		
Всього по ТП 4, 5, 6:															
силове:	277	2,02	148,8	6048,72	74,4	0,61	0,85	0,64	3625	2297,18	82	1,1	3939,61	2297,18	4560,44
освітлювальне:				96,08					105,04	91,24					
БК 0,4 кВ				-1465					-1465						
Всього на шинах 0,4 кВ ТП 4, 5, 6:				3721,06	831,8				4044,65	923,05			4148,64		
Втрати в трансформаторах:									46,06	240,91					
Кількість трансформаторів: 6															
Номинальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,68$															

Продовження табл. 1.3

Всього на шинах 10 кВ ТП 4, 5, 6:									4090,71	1163,95			4253,08		
ТП 7															
Красильно-вибракувальний цех															
силове:	69	4,66	108,3	1964,25	23,3	0,66	0,8	0,75	1296,41	972,3	36	1,11	1439,69	972,3	1738,92
освітлювальне:				12,42					14,16	6,85					
Всього:				1308,83	972,3				1453,85	979,15			1753,58		
Всього по ТП 7:															
силове:	69	4,66	108,3	1964,25	23,3	0,66	0,8	0,75	1296,41	972,3	36	1,11	1439,69	972,3	1738,92
освітлювальне:				12,42					14,16	6,85					
БК 0,4 кВ				-1085					-1085						
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 7:				1308,83	-113				1453,85	-105,85			1457,7		
Втрати в трансформаторах:									16,53	86,18					
Кількість трансформаторів: 2															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_3 = 0,72$															
Всього на шинах 10 кВ ТП 7:									1471,62	-20,03			1471,76		
ТП 8															
Компресорна установка															
силове:	10	12,66	243	1569,38	19,2	0,6	0,7	1,02	941,63	960,65	10	1,29	1212,84	1056,72	1608,61
освітлювальне:				15					15,3	7,41					
Всього:				956,63	960,7				1228,14	1064,13			1624,23		
Насосна станція															
силове:	9	2,84	14,68	146,81	5,2	0,6	0,7	1,02	88,09	89,87	9	1,31	115,16	98,86	151,77
освітлювальне:				5,41					6,17	2,99					
Всього:				93,5	89,87				121,33	101,85			158,33		
Всього по ТП 8:															
силове:	19	2,83	242,9	1715,34	86,7	0,61	0,71	1,03	1029,2	1050	14	1,25	1271,38	1050	1648,91
освітлювальне:				20,4					21,46	10,39					
БК 0,4 кВ				-607					-607						
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 8:				1049,61	442,8				1292,84	453,19			1369,97		
Втрати в трансформаторах:									15,16	79,34					
Кількість трансформаторів: 2															
Номінальна потужність, кВА: 1000															
Коефіцієнт завантаження: $K_3 = 0,68$															

Продовження табл. 1.3

Всього на шинах 10 кВ ТП 8:									1308	532,53			1412,25		
ТП 9, 10															
Швейний корпус															
силове:	48	4,05	55,69	1498,5	13,7	0,6	0,85	0,62	899,1	557,21	48	1,12	1003,44	557,21	1147,77
освітлювальне:				46,76					53,31	25,8					
Всього:				945,86	557,2				1056,75	583,01			1206,85		
Цех сортування															
силове:	11	48,6	106,3	617,63	2,2	0,5	0,8	0,75	308,81	231,61	11	1,36	418,9	231,61	478,67
освітлювальне:				13,01					12,49	6,05					
Всього:				321,82	231,6				431,39	237,66			492,48		
Гаражний бокс															
силове:	21	11,14	48,6	415,13	4,4	0,6	0,7	1,02	249,08	254,11	17	1,21	301,36	254,11	394,2
освітлювальне:				10,68					12,18	5,9					
Всього:				259,76	254,1				313,54	260,01			407,26		
Склад готових виробів															
силове:	16	4,05	16,2	243	4	0,5	0,8	0,75	121,5	91,13	16	1,29	156,16	91,13	180,8
освітлювальне:				22,7					16,34	7,91					
Всього:				144,2	91,13				172,5	99,04			198,9		
Термінал сировини № 1															
силове:	11	2,73	11,14	52,65	4,1	0,5	0,8	0,75	26,33	19,74	9	1,4	36,94	21,72	42,85
освітлювальне:				8,25					5,94	2,87					
Всього:				34,58	19,74				42,88	24,59			49,43		
Термінал сировини № 2															
силове:	13	2,43	12,15	62,78	5	0,5	0,8	0,75	31,39	23,54	10	1,38	43,24	25,89	50,4
освітлювальне:				13					9,36	16,21					
Всього:				44,39	23,54				52,6	42,1			67,33		
Всього по ТП 9, 10:															
силове:	121	2,43	106,3	2888,25	44,2	0,58	0,82	0,73	1635,39	1176,75	55	1,13	1831,14	1176,75	2176,66
освітлювальне:				114,41					109,63	64,7					
БК 0,4 кВ				-555					-555						
Всього на шинах 0.4 кВ ТП 9, 10:				1749,8	622,2				1940,77	686,87			2058,73		
Втрати в трансформаторах:									22,79	119,28					
Кількість трансформаторів: 3															

Продовження табл. 1.3

Номінальна потужність, кВА: 1000																
Коефіцієнт завантаження: $K_z = 0,68$																
Всього на шинах 10 кВ ТП 9, 10:									1963,56	806,16			2122,62			
Всього по об'єкту																
силове:	743	2,02	242,9	19218,9	121,4	0,61	1	0,12	11613,1	1441,7	160	1,07	12298,47	1441,7	12382,68	
освітлювальне:				420,78					441,23	265,61						
Всього:				12033,9	1442				12739,7	1707,3			12853,59			
Потужність КП 0,4 кВ:				-6804,7					-6804,69							
Втрати в трансформаторах:									147,77	772,49						
Всього по об'єкту:									12887,47	2479,79			13123,89			
Високовольтне навантаження																
СД1, 2	2	637,6	30,36	1275,12		0,71	0,91	0,49	892,58	432,3			892,58	-432,3	991,76	
Всього високовольтного навантаж.:									892,58	-432,3			991,76			
Всього по об'єкту 10 кВ:									13779,84	2047,5			13931,34			
КП 10 кВ:				-303,6												
Всього 10 кВ з КП:									13779,84	1743,9			13889,96			

1.4 Графіки електричних навантажень

Підсумкові показники обчислень добових змін потужності фабрики представлені у наступних зведеннях.

Таблиця 1.4. Початкові відомості щодо визначення характеристик енергоспоживання

№	Роб. дні		Вих. дні	
	P, %	Q, %	P, %	Q, %
1	54,6	47,6	47,6	77,9
2	38,5	31,4	47,6	77,9
3	35,4	38,5	47,6	77,9
4	41,5	37,4	47,6	77,9
5	55,7	55,7	47,6	77,9
6	55,7	47,6	47,6	77,9
7	86	62,7	47,6	77,9
8	91,1	71,9	47,6	77,9
9	101,2	101,2	27,3	53,6
10	101,2	101,2	27,3	53,6
11	93,1	67,8	27,3	53,6
12	84	63,8	27,3	53,6
13	94,1	81	27,3	53,6
14	101,2	78,9	27,3	53,6
15	101,2	82	27,3	53,6
16	100,2	67,8	27,3	53,6
17	92,1	79,9	27,3	53,6
18	78,9	57,7	47,6	77,9
19	47,6	40,5	47,6	77,9
20	58,7	60,7	47,6	77,9
21	42,5	48,6	47,6	77,9
22	47,6	49,6	47,6	77,9
23	49,6	48,6	47,6	77,9
24	49,6	45,5	47,6	77,9

Таблиця 1.5. Підсумки оцінки добових змін потужності

№	Зим.дні						Літн. дні					
	Роб. дні			Вих.і дні			Роб. дні			Вих.і дні		
	$P_{д\text{ь}}$ кВт	$Q_{д\text{ь}}$ квар	$S_{д\text{ь}}$ кВА	$P_{д\text{ь}}$ кВт	$Q_{д\text{ь}}$ квар	$S_{д\text{ь}}$ кВА	$P_{д\text{ь}}$ кВт	$Q_{д\text{ь}}$ квар	$S_{д\text{ь}}$ кВА	$P_{д\text{ь}}$ кВт	$Q_{д\text{ь}}$ квар	$S_{д\text{ь}}$ кВА
1	11804	3083	12200	10274	5050	11448	10033	2620	10369	8733	4292	9730
2	8306	2033	8551	10274	5050	11448	7061	1727	7269	8733	4292	9730
3	7651	2492	8046	10274	5050	11448	6503	2118	6839	8733	4292	9730
4	8962	2427	9285	10274	5050	11448	7618	2062	7893	8733	4292	9730
5	12023	3607	12552	10274	5050	11448	10219	3065	10669	8733	4292	9730
6	12023	3083	12411	10274	5050	11448	10219	2620	10550	8733	4292	9730
7	18580	4066	19021	10274	5050	11448	15793	3456	16167	8733	4292	9730
8	19673	4656	20217	10274	5050	11448	16722	3958	17185	8733	4292	9730
9	21859	6558	22822	5902	3475	6849	18580	5574	19398	5016	2954	5822
10	21859	6558	22822	5902	3475	6849	18580	5574	19398	5016	2954	5822
11	20110	4394	20585	5902	3475	6849	17094	3734	17496	5016	2954	5822
12	18143	4131	18608	5902	3475	6849	15422	3512	15817	5016	2954	5822
13	20329	5246	20995	5902	3475	6849	17280	4459	17846	5016	2954	5822
14	21859	5115	22449	5902	3475	6849	18580	4348	19082	5016	2954	5822
15	21859	5312	22496	5902	3475	6849	18580	4515	19121	5016	2954	5822
16	21641	4394	22082	5902	3475	6849	18394	3734	18770	5016	2954	5822
17	19892	5180	20556	5902	3475	6849	16908	4403	17472	5016	2954	5822
18	17050	3738	17455	10274	5050	11448	14493	3178	14837	8733	4292	9730
19	10274	2623	10604	10274	5050	11448	8733	2229	9013	8733	4292	9730
20	12678	3935	13274	10274	5050	11448	10777	3345	11284	8733	4292	9730
21	9181	3147	9705	10274	5050	11448	7804	2676	8250	8733	4292	9730
22	10274	3213	10765	10274	5050	11448	8733	2731	9149	8733	4292	9730
23	10711	3147	11163	10274	5050	11448	9104	2676	9489	8733	4292	9730
24	10711	2951	11110	10274	5050	11448	9104	2509	9443	8733	4292	9730

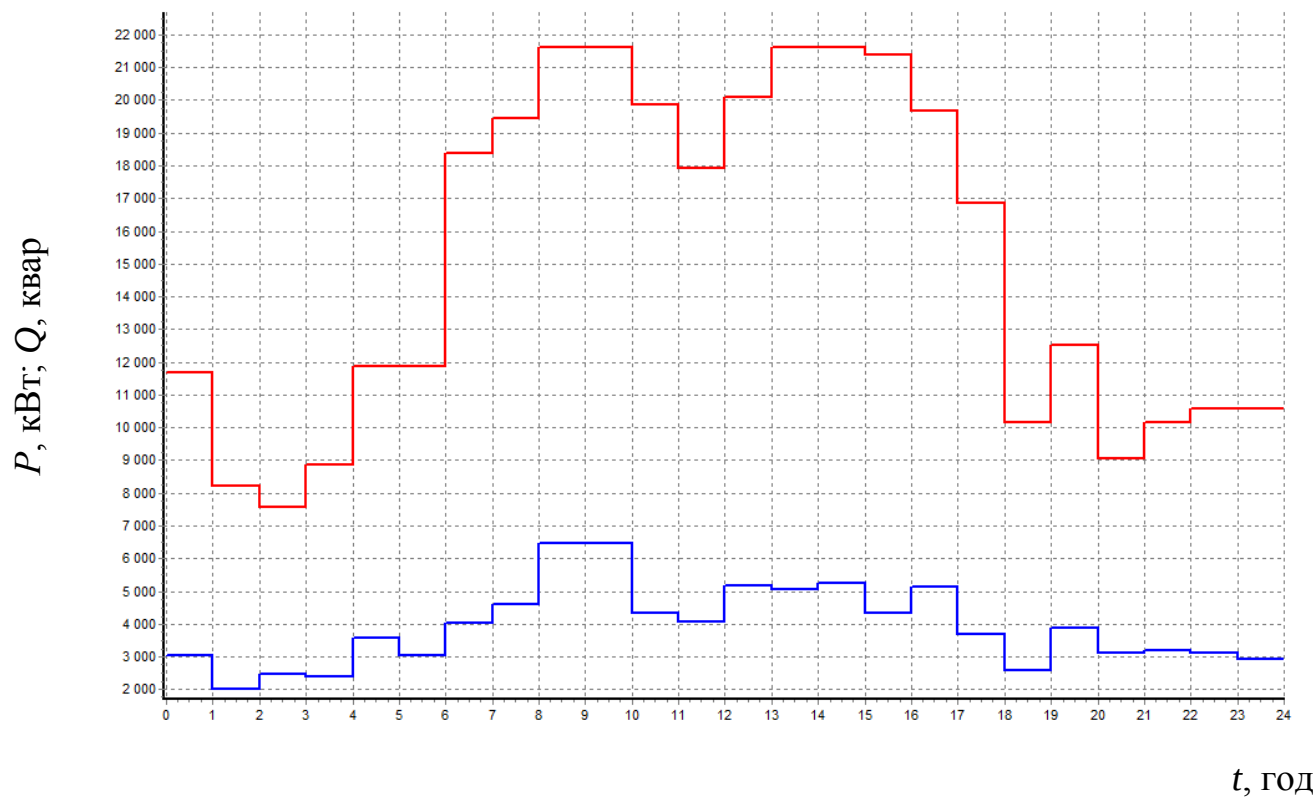


Рис. 1.1. Добові графіки (зим. роб.)

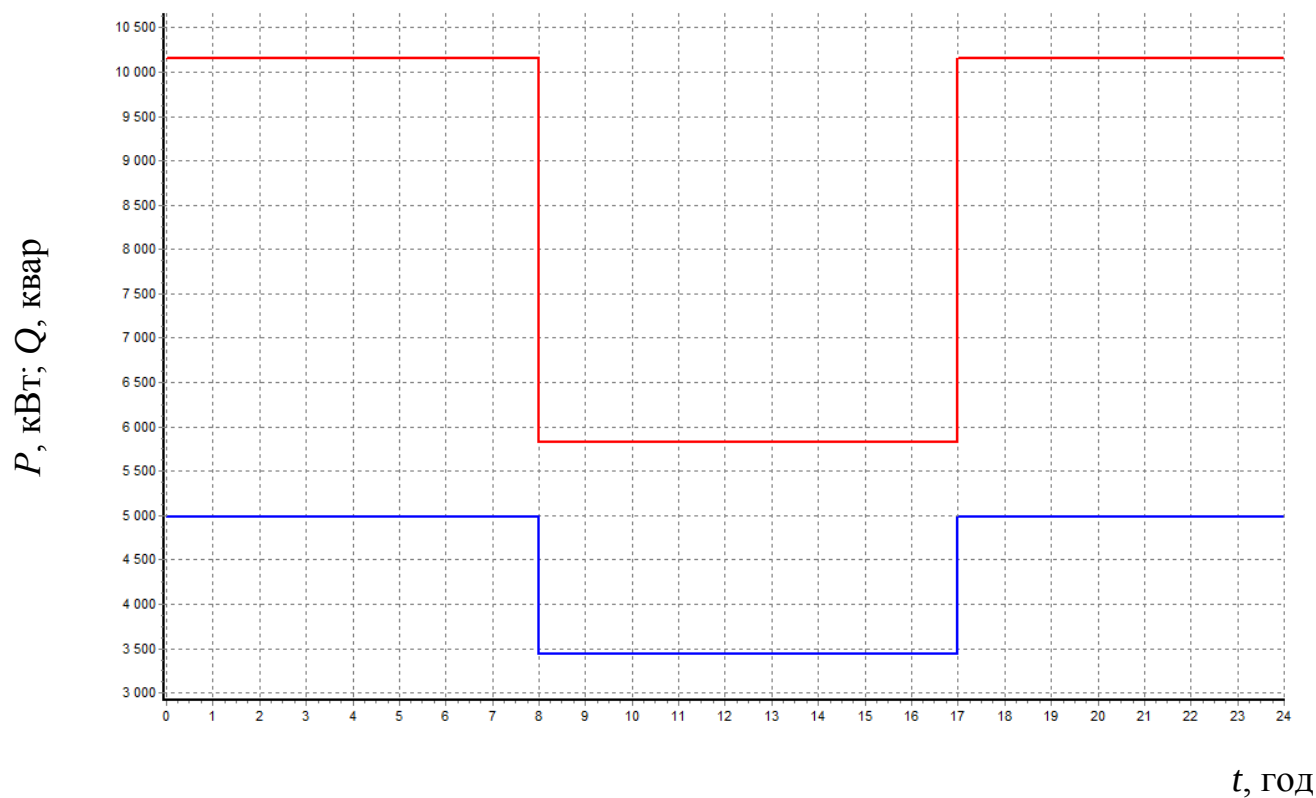


Рис. 1.2. Добові графіки активн. (зим. вих.)

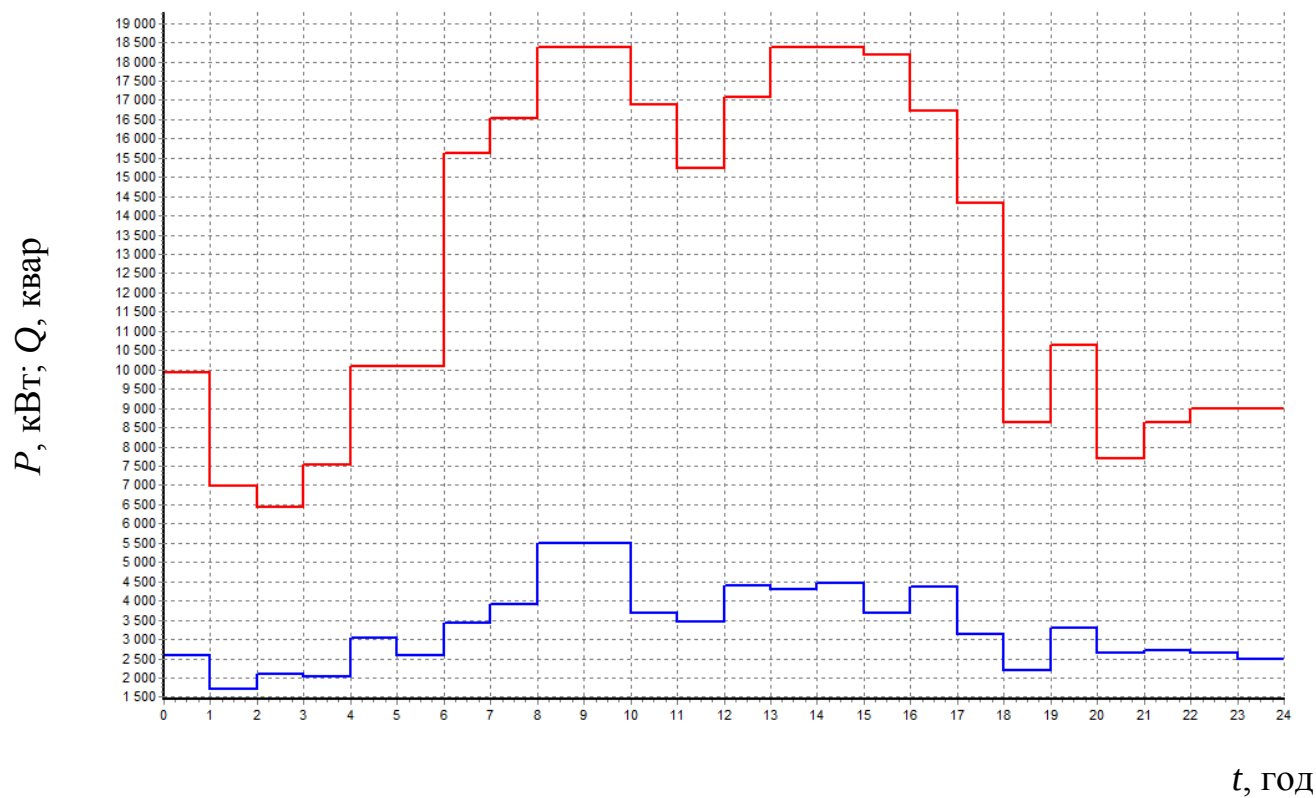


Рис. 1.3. Добові графіки (літ. роб.)

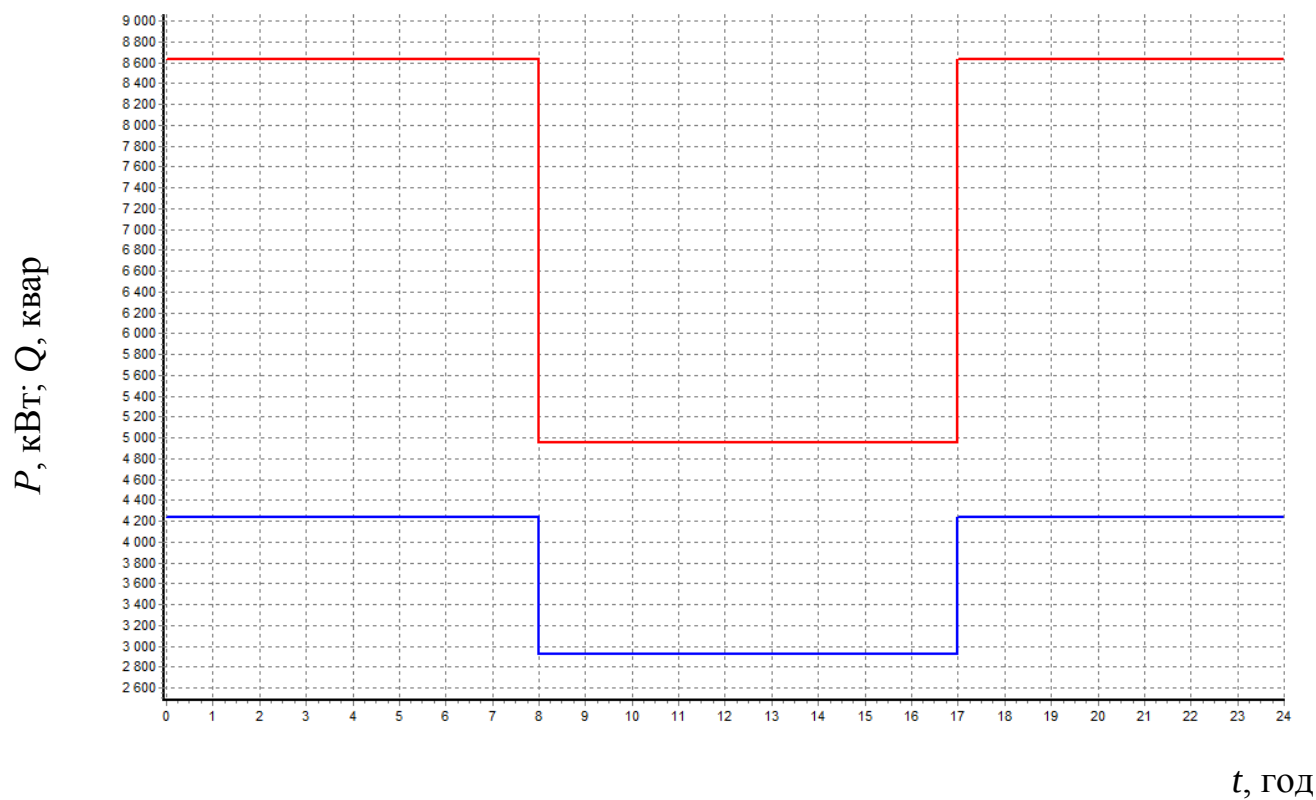


Рис. 1.4 Добові графіки (літ. вих.)

РОЗДІЛ 2

КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПІДПРИЄМСТВА

Щоб грамотно розробити схему живлення підприємства, обов'язковим кроком виступає територіальне дослідження локалізації приймачів струму в межах промислової площадки. План розподілу енергетичних потреб являє собою візуальне представлення активної складової потужності на кресленні об'єкта. Це дає змогу наочно побачити місця найбільшого скупчення енергоспоживання, знайти найкращі координати підключення до магістралі та аргументувати доцільність встановлення живлячих вузлів.

Використання такого графічного інструменту дає можливість:

- знайти координати умовного фокусу споживання, який слугує базою для розміщення цехової підстанції;
- зменшити обсяги втрат електричної енергії шляхом раціоналізації протяжності струмопровідних трас;
- удосконалити конфігурацію ліній, гарантуючи високий рівень безвідмовності та адаптивності;
- полегшити майбутнє прокладання провідників і компонування комутаційних апаратів.

У цій частині роботи, спираючись на обчислені параметри силових механізмів та освітлювальної апаратури, створено план розподілу споживачів фабрики текстильного профілю. Розраховано розташування енергетичного центру і доведено доцільність його локалізації на загальному плані проммайданчика. Знайдений показник відіграватиме ключову роль під час формування остаточної конфігурації електромережі.

Приклад обчислення параметрів картограми для прядильного корпусу наведено нижче:

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{1966,33 + 45,92}{3,14 \cdot 0,5}} = 35,8 \text{ мм}$$

						Ар.
						23

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}} \cdot 360}{P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}}} = \frac{45,92 \cdot 360}{1966,33 + 45,92} = 8,2^\circ$$

Підсумки розрахунків для решти цехів занесені до таблиці 2.1.

Центр електричних навантажень знаходиться за координатами:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^m X_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{3444228}{14534,69} = 237 \text{ м}$$

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^m Y_j P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} = \frac{693608}{14534,69} = 47,7 \text{ м}$$

Задля забезпечення комфортного сервісного обслуговування та враховуючи просторові обмеження, виконується перенесення головного розподільчого щита ближче до точки вводу зовнішньої магістралі.

						Ар.
						24

Таблиця 2.1. Результати розрахунку картограми електричних навантажень

№ п/п	Найменування	$P_{P.сил},$ кВт	$P_{P.осв},$ кВт	$P_{P.},$ кВт	m	$R, \text{ мм}$	a	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$P \cdot x,$ кВт · м	$P \cdot y,$ кВт · м
1,0	Прядильний корпус	1966,3	45,9	2012,3	0,5	35,8	8,2	202,4	78,9	407280,0	158767,0
2,0	Ткацький корпус	1863,8	55,7	1919,5	0,5	34,9	10,5	46,6	51,6	89450,0	99047,0
3,0	Оздоблювальний корпус	2170,3	10,5	2180,9	0,5	37,3	1,7	261,1	68,8	569423,0	150043,0
4,0	Швейний корпус	1003,4	53,3	1056,8	0,5	25,9	18,2	345,1	75,9	364684,0	80207,0
5,0	Блок виробничих корпусів № 5–7	1421,7	31,5	1453,1	0,5	30,4	7,8	424,0	37,4	616119,0	54346,0
6,0	Цех сортування	418,9	12,5	431,4	0,5	16,6	10,4	421,0	89,1	181615,0	38437,0
7,0	Дільниця первинної очистки	58,4	8,4	66,9	0,5	6,5	45,4	432,1	17,2	28899,0	1150,0
8,0	Ткацька дільниця № 1	150,8	25,4	176,2	0,5	10,6	51,9	354,2	22,3	62421,0	3930,0
9,0	Крутильно-нитковий цех	191,4	20,1	211,5	0,5	11,6	34,3	113,3	36,4	23961,0	7698,0
10,0	Ткацька дільниця № 2	190,5	35,4	225,9	0,5	12,0	56,4	122,5	24,3	27675,0	5490,0
11,0	Гаражний бокс	301,4	12,2	313,5	0,5	14,1	14,0	316,8	16,2	99329,0	5079,0
12,0	Красильно-вибракувальний цех	1439,7	14,2	1453,9	0,5	30,4	3,5	354,2	17,2	514954,0	25006,0
13,0	Склад матеріально-техн. забезп.	429,3	24,1	453,4	0,5	17,0	19,1	359,3	15,2	162889,0	6891,0
14,0	Склад готових виробів	156,2	16,3	172,5	0,5	10,5	34,1	57,7	27,3	9953,0	4709,0
15,0	Насосна станція	115,2	6,2	121,3	0,5	8,8	18,3	53,6	24,3	6503,0	2948,0
16,0	Компресорна установка	1212,8	15,3	1228,1	0,5	28,0	4,5	70,8	19,2	86952,0	23580,0
17,0	Термінал сировини № 1	36,9	5,9	42,9	0,5	5,2	49,9	223,7	34,4	9592,0	1475,0
18,0	Термінал сировини № 2	43,2	9,4	52,6	0,5	5,8	64,1	120,4	26,3	6333,0	1383,0
19,0	Термінал сировини № 3	30,5	6,7	37,2	0,5	4,9	64,9	122,5	21,3	4557,0	792,0
20,0	Заводська територія	0,0	32,3	32,3	0,5	4,5	360,0	364,3	56,7	11778,0	1833,0
21,0	СД 10,5 кВ в насосній станції (15)	892,6	0,0	892,6	0,5	23,8	0,0	179,1	23,3	159861,0	20797,0
	Всього по підприємству	14093,3	441,4	14534,7						3444228,0	693608,0

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Під час розробки конфігурації електричної мережі промислового об'єкта критично необхідно дбати не виключно про безперебійність та інженерну досконалість. Величезну роль відіграє підтвердження фінансової вигоди від впровадження обраних концепцій. Проведення техніко-економічного аналізу надає можливість знайти найраціональніший спосіб підключення. При цьому беруться до уваги початкові інвестиції, поточні витрати на обслуговування, обсяги втраченої енергії та показники безвідмовності енергосистеми.

Забезпечення струмом фабрики мусить задовольняти низку критичних критеріїв. До них належать високий рівень безпеки, здатність адаптуватися до коливань потужності, зведення до мінімуму втрат, продумане завантаження апаратів та загальна комерційна вигода. З огляду на це, поточна стадія розробки присвячена зіставленню альтернативних конфігурацій живлення. Обов'язково враховуються специфікації устаткування, нюанси монтажу магістралей, пропускна здатність підстанцій та очікувані операційні витрати.

Ця частина документа містить огляд кількох стратегій підключення заводу до системи. Здійснено їх детальне порівняння за основними інженерними критеріями. Також обчислено розміри капіталовкладень та витрат на експлуатацію, завдяки чому виявлено найвигідніший з фінансової точки зору підхід. Доказове затвердження конкретної конфігурації є фінальним кроком створення проекту, який гарантуватиме високу результативність роботи енергокомплексу в реальних виробничих умовах.

						Ар.
						26

3.1 Схема зовнішнього електропостачання підприємства текстилю

Завод має можливість отримувати напругу від районної підстанції 110/10 кВ, яка розташована на віддаленні 8,0 км. Пропонується проаналізувати два наступні шляхи вирішення цього завдання:

Перший варіант передбачає застосування кабельних ліній напругою 10 кВ (відповідає рис. 3.1 а).

Другий метод полягає у спорудженні повітряної магістралі 110 кВ (рис. 3.1 б).

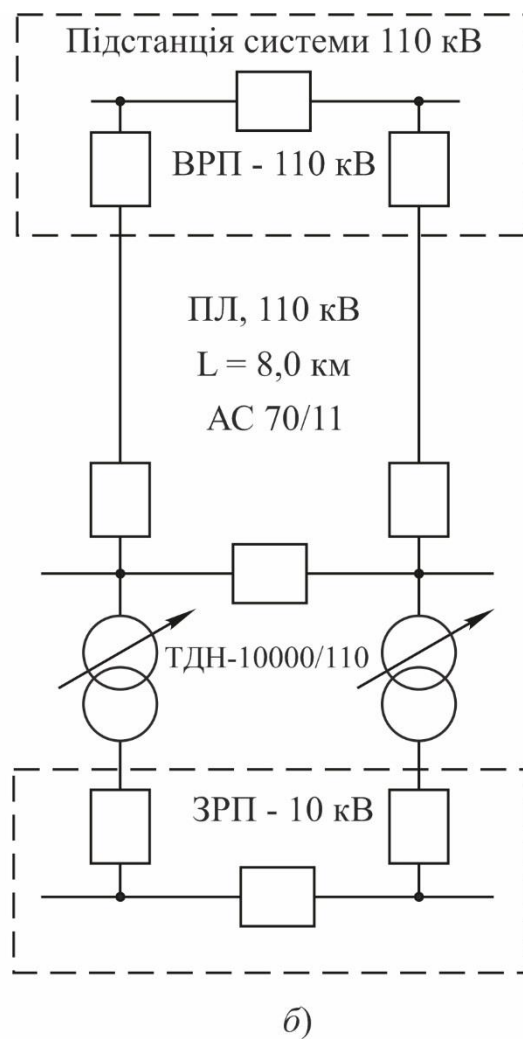
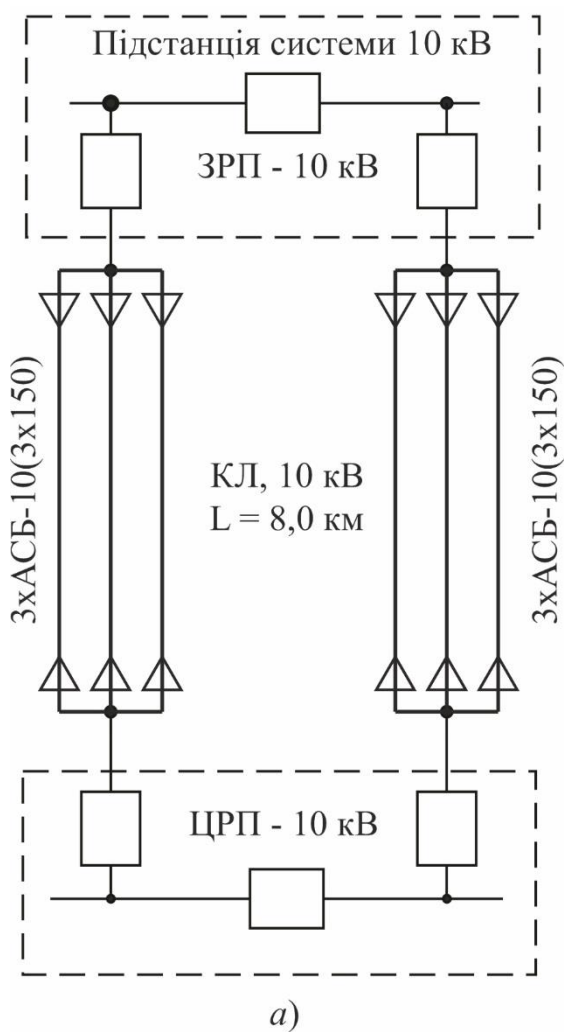


Рис. 3.1. Альтернативні конфігурації підключення до районної енергосистеми

Визначення робочого струму кабельної магістралі:

$$I_{max} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{13931,34}{\sqrt{3} \cdot 10} = 804,33 \text{ A}$$

$$I = \frac{I_{max}}{6} = \frac{804,33}{6} = 134,06 \text{ A}$$

Приймаємо для прокладання під землею 6 одиниць ліній марки АСБ-10(3х150).

Здійснення перевірки обраної конфігурації:

$$I_p = I_{доп} \cdot K_p = 246 \cdot 0,81 = 199,26 \text{ A}$$

$$I \leq I_p \Rightarrow 134,06 \text{ A} \leq 199,26 \text{ A}$$

Характеристики струмопровідних жил повністю відповідають критеріям надійності. Далі переходимо до знаходження коефіцієнта завантаженості, розрахунку обсягів втраченої потужності, витраченої енергії та їхнього фінансового еквівалента.

$$I_{ав} = 2 \cdot I = 2 \cdot 134,06 = 268,12 \text{ A}$$

$$I_{ав,доп} = 1,25 \cdot 0,92 \cdot I_{доп} = 1,25 \cdot 0,92 \cdot 246 = 282,90 \text{ A}$$

$$K_3 = \frac{I}{I_{доп}} = \frac{134,06}{246} = 0,545$$

$$\Delta P = P_0 \cdot L_{\Sigma} \cdot K_3^2 = 20 \cdot 48,0 \cdot 0,297 = 285,12 \text{ кВт}$$

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau = 285,12 \cdot 3440 = 980812,80 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$C = \Delta W \cdot C_0 \cdot 10^{-3} = 980812,80 \cdot 8,98 \cdot 10^{-3} = 8807,70 \text{ тис. грн.}$$

Розрахунок капітальних та поточних витрат зведено в табл. 3.1-3.2

						Ар.
						28

Таблиця 3.1. Обчислення капітальних вкладень

№ вар.	Назва елемента схеми	Од. вим.	Кількість	Вартість, тис. грн.	Всього, тис. грн.
1	КЛ 10 кВ	км	48,0	89,46	4294,08
	Траншея	км	8,0	14,47	115,76
	Шафи КРП серії КУ-10 Ц	шт.	2	10,83	21,66
	Всього				4431,50

Таблиця 3.2. Оцінка поточних витрат

№ вар.	Назва елемента схеми	Кј, тис. грн.	Рај, %	Сај, тис. грн.	Реј, %	Сеј, тис. грн.	Сј, тис. грн.
1	КЛ 10 кВ	4294,08	5	214,70	5	214,70	429,40
	Траншея	115,76	5	5,79	5	5,79	11,58
	Шафи КРП серії КУ-10 Ц	21,66	15	3,25	5	1,08	4,33
	Всього	4431,50		223,74		221,57	445,31

$$\sum \lambda_i = 0,004 + 1,918 = 1,922 \text{ 1/pik}$$

$$T_B = \frac{\sum \lambda_i \cdot T_{Bi}}{\sum \lambda_i} = \frac{0,004 \cdot 0,00045 + 1,918 \cdot 0,001659}{1,922} = 0,001656 \text{ pik}$$

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

$$K_a = \lambda \cdot T_B = 1,922 \cdot 0,001656 = 0,003183$$

$$K_{\text{an}} = 0,5 \cdot \lambda \cdot K_{\text{n}}^2 = 0,5 \cdot 1,922 \cdot 0,00000576 = 0,000005535$$

$$K_a^{(2)} = K_a^2 + 2 \cdot K_{\text{ap}} = (0,003183)^2 + 2 \cdot 0,000005535 = 0,00002120$$

$$T_a = K_a^{(2)} \cdot 8760 = 0,00002120 \cdot 8760 = 0,1857 \text{ год}$$

						Ap.
						29

$$Y = Y_0 \cdot P_{cp} \cdot T_a = 26,61 \cdot 7,71 \cdot 0,1857 = 38,12 \text{ тис. грн.}$$

Сумарні приведені видатки для даного способу підключення становитимуть:

$$Z_i = E_n \cdot K_i + C_i + C_{втр.i} + Y_i$$

$$Z_1 = 0,12 \cdot 4431,50 + 445,31 + 8807,70 + 38,12 = 9437,33 \text{ тис. грн./рік}$$

Подібним чином здійснено калькуляцію для другої конфігурації (з лінією 110 кВ). Зіставлення підсумкових даних відображено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Результати порівняння схем зовнішнього електропостачання

Назва показника	Варіант 1	Варіант 2
Капітальні вкладення	4376,42	2759,72
Поточні витрати	439,80	487,99
Вартість втрат електричної енергії	8434,24	4207,45
Збиток	38,12	7,77
Зведені витрати	9437,33	5034,38

3.2 Схема внутрішнього електропостачання підприємства текстилю

Використання радіальної структури розподілу енергії всередині виробничих приміщень визнано найкращим інженерним підходом. Подібна схемотехніка відрізняється цілою низкою вагомих технічних плюсів та зручностей в експлуатації.

Така конфігурація гарантує відокремлене постачання струму до різних категорій приймачів за допомогою індивідуальних фідерів. Будь-які нештатні ситуації на певній ділянці будуть ізольовані, що унеможливило їхній перехід на сусідні сегменти енергосистеми. Такий стан речей суттєво відрізняється від

магістральної організації, де єдина поломка здатна спровокувати відключення всіх під'єднаних нижче апаратів.

Променева архітектура ліній вирізняється максимально зрозумілою та логічною побудовою. Ця особливість відчутно спрощує процес виявлення несправностей і виконання відновлювальних робіт. Електротехнічні працівники отримують можливість швидко розібратися у схемі та ефективно усувати дефекти завдяки чіткому розділенню сфер відповідальності.

Якщо виникає необхідність наростити обсяги споживаної потужності, радіальний принцип дає змогу безперешкодно розширювати інфраструктуру. Це досягається через прокладання додаткових магістралей без масштабної модернізації вже діючих установок. Тоді як магістральний підхід зазвичай вимагає комплексного демонтажу головної траси задля встановлення проводів збільшеного поперечного перерізу.

Незалежна робота кожної променевої гілки гарантує відсутність ланцюгових відключень під час локальних інцидентів. Знеструмлення окремої лінії ніяк не впливає на функціонування інших частин, що дуже часто стає критичним недоліком магістральних конфігурацій при серйозних аваріях.

Така архітектура створює ідеальне середовище для контролю та збалансованого завантаження кожного напрямку. Завдяки цьому з'являється шанс оптимізувати параметри функціонування мережі, паралельно підвищуючи її загальну енергоефективність.

Проте слід пам'ятати: радіальна схемотехніка вимагає встановлення значно більшої кількості комутаційних апаратів та пристроїв захисту. Як наслідок, первинні фінансові витрати на етапі спорудження об'єкта можуть виявитися вищими, ніж при виборі магістрального варіанту електрифікації.

РОЗДІЛ 4

РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Обмін реактивною енергією виступає обов'язковим компонентом функціонування будь-яких промислових енергетичних комплексів. Виникнення цієї складової пояснюється електромагнітними процесами всередині різноманітних пристроїв, таких як асинхронні машини, силові трансформатори та лінії передач. Цей фактор має величезний вплив на загальний стан мереж. Як нестача, так і надмірне генерування таких струмів провокує падіння загального косинуса ϕ , зростання втрат активної енергії, погіршення рівнів напруг та неефективне завантаження наявного устаткування.

Грамотне регулювання перетоків реактивної енергії гарантує високу економічність та безвідмовність роботи електричного господарства заводу. Найважливішим кроком для вирішення цього завдання вважається встановлення спеціалізованого компенсуючого устаткування. До нього відносять статичні конденсаторні батареї, а також синхронні двигуни. Завдяки їхньому застосуванню вдається суттєво розвантажити живильні центри, покращити стабільність робочої напруги та підняти показники енергоефективності на новий рівень.

Ця частина роботи присвячена детальному дослідженню способів оптимізації реактивних навантажень. Тут проводиться визначення загального енергетичного балансу для електричних мереж ткацької фабрики. Паралельно здійснюється підбір необхідного числа, номіналів та локацій для монтажу засобів компенсації. Всі обчислювальні процедури спираються на графіки завантаженості струмоприймачів, поточну топологію ліній та державні стандарти щодо якості електроенергії. Отримані підсумки сприятимуть максимально вигідному споживанню ресурсів і суттєвому поліпшенню характеристик живлення.

						Ар.
						32

4.1 Баланс реактивної потужності підприємства текстилю

Процедуру знаходження балансових показників за методикою [1] представлено далі.

$$P_H = \sum P_{ТП} = 12953 \text{ кВт}$$

$$Q_H = \sum Q_{ТП} = 8512 \text{ квар}$$

$$\Delta P_T = \sum \Delta P_{ТП} = 144 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_T = \sum \Delta Q_{ТП} = 750 \text{ квар}$$

$$Q_{СД.ном} = P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 630 \cdot 0,489 = 308,07 \text{ квар}$$

$$P_{СД} = N \cdot P_{ном} \cdot K_{вик} = 2 \cdot 630 \cdot 0,708 = 892,08 \text{ кВт}$$

$$Q_{СД} = n \cdot \frac{P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi_H}{\eta_{ном}} = 2 \cdot \frac{630 \cdot 0,489}{0,958} = 643,21 \text{ квар}$$

$$Q_{СД.мах} = n \cdot \frac{\alpha \cdot P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi_H}{\eta_{ном}} = 2 \cdot \frac{1,22 \cdot 630 \cdot 0,489}{0,958} = 784,72 \text{ квар}$$

$$P_p = P_H + \Delta P_T + P_B + P_{СД} = 12953 + 144 + 0 + 892,08 = 13989,08 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T + Q_B - Q_{СД} = 8512 + 750 + 0 - 643,21 = 8618,79 \text{ квар}$$

$$Q_c = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_e = 13989,08 \cdot 0,152 = 2126,34 \text{ квар}$$

						Ар.
						33

$$Q_{\text{КП}} = Q_p - Q_c = 8618,79 - 2126,34 = 6492,45 \text{ квар}$$

Задля забезпечення живлення об'єкта потрібно змонтувати таку мінімальну кількість трансформаторів:

Варіант 1. $N = 19$ шт.

$$N = \frac{P_H}{\beta_0 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{12953}{0,7 \cdot 1000} = 18,50 \approx 19 \text{ шт.}$$

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta_0 \cdot S_{\text{НОМ}})^2 - P_H^2} = \sqrt{(19 \cdot 0,7 \cdot 1000)^2 - 12953^2} = 3659,41 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КН}} = Q_H - Q_1 = 8512 - 3659,41 = 4852,52 \text{ квар}$$

$$Q_{\text{КВ}} = Q_p - Q_{\text{КН}} - Q_c = 8618,79 - 4852,52 - 2126,34 = 1666,75 \text{ квар}$$

Подібним чином здійснюємо обчислення для кількості трансформаторів, яка більша на одну та дві одиниці. Знайдені параметри балансу перетоків реактивної енергії заносимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Підсумки визначення балансу реактивної енергії фабрики

№ вар.	Число встановлених трансформаторів	Величина потужності Q_1 , квар	Величина потужності $Q_{\text{КН}}$, квар	Величина потужності $Q_{\text{КВ}}$, квар
1	19	3659,41	4852,52	1666,75
2	20	5741,32	2770,61	3748,66
3	21	7316,95	1194,98	5324,30

4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування компенсуючих пристроїв

Розрахунки з вибору КП наведені далі у табл. 4.2-4.4.

Таблиця 4.2. Підсумки розрахунку параметрів засобів компенсації (N = 19 шт.)

№ 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, 2003	6	4265,9	3089,3	0	3089,3	1·50; 6·166; 6·335;	3093	-3,7	0,7	4265,9
4, 5, 2006	6	4089,2	2621,6	1159,6	1462,0	1·50; 6·67; 6·166;	1465	-3,7	0,7	4249,5
7	2	1471,6	1064,5	0,0	1064,5	2·536;	1085	-20,3	0,73	1471,7
8	2	1306,9	1134,1	547,2	587,0	2·300;	607	-20,2	0,7	1409,1
9, 10	3	1961,9	1352,2	817	535,1	1·50; 3·166;	555	-19,4	0,7	2117,8

Таблиця 4.3. Підсумки розрахунку параметрів засобів компенсації (N = 20 шт.)

№ 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, 2003	7	4265,9	3089,3	2528,3	561,1	6·100;	607	-46,1	0,7	4935,4
4, 5, 2006	6	4089,2	2621,6	1159,6	1462,0	1·50; 6·67; 6·166;	1465	-3,7	0,7	4249,5
7	2	1471,6	1064,5	0,0	1064,5	2·536;	1085	-20,3	0,73	1471,7
8	2	1306,9	1134,1	547,2	587,0	2·300;	607	-20,2	0,7	1409,1
9, 10	3	1961,9	1352,2	817	535,1	1·50; 3·166;	555	-19,4	0,7	2117,8

Таблиця 4.4. Підсумки розрахунку параметрів засобів компенсації (N = 21 шт.)

№ КТП	К-сть т-рів	P_p , кВт	Q_p , кВАр	Q_{np} , 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, 2003	7	4265,9	3089,3	2528,3	561,1	6·100;	607	-46,1	0,7	4935,4
4, 5, 2006	7	4089,2	2621,6	2805,1	0,0		0	0,0	0,69	4857,4
7	2	1471,6	1064,5	0,0	1064,5	2·536;	1085	-20,3	0,73	1471,7
8	2	1306,9	1134,1	547,2	587,0	2·300;	607	-20,2	0,7	1409,1
9, 10	3	1961,9	1352,2	817	535,1	1·50; 3·166;	555	-19,4	0,7	2117,8

Для початкового способу зниження реактивних перетоків за найменшої кількості цехових підстанцій знайдемо величини втрат у вузлах мережі та обчислимо річні витрати:

Капіталовкладення в низьковольтні батареї:

$$\Delta P_{KH} = 0,0045 \cdot 6805 = 30,62 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{KB} = 0,003 \cdot 304 = 0,91 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_T = \frac{12953^2 + 3659,41^2}{10^2} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 89,51 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{CD} = 784,72 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,75 \cdot 784,72}{308,07 \cdot 2} \right) = 9,44 \text{ кВт}$$

$$K_{KH} = 3 \cdot 2,99 + 6 \cdot 3,22 + 15 \cdot 4,33 + 2 \cdot 6,11 + 6 \cdot 6,52 + 2 \cdot 9,32 \\ = 163,21 \text{ тис. грн.}$$

Кошторис на проектування та монтаж КТП:

$$K_{KB} = 2 \cdot 4,08 = 8,16 \text{ тис. грн.}$$

						Ар.
						36

$$K_{\text{КТП}} = 9 \cdot 5893,4 + 1 \cdot 2980,3 = 56021 \text{ тис. грн.}$$

Сумарні річні приведені витрати:

$$Z_1 = 0,12 \cdot (163,21 + 8,16 + 56021) + 7,21 \cdot 3440 \cdot (30,62 + 0,91 + 89,51 + 9,44) \cdot 10^{-3} = 9941 \text{ тис. грн.}$$

У таблиці 4.5 відображено техніко-економічні показники для решти альтернативних інженерних рішень.

Таблиця 4.5. Техніко-економічне зіставлення варіантів компенсації

№ вар.	Нтр, шт.	Рекв, Ом	Q _{кн} , кВАр	ΔР _{кн} , кВт	Q _{кв} , кВАр	ΔР _{кв} , кВт	S _{пр} , кВА	ΔР _{тп} , кВт	К _{кн} , тис. грн.	К _{кв} , тис. грн.	К _{ктп} , тис. грн.	З, тис. грн.
1	19	0,05	6805	30,62	304	0,91	13460	89,51	163,21	8,16	56021	9941
2	20	0,04	4319	19,43	2732	8,20	14168	79,34	118,15	72,85	59002	9954
3	21	0,04	2854	12,85	4554	13,66	14876	87,48	78,13	121,44	61982	10479

Отже, обираємо першу схему, що характеризується базовою комплектацією обладнання із 19 трансформаторами.

РОЗДІЛ 5

ВИБІР КІЛЬКОСТІ І ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІДПРИЄМСТВА

Силові перетворювальні апарати виступають фундаментальними складовими будь-якої електричної мережі, оскільки вони гарантують зміну величин напруг згідно з вимогами струмоприймачів, забезпечують якісний розподіл енергії та сприяють підвищенню загальної ефективності роботи комплексу. Коректний розрахунок чисельності та пропускну здатності трансформаторних установок має прямий вплив на безвідмовність, ступінь безпеки та фінансову вигоду від експлуатації енергосистеми заводу.

Процедура підбору таких агрегатів зобов'язана спиратися на низку критеріїв. До них належать очікувані пікові струмові навантаження, специфіка виробничих графіків, наявність резервних потужностей, ймовірність майбутнього розширення цехів, способи тепловідведення та жорсткі нормативи щодо якості живлення. Нестача номінальної потужності здатна спровокувати перегрів та аварійні відключення, тоді як її надмірний запас призводить до невиправданих фінансових інвестицій та падіння робочих показників.

Поточна частина роботи містить детальний інженерний аналіз для визначення оптимальної кількості та робочих параметрів силових трансформаторів для забезпечення потреб текстильного підприємства. Усі обчислення спираються на знайдені раніше показники споживання, технологічні нюанси функціонування об'єкта та суворі правила щодо резервування критичних ліній. Знайдені дані стануть міцним фундаментом для розробки генеральної схеми живлення та наступного підбору комутаційних апаратів.

Здійснимо підбір трансформаторних агрегатів для головної знижувальної підстанції (ГЗП).

$$S_{\text{ТР}} = \frac{S_{\text{max}} \cdot 0,8}{1,4 \cdot (n - 1)} = \frac{13,93 \cdot 0,8}{1,4 \cdot (2 - 1)} = 7,96 \text{ МВА}$$

						Ар.
						38

Приймаємо до встановлення ТДН 10000/110, який характеризується наступними паспортними даними: $\Delta P_{\text{хх}} = 14$ кВт, $\Delta P_{\text{кз}} = 60$ кВт, $u_{\text{к}}, \% = 10,5\%$.

Рівень завантаженості агрегатів ГЗП у штатному режимі дорівнює:

$$K_3 = \frac{S_{\text{max}}}{n \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{13,93}{2 \cdot 10} = 0,70$$

Розраховані показники повністю відповідають нормативним вимогам.

Далі проводиться підбір перетворювачів для цехових підстанцій. Планується застосування комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) із кількістю силових блоків від одного до двох. Обрано марку обладнання ТМ-1000/10/0,4.

Приклад розрахунку для підстанції ТП-1:

$$K_{\text{зав}} = \frac{S_{\text{розр}}}{n \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{1421,97}{2 \cdot 1000} = 0,71$$

$$S_{\text{ном}} \geq \frac{S_{\text{розр}}}{K_1} = \frac{1421,97}{1,08} = 1316,64 \text{ кВА}$$

$$S_{\text{ном}} \geq \frac{S_{\text{розр}}}{K_2} = \frac{1421,97}{1,4} = 1015,69 \text{ кВА}$$

Таблиця 5.1. Підсумки вибору цехових трансформаторів

№	К-сть тр.	$S_{\text{розр}}$, кВА	$K_{\text{зав}}$	$\frac{S_{\text{ном}}}{S_{\text{розр}}/K_1} >$	$S_{\text{ном}} > S_{\text{розр}}/K_2$
ТП-1	2	1421,97	0,71	1317	1016
ТП-2	2	1421,97	0,71	1317	1016
ТП-3	2	1421,97	0,71	1317	1016
ТП-4	2	1416,50	0,71	1312	1012
ТП-5	2	1416,50	0,71	1312	1012
ТП-6	2	1416,50	0,71	1312	1012
ТП-7	2	1471,70	0,74	1363	1051
ТП-8	2	1409,10	0,70	1305	1007
ТП-9	2	1411,87	0,71	1307	1008
ТП-10	1	705,93	0,71	654	504

РОЗДІЛ 6

ПІДРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМКНЕНЬ ТА ОБРАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Підрахунок струмів коротких замкнень

Схема для розрахунків та еквівалентна схема заміщення мережі представлені на рис. 6.1 та 6.2.

Параметри опорів ділянок мережі до збірних шин 110 кВ ГЗП (до вузла К0):

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з}} = \frac{116^2}{75000} = 0,179 \text{ Ом}, \quad R_c = \frac{X_c}{25} = \frac{0,179}{25} = 0,007 \text{ Ом}$$

$$R_l = r_0 \cdot l = 0,422 \cdot 8,0 = 3,376 \text{ Ом}$$

$$X_l = x_0 \cdot l = 0,444 \cdot 8,0 = 3,552 \text{ Ом}$$

$$X_{K0} = X_c + X_l = 0,179 + 3,552 = 3,731 \text{ Ом}$$

$$R_{K0} = R_c + R_l = 0,007 + 3,376 = 3,383 \text{ Ом}$$

$$Z_{K0} = \sqrt{R_{K0}^2 + X_{K0}^2} = \sqrt{3,383^2 + 3,731^2} = 5,036 \text{ Ом}$$

Знаходимо характеристики КЗ у вузлі К0 (початкове значення періодичної складової, електромагнітну сталу часу, ударний коефіцієнт та ударний струм):

$$I''_{K0} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K0}} = \frac{116}{\sqrt{3} \cdot 5,036} = 13,30 \text{ кА}$$

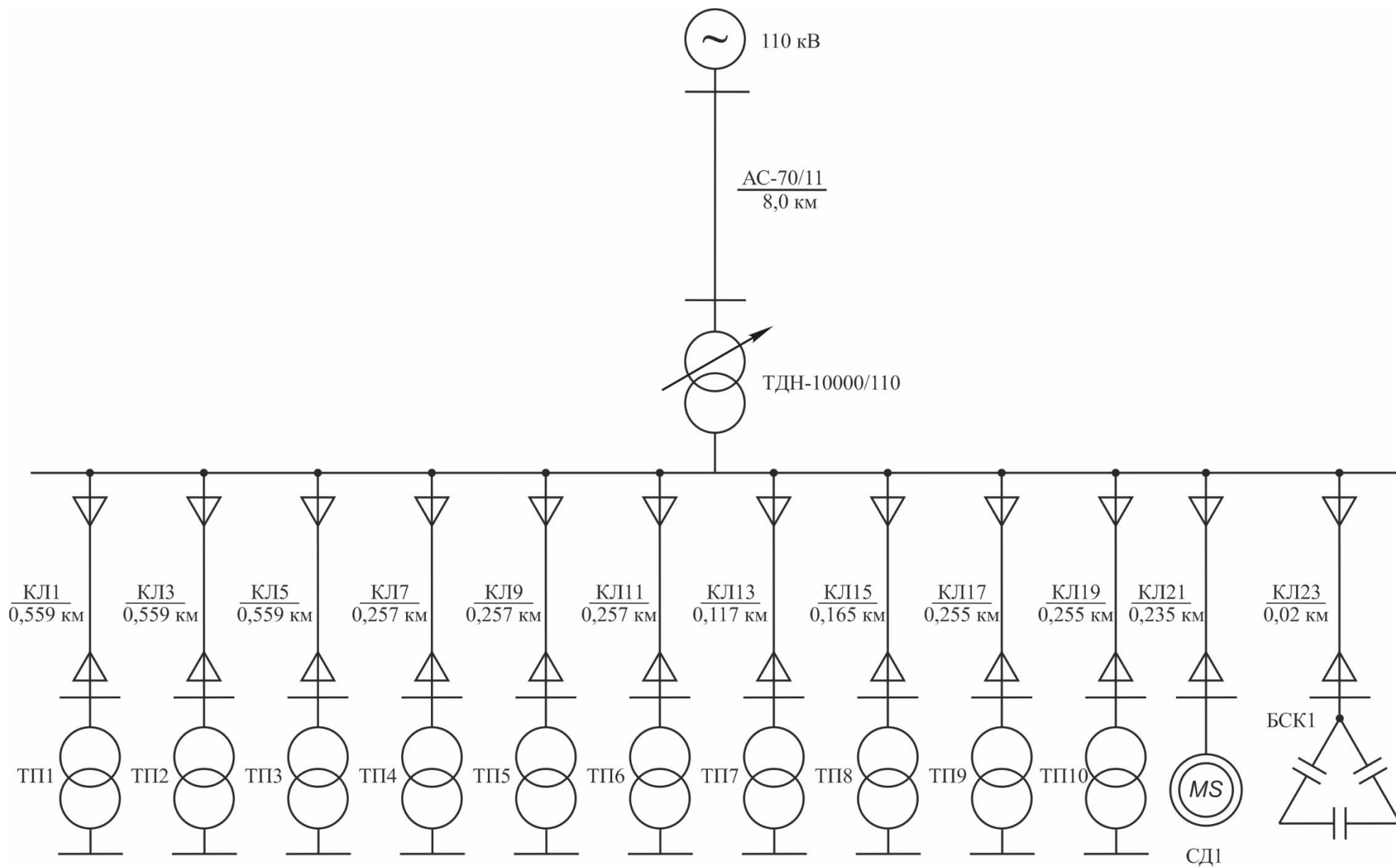


Рис. 6.1. Розрахункова схема

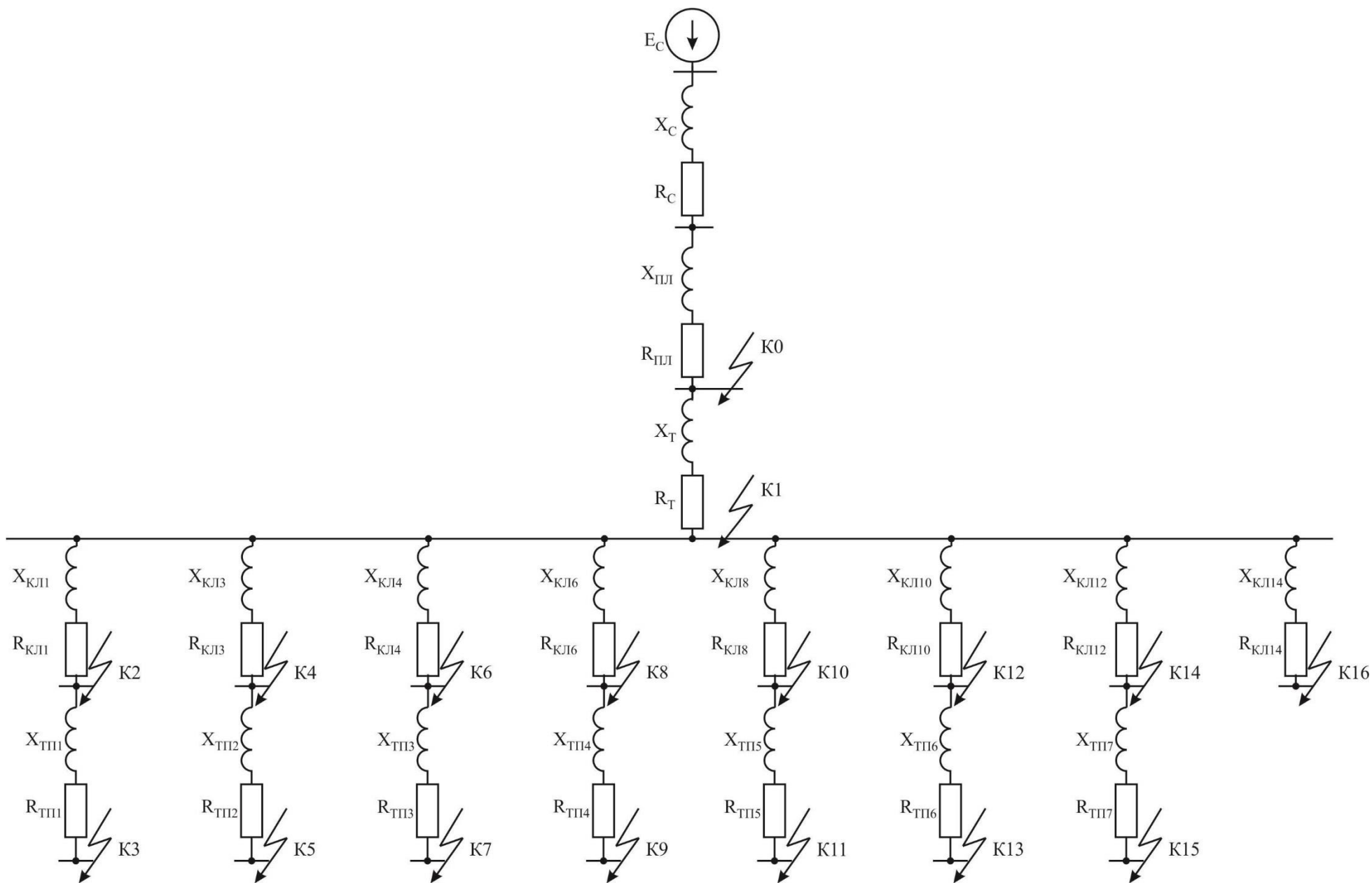


Рис. 6.2. Схема заміщення

$$T_{a0} = \frac{X_{K0}}{\omega \cdot R_{K0}} = \frac{3,731}{314 \cdot 3,383} = 0,0035 \text{ с}$$

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

$$i_{yд0} = \sqrt{2} \cdot k_{yд0} \cdot I''_{K0} = \sqrt{2} \cdot 1,057 \cdot 13,30 = 19,88 \text{ кА}$$

Значення опорів переведені до рівня напруги 10 кВ ГЗП (вузол К1):

$$X'_{K0} = X_{K0} \cdot \left(\frac{U_{BH}}{U_{HH}} \right)^2 = 3,731 \cdot \left(\frac{10,5}{116} \right)^2 = 0,031 \text{ Ом}$$

$$R'_{K0} = R_{K0} \cdot \left(\frac{U_{BH}}{U_{HH}} \right)^2 = 3,383 \cdot \left(\frac{10,5}{116} \right)^2 = 0,028 \text{ Ом}$$

$$Z'_{K0} = Z_{K0} \cdot \left(\frac{U_{BH}}{U_{HH}} \right)^2 = 5,036 \cdot \left(\frac{10,5}{116} \right)^2 = 0,041 \text{ Ом}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{cp.HOM}^2}{S_{HOM.T}^2} \cdot 10^3 = \frac{60 \cdot 10,5^2}{10000^2} \cdot 10^3 = 0,066 \text{ Ом}$$

$$X_T = \frac{u_{K\%} \cdot U_{cp.HOM}^2}{100 \cdot S_{HOM.T}} = \frac{10,5 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 10} = 1,158 \text{ Ом}$$

$$X_{K1} = X'_{K0} + X_T = 0,031 + 1,158 = 1,189 \text{ Ом}$$

$$R_{K1} = R'_{K0} + R_T = 0,028 + 0,066 = 0,094 \text{ Ом}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2} = \sqrt{0,094^2 + 1,189^2} = 1,193 \text{ Ом}$$

						Ар.
						43

Обчислюємо параметри струму КЗ у вузлі К1. Результат формується як сума двох складових: струмів підживлення від енергосистеми та від високовольтних двигунів:

$$I''_{K1(c)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,193} = 5,081 \text{ кА}$$

$$T_{a1} = \frac{X_{K1}}{\omega \cdot R_{K1}} = \frac{1,189}{314 \cdot 0,094} = 0,0403 \text{ с}$$

$$k_{yд1(c)} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0403}} = 1,780$$

$$i_{yд1(c)} = \sqrt{2} \cdot k_{yд1(c)} \cdot I''_{K1(c)} = \sqrt{2} \cdot 1,780 \cdot 5,081 = 12,79 \text{ кА}$$

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{0,63}{0,9 \cdot 0,958} = 0,731 \text{ МВА}$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{0,731}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,040 \text{ кА}$$

$$I''_{K1(сД)} = \frac{E''_{сД}}{x''_d} \cdot n \cdot I_{\text{ном}} = \frac{1,1}{0,15} \cdot 2 \cdot 0,040 = 0,587 \text{ кА}$$

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

$$k_{yд(сД)} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{aсД}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0478}} = 1,811$$

$$i_{yд1(сД)} = \sqrt{2} \cdot k_{yд(сД)} \cdot I''_{K1(сД)} = \sqrt{2} \cdot 1,811 \cdot 0,587 = 1,503 \text{ кА}$$

						Ар.
						44

$$I''_{K1} = I''_{K1(c)} + I''_{K1(сД)} = 5,081 + 0,587 = 5,668 \text{ кА}$$

$$i_{уд1} = i_{уд1(c)} + i_{уд1(сД)} = 12,79 + 1,503 = 14,293 \text{ кА}$$

Виконаємо розрахунок характеристик для підбору кабельної лінії КЛ1:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{ср.ном}} = \frac{1421,97}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 10,5} = 39,10 \text{ А}$$

Приймаємо до прокладання кабель марки ААШв-10(3х70) та обчислюємо його опори (відстань скориговано на збільшення):

$$B_k = I''_{K1}^2 \cdot (t_{з.мин} + T_{a1}) = 5,668^2 \cdot (1,025 + 0,0403) = 34,22 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{min} = \frac{\sqrt{B_k \cdot 10^6}}{C} = \frac{\sqrt{34,22 \cdot 10^6}}{94} = 62,23 \text{ мм}^2$$

$$R_{кл} = r_0 \cdot l_{кл} = 0,443 \cdot 0,566 = 0,251 \text{ Ом}$$

$$X_{кл} = x_0 \cdot l_{кл} = 0,086 \cdot 0,566 = 0,049 \text{ Ом}$$

Значення для решти ліній систематизовано в таблиці 6.1.

						Ар.
						45

Таблиця 6.1. Значення активних та реактивних опорів кабельних магістралей

№ КЛ	l , км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	R , Ом	X , Ом
1, 2	0,566	0,443	0,086	0,251	0,049
3, 4	0,566	0,443	0,086	0,251	0,049
5, 6	0,566	0,443	0,086	0,251	0,049
7, 8	0,26	0,443	0,086	0,115	0,022
9, 10	0,26	0,443	0,086	0,115	0,022
11, 12	0,26	0,443	0,086	0,115	0,022
13, 14	0,118	0,443	0,086	0,052	0,01
15, 16	0,167	0,443	0,086	0,074	0,014
17, 18	0,258	0,443	0,086	0,114	0,022
19	0,258	0,443	0,086	0,114	0,022
20, 21	0,238	0,443	0,086	0,105	0,02
22, 23	0,02	0,443	0,086	0,009	0,002

Сумарний опір та струми короткого замикання у вузлі К2 на схемі заміщення:

$$X_{K2} = X_{K1} + X_{кл} = 1,189 + 0,049 = 1,238 \text{ Ом}$$

$$R_{K2} = R_{K1} + R_{кл} = 0,094 + 0,251 = 0,345 \text{ Ом}$$

$$Z_{K2} = \sqrt{R_{K2}^2 + X_{K2}^2} = \sqrt{0,345^2 + 1,238^2} = 1,285 \text{ Ом}$$

$$I''_{K2} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,285} = 4,718 \text{ кА}$$

$$T_{a2} = \frac{X_{K2}}{\omega \cdot R_{K2}} = \frac{1,238}{314 \cdot 0,345} = 0,0114 \text{ с}$$

$$k_{yд2} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a2}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0114}} = 1,416$$

$$i_{yд2} = \sqrt{2} \cdot k_{yд2} \cdot I''_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,416 \cdot 4,718 = 9,446 \text{ кА}$$

Обчислення показників аварійного режиму у вузлі К3:

$$X_{K3} = (X_{K2} + X_T) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}}\right)^2 = (1,238 + 5,997) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 0,0105 \text{ Ом}$$

$$R_{K3} = (R_{K2} + R_T) \cdot \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}}\right)^2 = (0,345 + 0,964) \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 0,0019 \text{ Ом}$$

$$Z_{K3} = \sqrt{R_{K3}^2 + X_{K3}^2} = \sqrt{0,0019^2 + 0,0105^2} = 0,01067 \text{ Ом}$$

$$I''_{K3} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,01067} = 21,644 \text{ кА}$$

$$T_{a3} = \frac{X_{K3}}{\omega \cdot R_{K3}} = \frac{0,0105}{314 \cdot 0,0019} = 0,0176 \text{ с}$$

$$k_{yд3} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a3}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0176}} = 1,566$$

$$i_{yд3} = \sqrt{2} \cdot k_{yд3} \cdot I''_{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,566 \cdot 21,644 = 47,935 \text{ кА}$$

Результати знаходження струмів пошкодження для інших ділянок згруповано у таблиці 6.2.

						Ар.
						47

Таблиця 6.2. Підсумкові показники струмів короткого замикання

№ точки к.з.	$R, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$	$I_{\kappa}'' , \text{ кА}$	$T_a, \text{ с}$	$k_{y\partial}$	$i_{y\partial}, \text{ кА}$
0	3,383	3,731	13,3	0,0035	1,057	19,88
1	0,094	1,189	5,668	0,0403	1,78	14,293
2	0,345	1,238	4,718	0,0114	1,416	9,446
3	0,002	0,011	21,644	0,0176	1,566	47,935
4	0,345	1,238	4,718	0,0114	1,416	9,446
5	0,002	0,011	21,644	0,0176	1,566	47,935
6	0,345	1,238	4,718	0,0114	1,416	9,446
7	0,002	0,011	21,644	0,0176	1,566	47,935
8	0,21	1,226	4,989	0,0187	1,586	11,162
9	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
10	0,21	1,226	4,989	0,0187	1,586	11,162
11	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
12	0,21	1,226	4,989	0,0187	1,586	11,162
13	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
14	0,148	1,213	5,08	0,0265	1,685	12,093
15	0,002	0,011	22,051	0,0212	1,624	50,519
16	0,169	1,217	5,05	0,0232	1,65	11,759
17	0,002	0,011	22,051	0,0212	1,624	50,519
18	0,209	1,226	4,989	0,0188	1,587	11,172
19	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
20	0,209	1,226	4,989	0,0188	1,587	11,172
21	0,002	0,011	21,839	0,0201	1,608	49,568
22	0,2	1,224	5,009	0,0196	1,6	11,314
23	0,104	1,205	5,131	0,0372	1,764	12,782

6.2 Підбір кабельних ліній напругою 10 кВ

Критерії підбору кабельної магістралі для живлення ТП-1:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot n \cdot U_{\text{ср.ном}}} = \frac{1421,97}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 10,5} = 39,10 \text{ А}$$

$$I_p \leq K_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} \Rightarrow 39,10 \text{ А} \leq 0,92 \cdot 130 = 119,6 \text{ А}$$

$$I_{\text{ав}} \leq K_{\text{ап}} \cdot K'_{\Pi} \cdot I_{\text{доп}} \Rightarrow 78,20 \text{ А} \leq 1,25 \cdot 1 \cdot 130 = 162,5 \text{ А}$$

$$B_K = I_{K1}''^2 \cdot (t_{3.\text{min}} + T_{a1}) = 5,668^2 \cdot (1,025 + 0,0403) = 34,22 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_K \cdot 10^6}}{C} = \frac{\sqrt{34,22 \cdot 10^6}}{94} = 62,23 \text{ мм}^2$$

Приймаємо до прокладання дві паралельні лінії марки ААШв-10(3х70).

Підсумкові показники перевірки струмопроводів зведено у таблицю 6.3.

						Ар.
						49

Таблица 6.3. Характеристики подобранных кабельных магистралей напрягою 10 кВ

$N_{\text{д}} \text{ КЛ}$	$n, \text{ шт}$	$S_p, \text{ МВА}$	$I_p, \text{ А}$	$I_{p.\text{ав.}}, \text{ А}$	$F_{\text{ек}}, \text{ мм}^2$	$B_{\kappa}, \text{ кА}^2 \text{ с}$	$F_{\text{min}}, \text{ мм}^2$	Марка кабелю	$I_{\text{дон}}, \text{ А}$	K_n	$K_n I_{\text{дон}}, \text{ А}$	$K_{\text{ан}}$	K'_n	$K_{\text{ан}} K'_n I_{\text{дон}}, \text{ А}$
1, 2	2	1421,97	39,1	78,2	27,93	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
3, 4	2	1421,97	39,1	78,2	27,93	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
5, 6	2	1421,97	39,1	78,2	27,93	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
7, 8	2	1416,5	38,94	77,88	27,81	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
9, 10	2	1416,5	38,94	77,88	27,81	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
11, 12	2	1416,5	38,94	77,88	27,81	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
13, 14	2	1471,7	40,46	80,92	28,9	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
15, 16	2	1409,1	38,74	77,48	27,67	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
17, 18	2	1411,87	38,82	77,64	27,73	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	0,92	119,6	1,25	1	162,5
19	1	705,93	38,82	-	27,73	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	1	130	-	-	-
20, 21	1	738,76	40,62	-	29,01	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	1	130	-	-	-
22, 23	1	151,8	8,35	-	5,96	34,22	62,23	ААШВ-10(3х70)	130	1	130	-	-	-

6.3 Підбір електричних апаратів високої напруги

Показники, що необхідні для обґрунтування підбору головних ввідних вимикачів, згруповано у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4. Перевірка та вибір головного вимикача 35 кВ (110 кВ)

Параметр вимикача	Умова вибору	Розрахунок
Номинальна напруга, кВ	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$110 \leq 110$
Довготривалий струм, А	$I_{роб.форс} \leq I_{ном}$	$102,06 \leq 3150$
Відключаюча здатність:		
– симетричний струм:	$I'' \leq I_{відкл.ном}$	$13,30 \leq 40$
– аперіодична складова:	$i_{ат} \leq \sqrt{2}\beta I_{відкл.ном}$	$0,0001 \leq 19,8$
– повний струм:	$\sqrt{I_t^2 + i_{ат}^2} \leq \sqrt{2}I_{відкл.ном}(1 + \beta)$	$18,81 \leq 76,37$
Динамічна стійкість:		
– симетричний струм:	$I'' \leq I_{дин.ст}$	$13,30 \leq 52$
– ударний струм:	$i_y \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст}$	$19,88 \leq 132,37$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{ТН}^2 t_{ТН}$	$185,50 \leq 1200$

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

$$i_{ат} = \sqrt{2}I'' e^{-\frac{\tau}{T_a}} = 1,41 \cdot 13,30 \cdot e^{-\frac{0,042}{0,0035}} = 0,0001 \text{ кА}$$

$$B_k = I''^2(t_{pz} + t_{с.в} + T_a) = 13,30^2 \cdot (0,022 + 1,02 + 0,0035) = 185,50 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Приймаємо до встановлення модель LTB-145D1/B.

6.4 Підбір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Спосіб підключення трансформаторів власних потреб (ТВП) до магістралі продемонстровано на рис. 6.3.

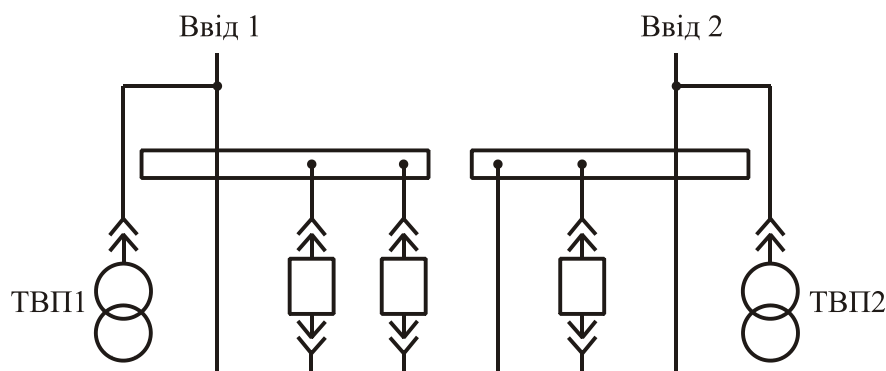


Рис. 6.3. Конфігурація під'єднання мережі ТВП

Таблиця 6.5. Визначення енергетичних потреб ТВП

№ п/п	Споживачі	Рном, кВт	п, шт.	Рсум, кВт	cosφ	tgφ	Руст, кВт	Qус, кВАр
1	Електродвигуни обдуву трансформаторів номінальною потужністю 10 МВА	0,76	28	21,25	0,8	0,75	21,25	15,94
2	Пристрої підігріву вимикачів номінальною напругою 110 кВ	1,77	3	5,31	0,97	0,25	5,31	1,33
3	Пристрої підігріву комірок	0,61	32	19,43	0,97	0,25	19,43	4,86
4	Опалення і освітлення приміщення оперативного	6,07	3	18,22	0,97	0,25	18,22	4,55
5	Зовнішнє освітлення	4,55	4	18,22	0,97	0,25	18,22	4,55
6	Споживання оперативними колами	4,55	4	18,22	0,97	0,25	18,22	4,55
	Всього			100,65			100,65	35,78

Сукупне енергетичне навантаження ТВП становить:

$$S_{уст} = \frac{P_{сум}}{\cos \varphi_{ср}} = \frac{100,65}{0,92} = 109,40 \text{ кВА}$$

$$S_p = 0,8 \cdot S_{уст} = 0,8 \cdot 109,40 = 87,52 \text{ кВА}$$

Приймаємо до монтажу перетворювачі марки ТМ-63/10.

$$K_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{ном}} = \frac{87,52}{2 \cdot 63} = 0,69$$

РОЗДІЛ 7

СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ АГРЕГАТИВ

7.1 Еволюція використання енергії повітряних мас

Будь-які енергетичні ресурси на Землі мають своє першоджерело у радіації Сонця, силах тяжіння небесних тіл (головним чином через вплив Місяця та нашого світила на планету), а також геотермальному потенціалі. Останній генерується внаслідок постійних хімічних реакцій і розпаду радіоактивних елементів глибоко в надрах нашої кулі. Важливо розуміти, що вітер виникає саме через нерівномірне нагрівання земної поверхні сонячними променями, що створює зони різного атмосферного тиску та змушує повітря рухатися.

Використання кінетичного потенціалу повітря є однією з найдавніших технологій, відомих людству. Набагато раніше за появу парових двигунів античні мореплавці навчилися приборкувати морські шквали за допомогою вітрил. Навіть сьогодні цей метод не втратив своєї актуальності для певних категорій приватних і туристичних суден. Історики мають беззаперечні докази того, що жителі Давнього Китаю та єгипетської держави використовували механічну силу вітру в глибоку давнину. На території сучасного Єгипту були знайдені руїни кам'яних споруд із вертикально розташованими барабанными механізмами, які слугували для подрібнення злакових культур.

Дослідники датують активне використання таких пристроїв періодом понад дві тисячі років тому, що вказує на видатну майстерність тодішніх інженерів. Дивовижно, але конструктивна логіка цих античних механізмів має багато спільного із сучасними роторними генераторами, підтверджуючи циклічність інженерних ідей. З плином часу та розвитком промисловості, вітряки поширилися всією територією Європи. Їхній функціонал розширився: окрім помелу борошна, вони стали ключовим елементом гідротехнічних споруд, допомагаючи відкачувати

						Ар.
						53

зайву воду з низинних ділянок. Класичні голландські млини стали символом цілої епохи, продемонструвавши високу ефективність перетворення природних стихій на корисну роботу для потреб меліорації.

Наступним глобальним кроком еволюції став перехід від прямої механічної дії до генерації електричного струму. Новітні промислові вітропарки, які об'єднують сотні надпотужних турбін, сьогодні формують основу сектору відновлюваної енергетики в багатьох країнах світу. Сучасні установки концептуально поділяються на два класи: з горизонтальною та вертикальною віссю обертання. Горизонтально-осьові моделі домінують на ринку завдяки вищому коефіцієнту перетворення енергії. Їхні лопаті проєктуються за законами аеродинаміки, де ключову роль відіграє підймальна сила крила.

Ключовими плюсами цієї галузі є її дружність до довкілля, здатність ресурсів відновлюватися природним шляхом та їхня абсолютна невичерпність. Наша держава також має колосальний потенціал для розбудови таких генеруючих потужностей. Найбільш перспективними вважаються південні степи та узбережжя морів, де середньорічні показники швидкості вітру є оптимальними для рентабельної роботи турбін. Особливий інтерес становлять офшорні (морські) проєкти, які розміщуються на мілководді. Вони здатні генерувати набагато більше електрики завдяки відсутності рельєфних перешкод над поверхнею води.

Майбутнє цього сектору енергетики оцінюється як вкрай позитивне, зважаючи на нагальну потребу зменшення вуглецевого сліду та боротьбу зі змінами клімату. Згідно з оновленими оптимістичними розрахунками, орієнтовно до 2051 року частка електрики, отриманої з енергії вітру, здатна покрити близько 36,4% від глобального світового попиту.

Базова перевага «зелених» джерел полягає у їхній нескінченності та мізерному впливі на екологічну рівновагу. Якщо традиційні викопні види палива формувалися протягом мільйонів років і їхні поклади стрімко вичерпуються, то сонячна радіація, сила рухомого повітря, водні ресурси та тепло надр Землі будуть доступні людству ще щонайменше кілька мільярдів років.

						Ар.
						54

Важливим додатковим бонусом екологічно чистої генерації виступає абсолютна відсутність викидів парникових газів під час безпосередньої роботи генеруючих агрегатів. Це є кардинальною відмінністю від процесів спалювання нафтопродуктів, вугілля чи газу. Технології відновлюваної енергетики не просто допомагають зберегти чистоту повітряного басейну та водойм, але й активно сприяють захисту біорізноманіття. Сучасна автоматизація робить ці процеси ще безпечнішими: інтелектуальні системи керування миттєво реагують на зміну погодних умов, оптимізують кут атаки лопатей, попереджають аварії при ураганах.

Разом із тим, екологічно чиста енергетика стикається з низкою специфічних інженерних бар'єрів. Основна проблема полягає у тому, що природні ресурси, такі як сонячне світло чи енергія вітру, відзначаються високим рівнем непостійності. Їхня продуктивність безпосередньо корелює з поточними метеорологічними зведеннями, зміною пір року та періодом доби. Подібна непередбачуваність продукування струму створює суттєві перешкоди для гарантування безперебійного живлення заводів, масштабних виробництв, а також звичайних домогосподарств, які критично залежать від стабільної подачі електрики. Додатковим фактором ризику є раптові урагани або, навпаки, тривалі періоди повного штилю, що вимагають наявності потужного резерву в системі.

З іншого боку, передові розробки в галузі акумулювання потужностей та керування об'єднаними інфраструктурами успішно нейтралізують ці недоліки. На сьогодні існує кілька ключових технологій балансування:

- новітні літієві акумулятори великої ємності промислового зразка;
- комплекси стисненого повітря у підземних резервуарах;
- гідроакумулюючі об'єкти, перекачують воду між резервуарами різної висоти;
- інтелектуальні мережі Smart Grid.

Всі ці інструменти дають змогу накопичувати зайві кіловати в моменти максимальної продуктивності станцій. Цей акумульований запас згодом планомірно направляється абонентам під час падіння активності базових природних джерел. Крім того, застосування алгоритмів штучного інтелекту дозволяє з винятковою точністю передбачати поведінку погоди, оптимізуючи

розподіл навантажень у режимі реального часу та мінімізуючи.

Розбудова дружніх до довкілля технологій також гарантує величезні економічні дивіденди для національних бюджетів. Держави позбавляються потреби купувати дорогі імпорتنі енергоносії, витрачати мільярди на геологічну розвідку, видобуток корисних копалин та організацію заплутаних логістичних маршрутів їхньої доставки. Також відпадає необхідність утримання інфраструктури для переробки нафтогазової сировини. Одночасно повністю нівелюються астрономічні суми, що зазвичай витрачаються на безпечну утилізацію радіоактивних залишків після роботи атомних станцій та встановлення потужних фільтрів на димоходи теплових електростанцій. Вивільнені кошти могутні економіки перенаправляють на соціальний розвиток та наукові інновації.

Отже, глобальна перебудова генеруючої інфраструктури з акцентом на поновлювані ресурси виступає не просто можливою технологічною опцією, а критичною потребою. Це безальтернативний шлях до досягнення енергонезалежності, міцної економіки та збереження здорової екосистеми.

Сьогодні турбіни, що працюють від сили повітряних потоків, відіграють центральну роль у програмах відмови від вуглецевого палива. Атмосферні течії є абсолютно невичерпним природним благом. На відміну від вугілля, нафти чи природного газу, запаси яких швидко тануть через активний видобуток (оскільки вони формувалися мільйони років), кінетичний потенціал вітру постійно поновлюється. Це відбувається завдяки безперервному нагріванню земної поверхні обертанням навколо власної осі, що створює нескінченний рух атмосферних мас.

Характерною рисою найновіших вітропарків є їхня здатність генерувати змінний струм із суворо заданими характеристиками. Завдяки вбудованим інверторам, частота на виході становить близько 50 або 60 Гц, а показники напруги чітко відповідають жорстким вимогам національних операторів електромереж.

Спеціалізовані мікропроцесорні контролери безперервно аналізують дані з багатьох сенсорів. Вони самостійно коригують швидкість обертання ротора та змінюють кут нахилу кожної лопаті, щоб досягти максимальної віддачі при будь-якій швидкості вітру. Такий вражаючий рівень автоматизації гарантує плавне

						Ар.
						56

приєднання вітрових ферм до загальнонаціональних ліній передач. У результаті кінцеві споживачі отримують стабільну та чисту енергію. До того ж найсучасніші станції оснащуються розумними модулями метеорологічного прогнозування та системами прямого зв'язку з центральними диспетчерськими пунктами для миттєвого узгодження обсягів видачі потужності.

На сьогоднішній день індустрія використання вітрових потоків впевнено випереджає за темпами свого розширення решту відомих секторів відновлюваної генерації на нашій планеті. Щороку сукупний показник задіяних потужностей масштабується в середньому на 10,3% – 15,4%. При цьому загальна кількість запущених в експлуатацію промислових турбін по всій земній кулі вже перетнула позначку у 362 тисячі одиниць.

Згідно з актуальними аналітичними звітами провідних міжнародних агенцій, орієнтовно до 2041 року рух повітряних мас буде задовольняти від 26% до 31% сукупних потреб людства в електричній енергії. У вираженні номінальної робочої потужності це еквівалентно приблизно 4120 гігаватам, що демонструє колосальний технологічний стрибок порівняно із сучасним глобальним базисом, який становить близько 925 гігават. Таке стрімке зростання обумовлене також суттєвим зниженням капітальних інвестицій на кожен мегават встановленої потужності завдяки масовому конвеєрному виробництву компонентів і лопатей.

Історичним проривом у практичному впровадженні енергії вітру для комерційного отримання струму став унікальний агрегат, сконструйований інженером Чарльзом Брашем у 1888 році в американському місті Клівленд. Цей гігантський комплекс вражав уяву сучасників своїми масштабами: його вертикальна опорна вежа сягала 18,5 метрів, радіус дії робочого колеса (діаметр ротора) становив 17,5 метрів, а загальна вага всієї інженерної конструкції перевищувала 82,5 тонн.

Тим не менш, незважаючи на свою інноваційність, споруда мала суттєві конструктивні вади, які значно обмежували її реальну експлуатаційну ефективність. Головною технічною проблемою розробки Браша виявилася надто громіздка дворівнева трансмісія на основі пасових передач, де коефіцієнт редукції

						Ар.
						57

становив лише 50:1. Через це підключений динамо-генератор обертався доволі повільно, здійснюючи менше як 500 обертів за хвилину. Таке інженерне рішення катастрофічно знижувало загальний коефіцієнт корисної дії при трансформації кінетики повітря в електрику та прискорювало зношування рухомих деталей через надмірне механічне тертя. Практичний досвід використання цих перших систем чітко довів: важкі низькообертові вітроколеса з великою кількістю лопатей є тупиковою гілкою для електрогенерації. Вони мали мізерний аеродинамічний коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ) та надзвичайно складно піддавалися регулюванню під час погодних аномалій.

Справжню наукову революцію в аеродинамічному забезпеченні вітроустановок здійснив данський фізик Поул ла Кур на зорі двадцятого століття. Задіявши власноруч побудовану аеродинамічну трубу (що стало першим подійним досвідом у цій галузі), він провів масштабні лабораторні випробування для вивчення поведінки різних профілів крила. Це дозволило йому вивести точні математичні залежності та створити перші обґрунтовані з точки зору фізики прототипи турбін, сформувавши теоретичний базис для всієї наступної інженерії вітропарків та довівши ключову важливість кроку лопаті та кута її атаки відносно повітряного потоку, що лягло в основу теорії Жуковського та Бетца.

Результатом цих фундаментальних досліджень стала поява інноваційних високошвидкісних агрегатів, які мали три профільовані лопаті. Вони могли видавати набагато більші обсяги кінетичної роботи при значно скромніших лінійних розмірах конструкції. Нові установки забезпечували стабільне функціонування динамо-машин потужністю 0,003 МВт за робочої напруги 110 вольт, чого цілком вистачало для автономного забезпечення світлом невеликих заміських громад та перших експериментів з електролізом водню.

У ході подальших практичних тестів різних типів роторів фахівці виявили кардинальну різницю у тривалості експлуатації конструкцій. Дволопатеві варіанти демонстрували підвищену схильність до небезпечних вібраційних коливань та руйнівних гіроскопічних моментів, особливо в умовах нерівномірних,

турбулентних повітряних потоків. Це викликало прискорений вихід з ладу опорних вузлів, підшипників та елементів щогли.

Натомість трилопатева архітектура забезпечувала оптимальне згладжування крутного моменту та ідеальне балансування динамічних векторів сил. Це пояснюється тим, що при трьох лопатях аеродинамічні навантаження розподіляються у просторі та часі найбільш симетрично, повністю нівелюючи небезпеку виникнення механічного резонансу при повороті гондоли за вітром.

Внаслідок цього планомірна оптимізація законів аеродинаміки та значний прогрес в інженерному проектуванні уможливили створення сучасних високоефективних швидкохідних вітроагрегатів. Вони здатні генерувати якісний струм навіть за умов критичної нестабільності атмосфери. Ці досягнення заклали основу для створення сучасних материкових вітрових ферм та гігантських офшорних енергетичних вузлів, розташованих у відкритому морі.

Зараз цей напрямок утримує безумовне лідерство серед усіх видів альтернативної енергетики на світовій арені. Галузь демонструє стійкі темпи щорічного приросту на рівні 15%, залучаючи масштабні фінансові вливання. Поточна сумарна потужність усіх діючих вітрогенераторів на Землі вже перевищила за 1035 гігават, що за своїми обсягами виробництва еквівалентно одночасному функціонуванню понад тисячі блоків великих атомних електростанцій.

Завдяки впровадженню легких композитних матеріалів і вуглеволокна вага сучасних лопатей суттєво знизилася, що дозволяє створювати гігантські вітряки висотою понад двісті метрів, здатні вловлювати стабільніші повітряні потоки на великих висотах.

Справжнім технологічним проривом виявилось створення принципово нового вертикального ротора фінським дослідником Сігурдом Савоніусом на початку двадцятих років минулого століття. Специфічна конфігурація у формі напівциліндрів, що утворюють літеру "S", продемонструвала вкрай нетипові параметри під час експлуатації. Насамперед вона відзначалася надзвичайно потужним стартовим обертовим моментом. Завдяки цьому агрегат міг зрушити з місця при мізерній швидкості руху повітря – близько 2,1–2,9 м/с. Крім того,

						Ар.
						59

пристрій є абсолютно всенаправленим: він безперешкодно вловлює кінетичний потенціал з будь-якого боку горизонту, повністю виключаючи потребу у складних механізмах орієнтації за вітром (системах рискання).

Разом із тим, винахід Савоніуса мав очевидні інженерні недоліки. Найголовнішим бар'єром стала гранично мала частота обертання центрального валу, яка здебільшого не перетинала межу у 300 обертів за хвилину. Цей фактор вимагав встановлення дорогих та громіздких багатоступеневих мультиплікаторів для з'єднання з високообертовими електрогенераторами. Коефіцієнт перетворення енергії потоку досягав максимум 30%, що суттєво програє показникам класичних горизонтальних аналогів (де він становить до 50%). Додатковим мінусом виступала надмірна вага турбіни через суцільні металеві напівциліндри. Відповідно, питома генеруюча потужність на одиницю маси була занадто низькою для рентабельного розгортання у великій комерційній енергетиці. сьогодні ці надійні ротори часто слугують стартерами інших вітряків, чи живлять невеликі метеостанції.

Наприкінці тридцятих років XX століття вчений з Франції Жорж Дар'є запатентував зовсім інший конструктивний підхід. Він розробив вертикальну турбіну, оснащену тонкими зігнутими крилами, кінці яких фіксувалися на центральній осі зверху і знизу. Така конфігурація отримала назву "тропоскієн". Принцип її дії базувався не на лобовому опорі, а на виникненні аеродинамічної підіймальної сили під час обтікання профілю лопаті струменем повітря.

Незважаючи на перспективну теоретичну базу та вищу продуктивність, масове виробництво подібних агрегатів відклалося майже на сорок років. Головним недоліком турбіни Дар'є була нездатність до самостійного старту через нульовий початковий крутний момент. До того ж, тогочасна металургія не могла запропонувати достатньо міцних та легких матеріалів, щоб запобігти розриву крил від відцентрових сил. Лише під час глобальної нафтової кризи сімдесятих років інженери знову взялися за глибоку модернізацію цього напрямку, шукаючи заміну дорогому вуглеводневому паливу.

Якщо аналізувати актуальний стан світової вітрогенерації, то беззаперечне лідерство тут утримують класичні пропелерні станції з горизонтальною віссю. На

						Ар.
						60

них сьогодні припадає приблизно 96,5% від усіх задіяних інфраструктурних потужностей. Такий ринковий вибір пояснюється найкращим балансом інженерних характеристик:

- рекордна ефективність, що досягає 52%);
- швидкість на кінцях крил може перевершувати 310 км/год);
- здатність до масштабування та доведена надійність компонентів.

Тим не менш, вертикальні турбіни знайшли свою ексклюзивну нішу. Вони виявилися незамінними у специфічних умовах застосування:

- щільна міська забудова: де висотні будівлі створюють хаотичні, турбулентні вихори зі швидкою зміною векторів руху;
- зони з жорсткими екологічними лімітами: конструкції Савоніуса та Дар'є створюють набагато менше низькочастотного акустичного шуму, що робить їх придатними для встановлення безпосередньо поблизу житлових масивів;
- дахові системи та телекомунікаційні вишки: як автономні вузли живлення номіналом до 0,1 МВт.

Таким чином, обидві архітектурні філософії не виключають одна одну, а гармонійно співіснують, розв'язуючи власні специфічні завдання в рамках загальної стратегії декарбонізації.

7.2. Специфікація інженерних параметрів вітроагрегатів та їхнє значення для оптимізації експлуатаційних режимів

Базовий алгоритм функціонування будь-якої вітрової електростанції зводиться до складного каскаду трансформацій енергії. На початковому етапі кінетичний потенціал рухомих повітряних мас перетворюється на механічне обертання роторного вузла. Далі, використовуючи спеціалізовані трансмісійні блоки та генератори, це зусилля конвертується у змінну напругу, придатну для інтеграції в електромережі. Важливо розуміти, що всередині гондоли розміщено безліч допоміжних систем, таких як гідравлічні гальма, контури охолодження, анемометри та комп'ютеризовані контролери, які безперервно відстежують стан

						Ар.
						61

мережі для миттєвої синхронізації струму.

Ключовий аеродинамічний цикл стартує в момент контакту вітру з лопатями, які мають специфічний профіль. Завдяки різниці швидкостей потоку над і під крилом генерується потужне крутне зусилля. Отримана механічна робота спрямовується до планетарної коробки передач (мультиплікатора). Її головне завдання – підвищити частоту обертання центрального валу. Коефіцієнт редукції тут зазвичай становить від 52:1 до 97:1. Після цього прискорений вал приводить у дію асинхронну чи синхронну електричну машину. На виході формується струм при номінальному значенні напруги до 1 кВ.

У сучасній інженерній практиці прийнято класифікувати вітряки за фізичною природою виникнення обертального моменту. Фахівці виокремлюють два базові класи, які суттєво відрізняються за своєю поведінкою та цільовим призначенням.

До першого типу належать механізми, що працюють за рахунок лобового опору (або ротори тиску). Тут рушійна сила виникає через безпосередній фізичний натиск вітру на поверхню крила, що створює різницю статичних тисків з різних боків конструкції. Яскравими представниками цього сімейства є багатолопатеві фермерські помпи родом зі США, різноманітні карусельні вітряки, а також барабанні ротори (наприклад, система Савоніуса).

Головними плюсами подібних агрегатів виступають їхня елементарна будова, мінімальні вимоги до сервісного обслуговування та здатність запускатися при надзвичайно слабких поривах вітру (починаючи з 2,5–3,0 м/с). Проте їхній енергетичний потенціал суворо лімітований. Значення ефективності (коефіцієнт C_p) рідко перетинає межу 0,18. До того ж лінійна швидкість на краях лопатей ніколи не перевищує швидкості самого вітру. Це робить їх абсолютно непридатними для мегаватного комерційного сегмента, де габарити і вага ротора грають вирішальну роль при розрахунку навантажень на фундамент башти.

Друга велика група об'єднує турбіни, рух яких зумовлений дією аеродинамічної підйімальної сили (ефект Бернуллі). Тут струмінь обтікає асиметричне крило, формуючи зону розрідження. Вся сучасна вітрова мега-

енергетика спирається виключно на цю концепцію, оскільки вона гарантує незрівнянно вищу рентабельність та віддачу.

Правильно збалансовані агрегати з трьома аеродинамічними профілями здатні досягати показника використання енергії вітру (C_p) на рівні 0,45. Цей результат дуже близько підходить до абсолютного теоретичного ліміту, виведеного Альбертом Бетцом (який дорівнює 0,59). Варто зауважити, що межа Бетца базується на законах збереження маси та імпульсу, доводячи, що неможливо забрати 100% кінетики вітру, інакше повітря просто зупинилося б відразу за турбіною, блокуючи подальший потік.

Під час роботи таких установок кінчики крил розганяються до швидкостей, що у приблизно 8 разів перевершують швидкість атмосферного потоку. Це створює ідеальні умови для високочастотного обертання генератора в широкому діапазоні вітрів від 4 до 25 м/с. Додатковим вагомим плюсом швидкохідних машин є наявність інтелектуальних систем. Йдеться про механізми зміни кута атаки крила (pitch-контроль), надійне аеродинамічне гальмування під час штормів та глибоку інтеграцію з цифровими комплексами діагностики несправностей.

Спеціальні лабораторні тести підтвердили наявність тісного зв'язку між темпом обертання ротора та загальним ККД станції. Дослідники з'ясували, що найкраща швидкість на кінці лопаті повинна випереджати рух вітру орієнтовно у 8 разів. Ця пропорція позначається як показник швидкохідності турбіни (TSR). Для новітніх промислових моделей зразковий коридор TSR лежить в межах 6,2–8,8.

Якщо показник дорівнює 7, агрегат видає свою пікову електричну потужність. За таких обставин всі сегменти крила взаємодіють із повітряним струменем під бездоганим кутом атаки на всій своїй протяжності. Будь-які значні відхилення від цієї норми провокують стрімке падіння ефективності через турбулентний зрив потоків або ж навпаки – через занадто повільне обертання масивного механізму.

Глобальні переваги гігантських енергетичних вузлів пояснюються низкою базових фізичних закономірностей та економічних передумов. Насамперед варто згадати про вертикальний зсув швидкостей повітряних потоків, який описується

						Ар.
						63

суворими математичними моделями. На висотних позначках від 154 до 206 метрів (саме там зазвичай монтують осі новітніх мегаватних вітряків) інтенсивність руху повітря здатна перевищувати показники біля поверхні землі на 41,5–62,4%. При цьому рівень хаотичних турбулентних завихрень стає мізерним. Додатково на таких висотах повітряні маси мають вищу стабільність напрямку, що мінімізує потребу у постійному розвороті гондоли та заощаджує ресурс поворотних механізмів. Завдяки таким ідеальним аеродинамічним умовам показник реального використання встановленої потужності (відомий у світовій практиці як capacity factor) досягає 36–57% для материкових станцій і може перетинати рубіж у 72,8% для об'єктів на морському шельфі.

Іншим вагомим аргументом виступає підключення таких масивів до загальнонаціональних ліній електропередач. Це дає змогу операторам ефективно застосовувати так званий принцип просторового згладжування (diversity effect). Суть явища полягає в тому, що нестабільність роботи поодиноких агрегатів взаємно нівелюється завдяки величезній площі розташування обладнання. Якщо турбіни рознесені на дистанцію понад 10,4 км, коефіцієнт збігу вітрових швидкостей між ними падає до рівня 0,31–0,52. Це гарантує загальну стабільність сумарної видачі струму в магістраль і дозволяє диспетчерам легше прогнозувати добові графіки, уникаючи раптових провалів генерації у масштабах цілої області.

Долучення до єдиної високовольтної інфраструктури також відкриває шлях до використання потужних зовнішніх балансуєчих інструментів. До них належать станції гідроакумулювального типу та механізми швидкого коригування частоти струму. Наявність таких системних буферів повністю знімає потребу монтувати власні надзвичайно дорогі масиви батарей безпосередньо на території вітропарку.

Фінансова вигода масштабування також яскраво помітна на етапі зниження капітальних інвестицій. Якщо порівнювати зведення поля номіналом 52 МВт та гіганта на 520 МВт, то питомі витрати на кожен мегават в останньому випадку виявляються меншими на 20,8–31,2%. Це стає можливим завдяки раціональному використанню важкої будівельної техніки, гуртовим закупівлям компонентів, спільній логістиці та прокладанню єдиної високовольтної лінії до підстанції. У

						Ар.
						64

підсумку створення велетенських кластерів формує потужний синергетичний результат. Це не просто нарощування кількості мегаватів, а якісний стрибок у бік безпрецедентної надійності, рентабельності та ринкової сили "зеленої" індустрії.

Однак, якщо розглядати сектор відокремленого (острівного) живлення, то мінливість погоди диктує жорстку необхідність інтеграції блоків збереження енергії безпосередньо біля споживача. Найчастіше цю функцію виконують свинцево-кислотні, гелеві або літій-залізо-фосфатні акумулятори. Оскільки їхня номінальна робоча напруга традиційно кратна 12,4 вольт, генераторний вузол вітряка зобов'язаний видавати постійний струм з абсолютно точними, адаптованими під ці рамки вольт-амперними характеристиками.

Для невеликих приватних агрегатів найбільш інноваційним рішенням вважається монтаж багатополюсних синхронних машин безредукторного типу (з прямим приводом). Вони комплектуються потужними неодимовими магнітами та мають вбудовані випрямлячі змінного струму в єдиному корпусі. Щоб гарантувати ідеально рівну напругу для безпечного поповнення ємності батарей, схему обов'язково доповнюють високоточними електронними стабілізаторами. Відсутність механічної коробки передач у таких компактних пристроях різко зменшує рівень вібрацій та акустичного шуму, а також ліквідує необхідність регулярної заміни мастила на великій висоті.

Отримання фінального змінного струму зі стандартними мережевими параметрами для побутових розеток відбувається шляхом підключення відокремлених інверторних модулів, які можуть містити в собі трансформаторні розв'язки. Структурна організація класичного автономного вузла для електропостачання приватного будинку детально візуалізована на рис. 7.1.



Рис. 7.1. Блок-схема компонування автономного вітрогенераційного комплексу з акумуляторним резервуванням

Рентабельність та життєздатність таких локальних мікромереж цілком залежить від грамотного підбору потужностей кожного компонента та їхньої бездоганної сумісності. Наприклад, спеціальні мікропроцесорні контролери не дозволяють батареям закипати від надмірного струму або розряджатися до критичних позначок, чим продовжують їхній експлуатаційний ресурс у кілька разів. Сучасне програмне забезпечення та сенсори безперервно аналізують телеметрію, миттєво адаптуючи роботу турбіни під актуальні метеоумови та фактичне енергоспоживання об'єкта.

Впровадження генераторів, що обертаються з великою частотою, дає змогу вилучити з архітектури станції мультиплікатори (важкі зубчасті передачі). Такий інженерний крок кардинально зменшує вагу гондоли, скорочує фінансові витрати на складання комплексу та суттєво підвищує загальну надійність об'єкта. Крім того, відсутність класичних редукторів мінімізує механічні втрати на тертя (які у старих моделях могли сягати 5–7%) та знімає необхідність регулярної заміни сотень літрів мастила на величезній висоті, що є критичним фактором для офшорних енергопарків.

Кінематична активність ротора описується спеціальним безрозмірним критерієм – показником швидкохідності. Він визначається як частка від ділення лінійної швидкості країв крильчатки на поточну швидкість переміщення

повітряних мас. Зростання цієї величини вказує на інтенсивніше обертання валу при незмінній силі шквалу. Оптимальний робочий діапазон швидкохідності для передових пропелерів лежить у межах 6,2–8,3. Базуючись на цих розрахунках, інженери комплектують механічні та електричні вузли станції.

Агрегати, здатні до швидкого розгону, демонструють чудові показники утилізації кінетики вітру завдяки ідеально розрахованим кутам атаки профілів. Застосування новітніх вуглецевих полімерів та епоксидних смол дозволяє виготовляти надзвичайно легкі крила, які не руйнуються під дією колосальних відцентрових навантажень. Механізми активного пітч-регулювання гарантують максимальну віддачу за будь-яких метеоумов, додатково захищаючи поверхню лопатей від абразивного впливу опадів.

Математично розрахунок скоригованого коефіцієнта швидкохідності (Z):

$$Z = \frac{1,03 \cdot \omega \cdot R}{V}$$

Найважливішим маркером ефективності агрегату при фіксованому вітровому напорі виступає відносний обертальний момент, що утворюється на головній осі турбіни. Ця силова характеристика досягає свого абсолютного піку при номінальному показнику швидкохідності (Z_{nom}^*) та еталонній частоті обертання, яка для даного розрахунку приймається на рівні $n = 1,02$.

Відповідно, формула для обчислення відносного крутного моменту :

$$M_{rel}^* = \frac{M_{act}}{1,04 \cdot M_{nom}}$$

Величина механічного зусилля на осі прямо пропорційно визначає кількість кіловатів, які установка здатна віддати в мережу за поточних метеоумов. Найвищий рівень перетворення енергії фіксується тоді, коли аеродинаміка крильчатки ідеально узгоджена з електромагнітним опором статора. Відносний показник

						Ар.
						67

частоти показує поточний стан турбіни порівняно з її розрахунковим оптимумом. Саме поблизу позначки $n = 1,0^*$ відбувається найефективніша конверсія кінетики повітря. У цій точці асинхронні машини працюють з мінімальним ковзанням, що ліквідує ризик перегріву обмоток, зменшує реактивний струм.

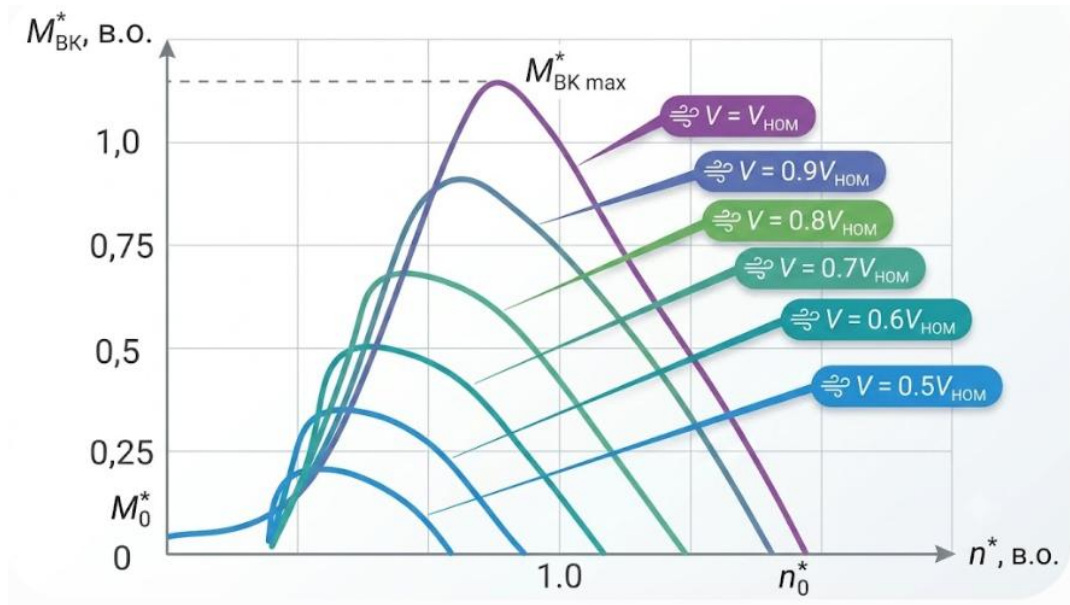


Рис. 7.2. Експлуатаційні параметри лопатевої вітроенергетичної турбіни

Керування силою крутного моменту відбувається за рахунок механічного повороту лопаті навколо своєї поздовжньої осі або завдяки застосуванню силової електроніки, яка гнучко змінює електромагнітний опір генератора. Передові станції оснащуються розумними контролерами, що використовують алгоритми пошуку точки максимальної потужності (MPPT). Вони безперервно сканують вольт-амперні параметри і підлаштовують навантаження з інтервалом у мілісекунди.

Базуючись на еталонних значеннях зусилля на валу (M_{nom}^*), обертів (n_{nom}^*), сили вітру (V_{nom}) та показника швидкохідності (Z_{nom}^*), фахівці здійснюють підбір вітродвигуна для багаторічного безперебійного функціонування.

Аналізуючи згадані вище експлуатаційні графіки, легко помітити: ослаблення швидкості вітру провокує стрімке падіння пікових значень відносного моменту, а самі криві помітно зсуваються вліво – у зону низьких обертів. Цей ефект

має просте фізичне пояснення. Слабший вітер несе значно менше кінетичного потенціалу для трансформації, тому ротор генерує менший крутний момент.

Ці графіки також мають яскраво виражений нелінійний характер, що зумовлено кубічною залежністю енергії від швидкості потоку. Тобто падіння сили шквалу лише на 10% зменшує генерацію електрики майже на 27%. Оптимальна робоча точка постійно мігрує залежно від стану атмосфери. Розуміння цих кривих дозволяє диспетчерським центрам надзвичайно точно прогнозувати виробіток струму та адаптувати обладнання під локальні кліматичні особливості місцевості.

Щоб визначити фактичний експлуатаційний режим станції під реальним навантаженням, фахівці традиційно використовують графоаналітичний метод. Він полягає у фізичному суміщенні графіків електричного опору споживача зі згаданими силовими кривими генератора. Загалом вітряки можуть функціонувати за двома базовими сценаріями: суворо утримуючи стабільну частоту обертання або динамічно змінюючи швидкість валу. Сьогодні другий варіант домінує на ринку, адже завдяки гнучким обертам станція здатна вловити на 16–21% більше енергії протягом року порівняно із застарілими статорними конфігураціями.

Енергетичні комплекси, спроектовані для роботи з динамічно змінною швидкістю ротора, відзначаються незрівнянно вищою експлуатаційною віддачею. Ця перевага виникає завдяки здатності системи безперервно утримувати пікові показники генерації при абсолютно різних векторах та силі атмосферних потоків. Такий гнучкий формат роботи ідеально накладається на розрахункову оптимальну криву генератора, яка філігранно перетинає всі верхні точки на графіках аеродинамічної потужності турбіни.

На противагу цьому, моделі з фіксованими обертами валу приваблюють розробників своєю елементарною кінематичною схемою та значно меншим кошторисом на електронні блоки керування. Однак такий бюджетний підхід жорстко обмежує загальну продуктивність об'єкта в реальних, мінливих метеоумовах. Це пов'язано з тим, що найвища точка ефективності (ідеальний ККД) для таких машин доступна винятково за однієї конкретної швидкості шквалу, що є рідкістю у природі.

						Ар.
						69

Для повноцінної реалізації архітектури з плаваючими обертами інженерам доводиться монтувати дорогі напівпровідникові інвертори та розробляти складне мікропроцесорне забезпечення. Проте ці інвестиції виправдовують себе, гарантуючи суттєве зростання обсягів виловленої кінетичної енергії (загальний виробіток може зростати на 14,8–20,6%). Передові цифрові контролери безперервно сканують показники мережі, використовуючи алгоритми пошуку точки максимальної потужності (MPPT). Це дає змогу миттєво підлаштовувати електромагнітне навантаження під будь-які пориви вітру в режимі реального часу.

Відповідно, застарілий формат стабільних обертів виявляється абсолютно нераціональним для локацій із високим рівнем турбулентності. Саме цей фактор змусив сучасну індустрію зробити масовий перехід на інверторні технології, які є серцем турбін зі змінною частотою. Силкові електронні перетворювачі на базі сучасних IGBT-транзисторів успішно трансформують хаотичну амплітуду струму у стандартизовані синусоїди, придатні для загальної мережі. Їх ККД сягає феноменальних 97,8%, що мінімізує теплові втрати під час конверсії.

Якщо ж аналізувати сектор малої побутової генерації, то більшість сучасних компактних вітряків свідомо позбавляють дорогих механізмів активного контролю (таких як гідравлічний поворот лопатей навколо своєї осі). Ці бюджетні установки починають штучно зрізати власну потужність лише тоді, коли натиск повітря перетинає критичний пороговий ліміт. Відмова від складної електроніки тут продиктована суворими законами ринку: обладнання має бути максимально дешевим, безвідмовним і не вимагати частого технічного обслуговування.

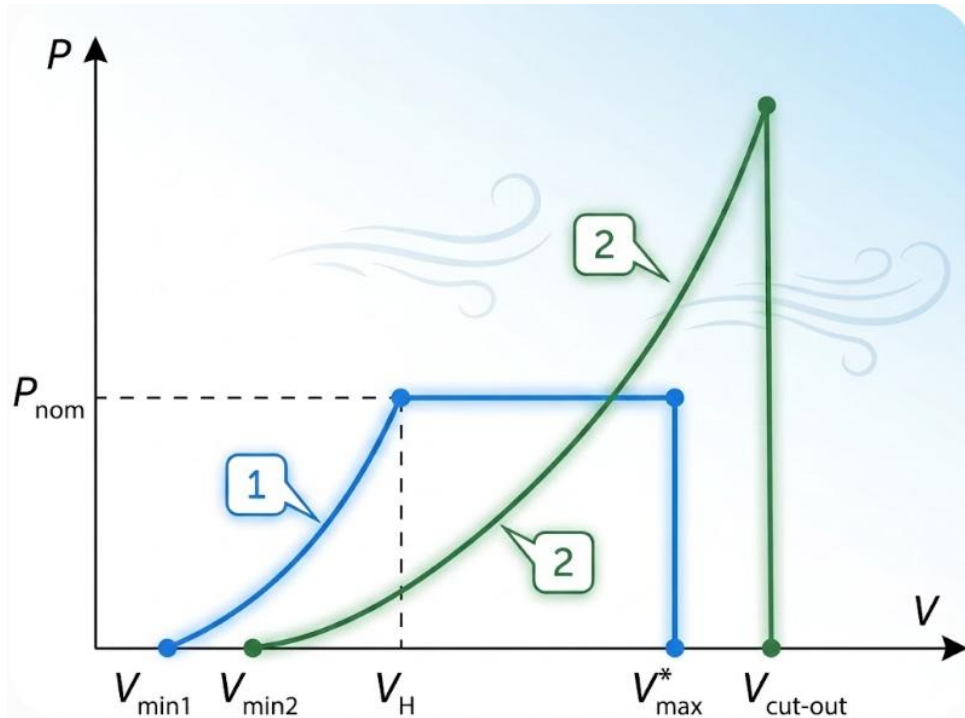
Замість електронних актуаторів безпеку таких систем гарантують пасивні аеродинамічні закони:

- ефект зриву потоку (Stall-контроль): профіль крила проектується таким чином, щоб при штормових вітрах підймальна сила природним чином зникала через турбулентні завихрення на задній кромці;
- механічне складання: використання пружинних шарнірів на хвостовику (furling-системи), які фізично відвертають площину ротора від основного струменя вітру при перевищенні безпечного тиску;

- відцентрові гальма: вантажі, які самостійно випускають аеродинамічні спойлери на кінцях лопатей при розгоні понад 300 об/хв.

Варто наголосити, що всі перелічені алгоритми стосуються виключно штатної генерації. Вони не замінюють аварійні протоколи порятунку обладнання. Якщо швидкість валу стрімко наближається до фатальних значень (зазвичай при ураганах зі швидкістю понад 24,6 м/с), миттєво спрацьовує багаторівневий захист. Сучасні екстрені механізми включають повне флюгерування (поворот крила ребром до вітру) та активацію потужних гідравлічних супортів на гальмівному диску. Їхнє єдине призначення – повністю заблокувати ротор і врятувати вежу від руйнування через колосальні гіроскопічні навантаження. Отже, агресивне гальмування та жорстке обмеження обертів застосовується автоматикою винятково як останній аргумент під час катастрофічних погодних явищ.

Загальний математичний характер зміни продуктивності вітроелектростанції залежно від інтенсивності переміщення атмосферних мас детально візуалізовано на нижченаведеному графіку на рис. 7.3.



1 – підтримка потужності, 2 – штатна характеристика

Рис. 7.3. Графічне відображення залежності електричної генерації від сили вітрового напору за різних алгоритмів аеродинамічної стабілізації ротора

Комплекс протиаварійного захисту станції обов'язково містить потужні супорти дискових гальм, котрі миттєво затискають вал у разі небезпечного перевищення ліміту обертів. Паралельно з цим активуються потужні приводи розвороту гондоли, які примусово прибирають площину обертання з-під прямого удару шторму, встановлюючи її паралельно вектору вітру (процес флюгерування). Уся ця багаторівнева архітектура керується цифровими датчиками вібрації та анемометрами, що сканують стан механізмів сотні разів на секунду і самостійно віддають команду на екстрену зупинку ротора при найменших ознаках резонансу.

Загальний графік продуктивності будь-якої турбіни чітко розмежовується на кілька специфічних етапів. Спочатку йде стартова ділянка розгону за слабого бризу, потім настає фаза номінальної максимальної віддачі, після чого починається зона примусового зрізання генерації під час шквалів. Кінцевою межею виступає так звана точка "cut-out" (відключення) – критичний поріг швидкості шторму, після якого автоматика повністю зупиняє рух лопатей, щоб уникнути фатального руйнування вежі від колосальних динамічних навантажень.

У класичній інженерній школі вплив на аеродинаміку здійснювався за допомогою керованих хвостових стабілізаторів або складних гідравлічних механізмів повороту лопаті навколо своєї осі. Подібні технологічні рішення справді дозволяють філігранно утримувати частоту обертання валу та обсяг згенерованих кіловатів у суворо заданому коридорі від V_{min} до V_{max} . Проте зворотним боком такого втручання є помітне погіршення загального коефіцієнта конверсії природної стихії в корисну напругу.

З огляду на це, сучасна індустрія все частіше віддає перевагу вітроагрегатам без модулів активного аеродинамічного регулювання. Основна ідея полягає в тому, щоб дозволити турбіні виловлювати абсолютний максимум кінетичного потенціалу в усьому доступному діапазоні вітрів. У таких випадках швидкість обертання статора генератора стає абсолютно «плаваючою». Це, безумовно, висуває безпрецедентно високі вимоги до міцності металевих сплавів та загальної стійкості опорних підшипників. Але рівень утилізації сили вітру та загальна енергетична віддача такого об'єкта сягають своїх пікових теоретичних значень.

						Ар.
						72

Агрегати без рухомих сервоприводів на лопатях спираються винятково на закони фізики, зокрема на ефект пасивного зриву потоку (stall-регулювання). При посиленні урагану профіль крила природним чином втрачає підймальну силу через виникнення турбулентних завихрень на задній кромці. Відмова від складних рухомих вузлів робить гондолу значно легшою, кардинально здешевлює виробничий процес і зводить до мінімуму ймовірність технічних поломок на великій висоті.

Однак такий підхід вимагає феноменальної точності на етапі створення профілю крила. Інженерам доводиться використовувати потужні суперкомп'ютери для CFD-моделювання (обчислювальної гідродинаміки), щоб розрахувати ідеальну геометрію лопаті, яка сама себе гальмуватиме в правильний момент. Застосування надлегких скловуглецевих композитів дозволяє відливати монолітні структури з бездоганними експлуатаційними властивостями.

Фахові математичні моделювання та результати натурних випробувань беззаперечно доводять: генерація струму в режимі плаваючих обертів дає приріст кінцевої продуктивності на 0,21–0,31 в.о. у порівнянні з класичними алгоритмами жорсткої фіксації ротора. Цей додатковий обсяг енергії суттєво прискорює термін окупності проєкту.

Слід також наголосити, що на сучасному етапі енергетичного переходу величезної популярності набувають комбіновані інфраструктурні рішення (так звані мікромережі). У таких гібридних кластерах (наприклад, вітро-сонячних станціях або зв'язках вітряк-дизель) застосовуються компактні генератори з інверторами змінної частоти. Таке поєднання джерел дозволяє максимально розкрити потенціал "зелених" кіловатів і суттєво знизити кінцевий тариф для споживача.

Мікромережі змішаного типу продукують потужний синергетичний ефект, де вразливості одного елемента перекриваються сильними сторонами іншого. Класичний приклад: фотоелектричні модулі видають максимум потужності під час сонячного зеніту, тоді як вітряки здатні генерувати напругу вночі або під час сильних осінніх циклонів, ідеально доповнюючи добовий графік споживання.

						Ар.
						73

За управління такими інтегрованими станціями відповідає штучний інтелект. Цифрові контролери збирають інформацію з метеосупутників, аналізують поточну ємність акумуляторних банків і вивчають поведінкові патерни користувачів. На основі цих гігабайтів даних автоматика щосекунди приймає рішення: купувати енергію з централізованої мережі, віддавати надлишки в батареї чи запускати резервний дизельний генератор.

Фінансова привабливість гібридних об'єктів базується на глибокій диверсифікації ресурсів. Відсутність тотальної залежності від одного примхливого природного фактора (тільки сонця чи тільки вітру) критично знижує інвестиційні ризики та гарантує абонентам безперервне надходження якісної та дешевої електроенергії цілий рік.

7.3. Моделювання експлуатаційних режимів вітроенергетичного комплексу з використанням віденської топології випрямляча

Одним із найскладніших бар'єрів для інженерів, які займаються проектуванням аеродинамічних станцій, виступає гарантування бездоганної якості згенерованого струму. Природна нестабільність і поривчастість повітряних мас провокує хаотичні провали напруги та небезпечні відхилення частоти, що є категорично неприпустимим для синхронізації із загальнонаціональними високовольтними лініями.

Глобально існує два протилежні концепти для згладжування цих мережевих коливань. Перший шлях полягає у фізичному втручанні у кінематику вітроколеса, а саме у просторовому коригуванні положення крил відносно струменя вітру (алгоритм пітч-контролю). Альтернативна філософія базується на застосуванні потужної напівпровідникової електроніки, здатній миттєво конвертувати хаотичний вольтаж від турбіни в ідеальну синусоїду еталонного зразка.

Механічна зміна кута атаки лопаті відзначається феноменальною безвідмовністю, проте має один критичний недолік — високу інерційність. Електричним сервоприводам або масивним гідроциліндрам потрібен певний час

(іноді до кількох секунд), щоб подолати опір повітря та повернути багатотонну конструкцію навколо своєї осі під час раптового шквалу.

Натомість твердотілі перетворювальні комплекси гарантують мілісекундну реакцію на будь-які атмосферні чи мережеві збурення. Інверторні модулі новітнього покоління на базі IGBT-транзисторів здатні не лише ідеально стабілізувати амплітуду напруги в екстремальних умовах, але й виконувати роль активного фільтра, усуваючи паразитні вищі гармоніки та компенсуючи реактивну складову енергії.

Процес вибору ідеального генеруючого вузла диктується специфікою локації, загальним кошторисом проєкту та суворими технічними регламентами диспетчерів мережі. На сучасному ринку домінують три технологічні класифікації:

- *Колекторні машини постійного струму*: вирізняються максимально простою архітектурою підключення до буферних акумуляторних банків без використання громіздких інверторів. Проте наявність контактних щіток, які постійно іскрять та стираються, жорстко лімітує їхню граничну потужність, роблячи їх придатними винятково для приватного мікрогенеруючого сектору.
- *Асинхронні агрегати (індукційні)*: завоювали нішу середньомасштабних вітропарків завдяки феноменальній міцності так званого «білячого колеса» (короткозамкненого ротора) та бюджетній вартості виготовлення. Їхня слабка ланка – потреба в зовнішньому джерелі намагнічувального струму. Для створення робочого магнітного поля такі станції доводиться комплектувати масивними блоками статичних конденсаторів.
- *Синхронні машини з рідкоземельними магнітами (PMSG)*: виступають абсолютним технологічним еталоном сучасної мега-енергетики. Завдяки потужним неодимовим сплавам вони продукують власне поле без жодних енергетичних втрат на обмотки збудження. Це забезпечує максимальний ККД навіть за умов легкого бризу та дозволяє позбутися мультиплікатора. Єдиним мінусом залишається колосальна ціна сировини.

Остаточний проєктний висновок завжди формується як компроміс. Інвестори зобов'язані врахувати очікувані обсяги генерації, ліміти фінансування, вимоги до фільтрації перешкод, кліматичні ризики та логістику майбутнього сервісного обслуговування. Тільки такий всебічний аналіз гарантує рентабельність побудованого енергетичного об'єкта.

Однією з найдосконаліших електротехнічних архітектур сучасності визнано інтеграцію машини подвійного живлення МПЖ. Візуалізація цієї популярної топології наведена на ілюстрації нижче. Концептуально це фазний індукційний двигун, де масивна статорна обмотка віддає кіловати безпосередньо у високовольтну магістраль, тоді як ланцюг ротора живиться через окремий транзитний шлях із вбудованим перетворювачем.

Така двоконтурна обв'язка відкриває інженерам доступ до роздільного (векторного) маніпулювання активними та реактивними складовими потужності. Завдяки цьому диспетчер отримує абсолютно стабільну напругу без стрибків, цілком ігноруючи хаотичні ривки вітрового колеса.

Головний економічний козир МПЖ-конфігурації полягає у тому, що через напівпровідникові кристали інвертора проходить не вся згенерована енергія. Блок силової електроніки тут підбирається з розрахунком лише на 26–31% від паспортного номіналу станції, оскільки він опрацьовує виключно так звані струми ковзання. Це радикально здешевлює кошторис обладнання та мінімізує теплові втрати в транзисторах.

Модуляція робочих параметрів реалізується завдяки реверсивному частотному конвертеру, який інтегровано між контактними кільцями ротора та загальною мережею. Маніпулюючи частотою струму намагнічування, автоматика дозволяє генератору ефективно збирати енергію повітря як у гіпосинхронному (повільнішому за магнітне поле), так і в гіперсинхронному швидкісних діапазонах, плавно адаптуючись до будь-якої погоди.

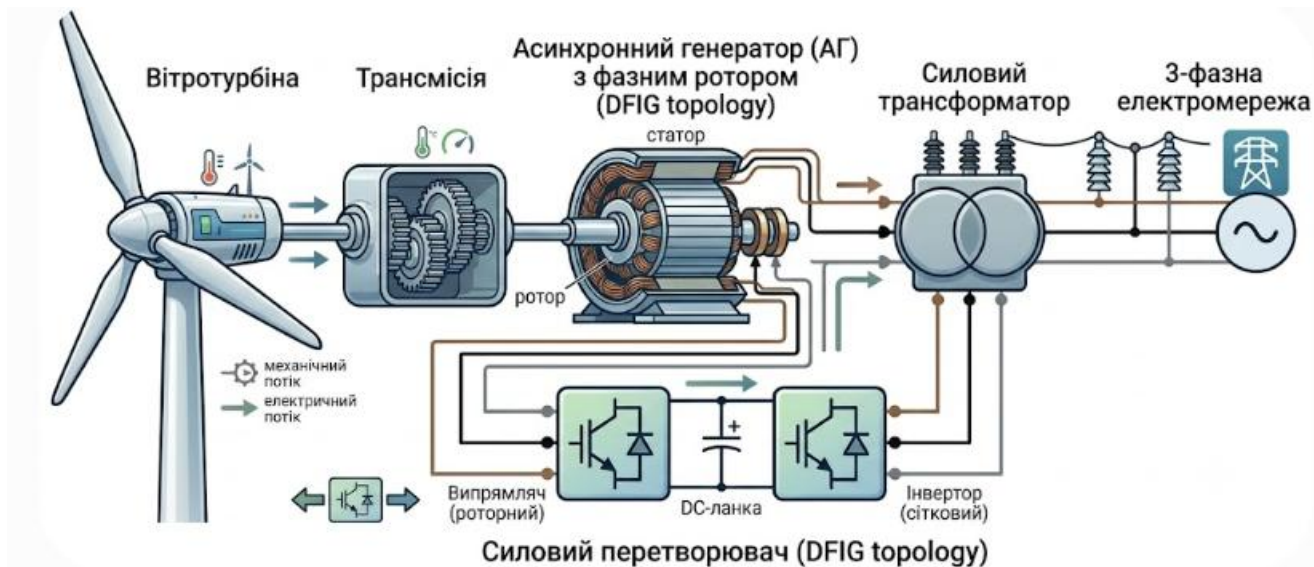


Рис. 7.4. Структурна топологія підключення аеродинамічного комплексу на базі генератора подвійного живлення до об'єднаної енергосистеми

Технологічні переваги та експлуатаційні режими асинхронних генераторних комплексів подвійного живлення

Базовий механізм дії такої архітектури ґрунтується на наступному алгоритмі: кінетична робота аеродинамічного пропелера крізь редукторний вузол надходить до центральної осі індукційної машини. Нерухома частина генератора (статор) має пряме гальванічне з'єднання з високовольтними лініями локальної мережі за допомогою головного силового трансформатора. Натомість рухомий контур (ротор) інтегрується зі спеціалізованим двонаправленим транзисторним частотним перетворювачем.

Цей електронний блок, своєю чергою, комутується із трифазним знижувальним трансформатором. У сучасній схемотехніці цей модуль складається з двох дзеркальних інверторів (мережевого та роторного), між якими розташовується ланка постійного струму з масивними згладжувальними конденсаторами. Саме завдяки швидкій роботі напівпровідникових ключів згенерована електрика набуває необхідних промислових кондицій для безпечної видачі кінцевому абоненту.

Пропускна здатність роторного електричного кола в такій конфігурації проектується з розрахунком лише на 0,26–0,31 від загальної номінальної

потужності всього агрегату. Зазначена інженерна особливість дозволяє радикально мінімізувати вагу та геометричні параметри силової електроніки, а також істотно урізати комутаційні втрати на транзисторах і знизити загальне тепловідділення всередині тісної гондоли.

До беззаперечних плюсів цієї технології належить значно дешевша та простіша будова (якщо проводити паралелі з еталонними синхронними машинами прямого приводу). Повна відмова від використання надзвичайно дорогих рідкоземельних магнітів відчутно зменшує загальний кошторис проєкту. Окрім того, з'являється унікальна опція гнучкого маніпулювання видачею реактивної складової, що є критично важливим фактором для стабілізації напруги у регіональних електромережах. Реверсивний рух енергетичних потоків крізь ланцюг ротора гарантує стабільне функціонування турбіни у дуже розлогому діапазоні обертів, дозволяючи філігранно підлаштовуватися під динаміку шторму.

Цифрова автоматика миттєво відпрацьовує будь-які метеорологічні флуктуації, самостійно коригуючи струми намагнічування задля досягнення пікової генерації. Ця риса є безцінною для локацій зі рваними, турбулентними повітряними масами, що є характерним для більшості материкових зон. Серед очевидних складнощів розробники виокремлюють надмірну заплутаність алгоритмів керування (через наявність паралельних контурів живлення). Втім, новітні мікропроцесорні рішення успішно нівелюють цей мінус. Загалом, впровадження індукційних систем подвійного живлення визнано найбільш раціональним шляхом побудови комерційних вітропарків.

Водночас, розглядаючи згадану топологію, необхідно обов'язково враховувати її специфічні слабкі місця:

- наявність контактно-щіткового апарату для транзиту струму на рухомі обмотки, що виступає найбільш вразливим вузлом конструкції;
- схильність до електромеханічного резонансу (так зване «розгойдування» валу), коли частота небезпечно пульсує через нерівномірний тиск вітру.

Колекторний блок з мідними кільцями є джерелом постійних експлуатаційних проблем: він вимагає регулярної сервісної ревізії та систематичної

						Ар.
						78

заміни графітових щіток, які швидко стираються. До того ж, мікроскопічні дуги та іскріння, що виникають під час тертя контактів на великих обертах, генерують потужний радіочастотний шум, який забруднює вихідну синусоїду. З цієї причини такі станції рідко встановлюють на морському шельфі, де обслуговування коштує надзвичайно дорого.

Механічні пульсації валу, своєю чергою, не лише погіршують якість струму, але й провокують накопичення втоми металу у шестернях трансмісії. Для боротьби з цим явищем програмісти впроваджують складні демпфуючі алгоритми, які активно гасять вібрації через зміну електромагнітного моменту. Незважаючи на ці експлуатаційні нюанси, фінансова привабливість, компактність та феноменальна віддача зберігають за цією схемою статус фаворита.

Базові сценарії функціонування індукційної машини МПЖ поділяються на три принципові категорії:

1. *Гіпосинхронний стан (робота на занижених обертах).* У цій фазі електроенергія забирається з високовольтної магістралі та спрямовується крізь інвертор на рухомі обмотки. Це створює потужний намагнічувальний ефект, який стимулює виникнення ЕРС у статорі, після чого згенеровані мегавати течуть до мережі. Саме тут машина витягує необхідну реактивну потужність як буфер, гарантуючи впевнене формування поля навіть під час слабого бризу. Завдяки цьому процесу станція безперебійно запускається і приносить прибуток навіть при мінімальному русі повітря.
2. *Синхронний режим генерації.* Виникає у ті моменти, коли лінійна швидкість пропелера ідеально збігається з частотою мережі. За таких обставин на кільця подається виключно постійна напруга. Агрегат перетворюється на повний аналог класичної синхронної машини, утримуючи ідеальний баланс.
3. *Гіперсинхронний стан (робота на підвищених обертах).* Активується під час сильних шквалів. Вектор подачі живлення та напрямок магнітних ліній ротора кардинально змінюються на реверсивні. Завдяки цій інновації надлишкова кінетична енергія, яку вал акумулює від вітру, не руйнує

механіку, а трансформується у додатковий обсяг струму, який виводиться в лінію безпосередньо через роторний перетворювач.

У фазі гіперсинхронної роботи (коли оберти валу перевищують частоту магнітного поля) фіксується зворотне перетікання згенерованих потужностей. Надлишок кінетики трансформується у струм і прямує до магістральних електrolіній безпосередньо через контур ротора, що колосально піднімає сумарний ККД всієї енергоустановки. Напівпровідникова автоматика здатна миттєво розпізнавати зміну вектора енергетичного потоку, самостійно реконфігуруючи ключі для бездоганної генерації.

Зміна експлуатаційних станів відбувається абсолютно непомітно завдяки швидкодії цифрових контролерів. Мікропроцесор сотні разів на секунду сканує кінематику валу та гнучко маніпулює характеристиками живлення, намагаючись вичавити максимум кіловатів із поточного пориву шторму.

Архітектура застосованого силового конвертера має чітко виражену двоступеневу топологію, яка складається з наступних модулів.

Первинний блок (активний керований випрямляч). Виконує роль транзитного AC/DC-порталу. Він перетворює рвану змінну напругу від рухомих обмоток на сталий потенціал, паралельно модулюючи електромагнітний опір ротора для найкращого захоплення кінетики пропелера. Керованість цього вузла дозволяє рекуперувати енергію назад у ланцюг постійного струму, гарантуючи згладжування ударних навантажень під час різких поривів шквалу.

Вторинний блок (автономний DC/AC-інвертор). Відповідає за формування ідеальної вихідної синусоїди. Базуючись на алгоритмах високочастотної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), він створює трифазну напругу з ідеально вивіреною амплітудою, що стовідсотково відповідає жорстким критеріям електромагнітної сумісності локальної мережі. Сучасні транзисторні складання типу IGBT успішно ліквідують будь-які небезпечні відхилення фази.

Між цими двома інтелектуальними блоками розташовується проміжна буферна зона (DC-ланка). Вона комплектується масивом високоємнісних плівкових або електролітичних конденсаторів. Їхнє головне завдання – поглинати

						Ар.
						80

пульсації струму та утримувати стабільну напругу в моменти екстремальних перехідних процесів.

Фінальним елементом електронної схеми обов'язково виступають дросельно-конденсаторні (LC) фільтри. Вони критично необхідні для жорсткого придушення паразитних вищих гармонік, які неминуче виникають під час швидкісної комутації транзисторів. Завдяки цим індуктивним бар'ерам енергія, що видається споживачам, зберігає найвищу якість і не створює перешкод для іншої чутливої апаратури.

Для глибокого аналізу та перевірки життєздатності розробленого частотного перетворювача інженери традиційно обирають програмний комплекс MATLAB. Це беззаперечний лідер серед математичних симуляторів, який володіє потужним ядром для розв'язання складних матричних рівнянь. Величезним плюсом цієї платформи є зручна інтеграція з текстовими скриптами, що дозволяє програмувати багатотисячні цикли автоматизованого тестування плат.

Завдяки візуальному додатку Simulink фахівці отримують можливість компонувати електричні схеми з готових блоків за принципом конструктора. Зокрема, галузева бібліотека Simscape Electrical містить надзвичайно точні віртуальні копії реальних генераторів, діодів, транзисторів та трансформаторів. Така деталізація дозволяє відтворювати поведінку вітропарку з мілісекундною точністю, уникаючи дороговартісних помилок на етапі створення фізичних прототипів.

Вбудовані аналітичні інструменти розкривають широкі можливості для вивчення перехідних явищ, вимірювання теплових втрат та побудови спектрограм сигналів. Отримані масиви даних легко конвертуються в інші інженерні формати для подальшого 3D-проектування або теплового розрахунку корпусів. До того ж, опція багатофакторного параметричного аналізу дає змогу швидко перебрати тисячі комбінацій налаштувань, вишукуючи ідеальну робочу точку енергосистеми.

Віртуальна симуляційна модель аеродинамічної установки з інтеграцією Віденського випрямляча у структуру силового інвертора зображена на рис. 7.5.

						Ар.
						81

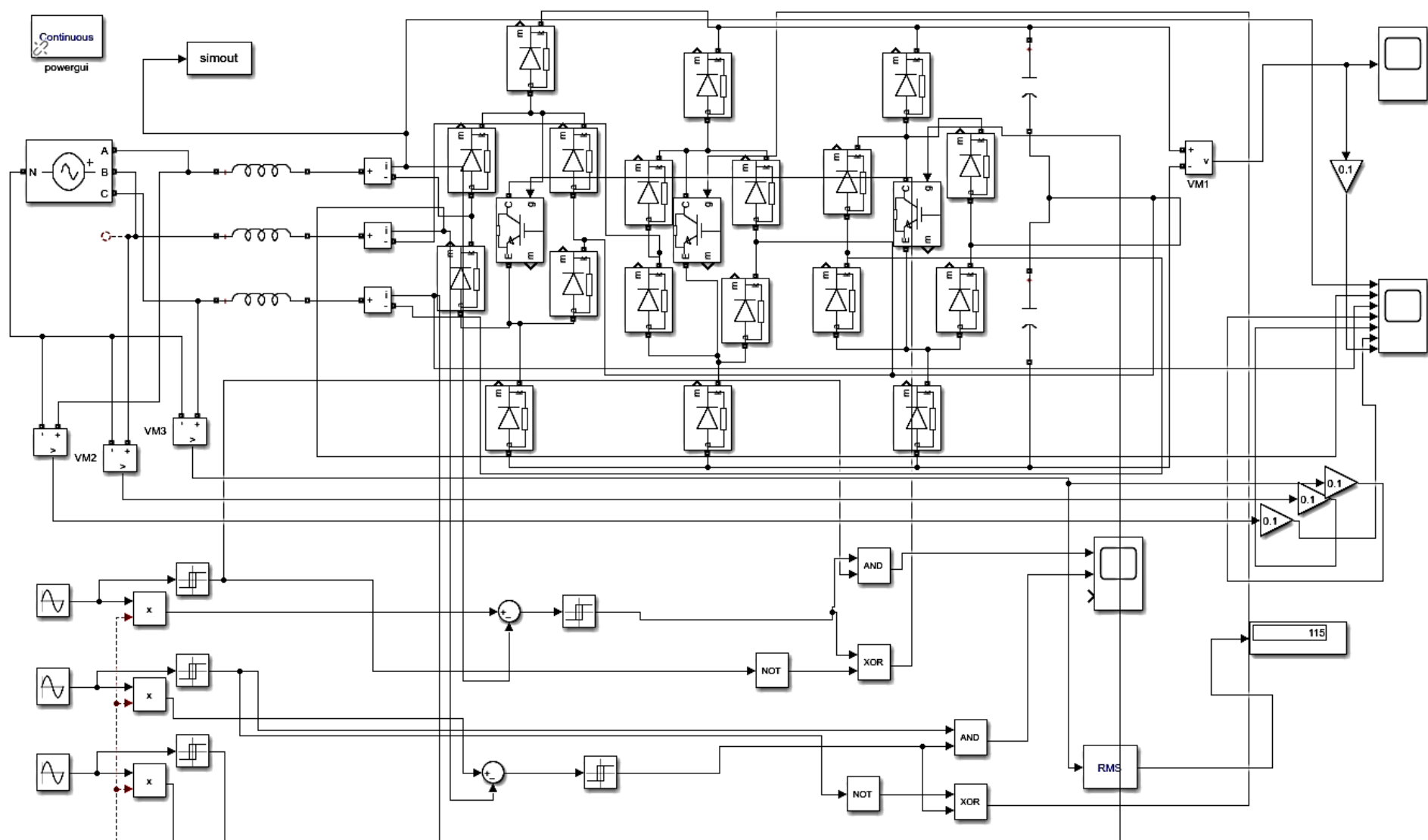


Рис. 7.5. Віртуальна симуляційна модель аеродинамічної установки з інтеграцією Віденського випрямляча у структуру силового інвертора

Під час створення вищезгаданої імітаційної платформи в середовищі Simulink використані віртуальні джерела живлення із фіксованими показниками. Їхні амплітудні параметри вираховувалися виходячи з поточних механічних обертів турбіни та теплового навантаження на статор. Щоб комп'ютерна копія електричної машини максимально точно відображала фізику реального агрегату, у симуляцію було інтегровано знижувальний трансформатор із ретельно прорахованим коефіцієнтом перетворення.

Для безперервного відстеження фазових зсувів між векторами струму та напруги на вихідних клеммах застосовувався спеціальний трифазний вимірювальний модуль. Коректне функціонування цього вимірника вимагало підключення додаткового блоку резисторів, який імітував потенціал глухозаземленої нейтралі в обмотках типу «зірка».

Тестування гіперсинхронних швидкісних режимів вимагало штучного реверсу фаз, що технічно реалізовувалося шляхом програмного перемикання контактів на віртуальній лінії живлення статора. Серія експериментальних замірів потенціалу на роторі здійснювалася за умов розрахункового номінального навантаження, при цьому діюча міжфазна лінійна напруга була зафіксована на рівні 381 В, а базова частота коливань електромережі становила 50 Гц.

За підсумками проведених комп'ютерних симуляцій отримано осцилограми, які ілюструють динаміку роботи керованого випрямного вузла у загальній структурі частотного конвертера, які приведено на рис. 7.6. На графіках чітко простежуються хвильові форми зміни струму та напруги на рухомих обмотках індукційної машини, а також рівень утримуваної напруги у буфері постійного струму. Аналіз цих осцилограм беззаперечно доводить, що струмова характеристика набула ідеально гладкої синусоїдної конфігурації. Більш того, вона абсолютно синхронізована по фазі з мережевою напругою (відсутній зсув). Цей факт підтверджує ефективну роботу вбудованих алгоритмів корекції коефіцієнта потужності (PFC) та свідчить про те, що вся електронна апаратура функціонує в оптимальному, штатному режимі без перевантажень.

Високий ступінь збігу розрахункових та візуальних параметрів повністю верифікує математичну точність і надійність побудованої цифрової імітаційної моделі перетворювача. Завдяки цій трирівневій архітектурі комутації транзистори замикають лише половину загальної напруги шини постійного струму, що кардинально знижує теплове виділення і продовжує життєвий цикл кремнієвих кристалів.

Саме через застосування описаного алгоритму моделювання вдалося всебічно оцінити продуктивність цілого аеродинамічного комплексу, обладнаного транзисторним модулем віденського типу.

На практиці безпечний коридор робочих коливань швидкості валу для таких генераторних систем налаштовується в межах приблизно $\pm 33\%$ від еталонного синхронного показника. Виділеного швидкісного резерву цілком вистачає для того, щоб інтелектуальна автоматика м'яко згладжувала будь-які природні флуктуації, пориви чи провали шквального вітру, не допускаючи механічних ударів по трансмісії.

Загальна розрахункова пропускна здатність напівпровідникового перетворювача прямолінійно вираховується через показник граничного електромеханічного ковзання, що у нашому випадку дорівнює $s = \pm 0,33$, помножений на паспортну генеруючу здатність нерухомої обмотки (статора) електричної машини.

Інтеграція силової електроніки з таким відносно малим номіналом (яка опрацьовує лише струми ротора) відкриває шлях до колосальної економії під час проектування. Інвестори отримують можливість суттєво оптимізувати фінансові витрати, а також мінімізувати вагу і просторові габарити обладнання, що монтується на верхівці щогли.

Співставляючи розроблену архітектуру із класичними застарілими установками жорстко фіксованої частоти, можна зробити однозначний висновок: впровадження імпульсних напівпровідникових схем радикально підвищує фінальний коефіцієнт корисної дії при конверсії енергії повітряної стихії в комерційну електроенергію.

						Ар.
						84

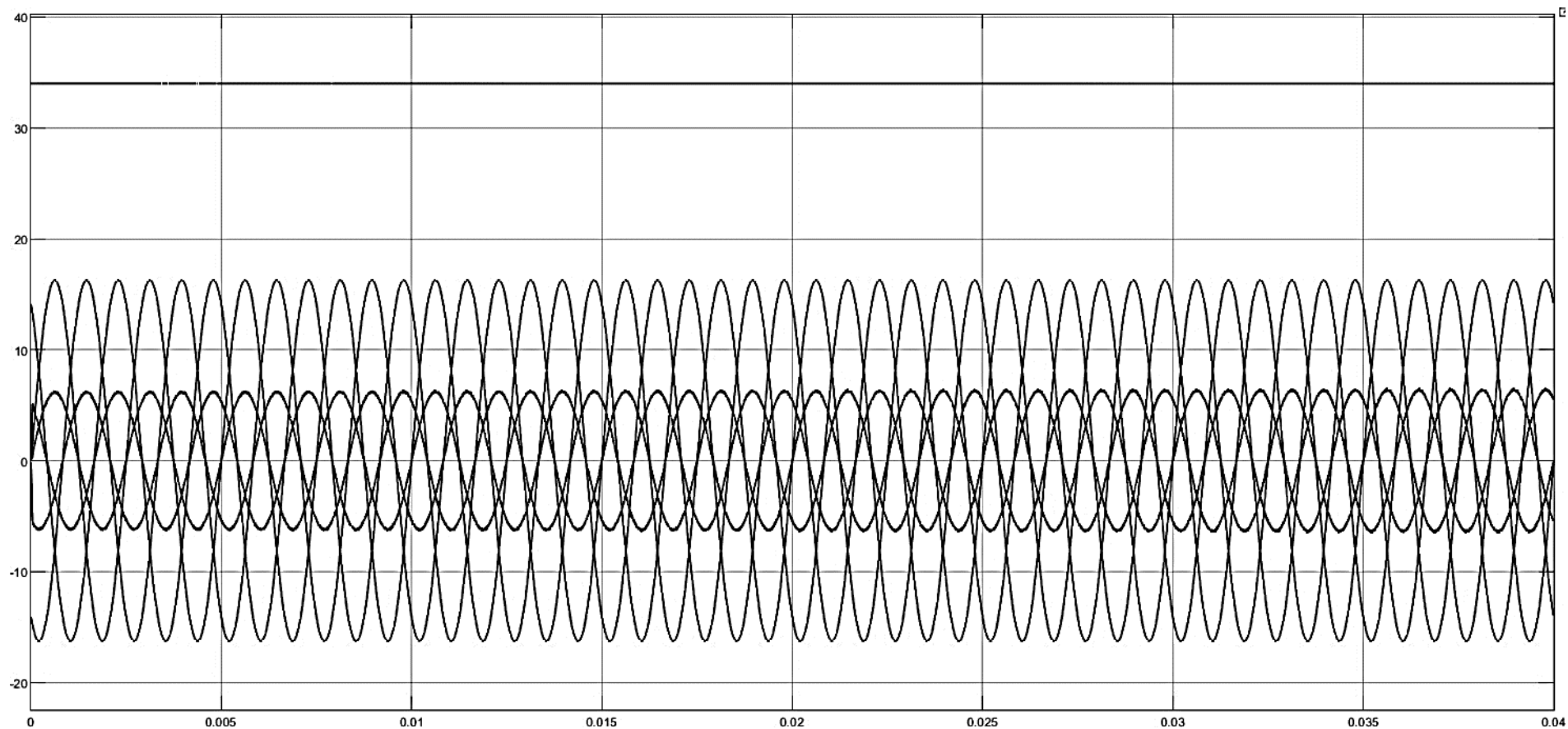


Рис. 7.6. Осцилографічні криві фазних струмів і напруг у роторному ланцюзі Віденського конвертера та фіксація рівня потенціалу у проміжній DC-ланці» струму

Завершення етапу комп'ютерного тестування віртуальної копії енергетичного комплексу дозволило отримати детальні часові розгортки. Ці графіки, що візуалізують ключові робочі характеристики генераторного агрегату, детально проілюстровані на рис. 7.7.

Аналіз верхнього графіка на рис. 7.7 дозволяє простежити динаміку коливань кутової швидкості обертового валу індукційної машини. Окрім цього, осцилограма фіксує процес генерування роторних струмів у трьох фазах. Примітно, що частотна характеристика цих сигналів демонструє прямо пропорційну залежність від темпу розгону механічної частини турбіни: чим швидше обертається пропелер, тим щільнішими стають хвилі на графіку.

Електрична енергія, що безпосередньо видається до магістральної лінії споживача, відзначається ідеально гладкою синусоїдною кривою. Її частота жорстко зафіксована цифровим контролером на рівні 50 Гц. Такий результат став можливим виключно завдяки інтеграції у схему керування транзисторного керованого випрямляча у зв'язці з надійним інвертором. Останній працює за алгоритмами високочастотної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), нарізаючи постійну напругу на тисячі імпульсів різної ширини, щоб після фільтрації сформувати ідеальну хвилю.

Здобуті під час віртуальних експериментів масиви даних слугують беззаперечним доказом абсолютної працездатності запропонованої концепції. Вони повністю верифікують високу математичну точність розробленої логіки та загальну адекватність імітаційної платформи аеродинамічного комплексу, оснащеного напівпровідниковим конвертером.

Використовуючи потужний інструментарій програмного симулятора, виконаний глибокий спектральний розбір струму на нерухомій обмотці (статорі). Збір даних тривав протягом 5 робочих періодів обладнання. Зафіксований електричний сигнал зберіг правильну синусоїдальну структуру, при цьому загальний індекс нелінійних спотворень (параметр THD) зупинився на позначці лише 2,7%. Це надзвичайно важливий показник, оскільки перевищення цього ліміту призводить до перегріву трансформаторних підстанцій та перевантаження

нульових провідників у мережі. Отримане значення із великим запасом вписується у жорсткі нормативи міжнародних стандартів IEEE, які зазвичай вимагають утримувати THD на рівні нижче 5%.

Деталізоване вивчення гармонічного спектра охоплювало величезний частотний діапазон аж до 40-ї кратної складової включно. Це дозволило виявити навіть мікроскопічні високочастотні шуми, спричинені перемиканням силових транзисторів, і довести ефективність встановлених LC-фільтрів. Візуалізація цього спектрального розрізу наведена на відповідній діаграмі на рис. 7.8.

Підсумовуючи результати вивчення спектральної чистоти та геометричної правильності вихідного сигналу, варто зробити фундаментальний висновок. Спроектована інфраструктура відновлюваної генерації, доповнена інтелектуальним частотним перетворювачем віденського типу, спроможна постачати магістральним операторам електрику преміальної якості. Електроніка успішно компенсує будь-яку атмосферну турбулентність, гарантуючи абсолютно стабільне та безпечне енергопостачання.

На рис. 7.9 візуалізовано здобуті шляхом комп'ютерних обчислень показники струмового навантаження безпосередньо в рухомих обмотках генератора. Реєстрація цих електромагнітних параметрів здійснювалася безперервно впродовж одного повного коливального циклу. Поряд із відображенням самої форми сигналу, отримано розгорнуту картину його спектрального складу.

Варто наголосити, що ретельний контроль паразитних частот саме у цьому контурі є вкрай важливою інженерною задачею. Надлишок високочастотних спотворень на роторі неминуче викликає шкідливі мікропульсації крутного моменту на валу та провокує зайве теплове перевантаження транзисторів інвертора, тому їхній рівень має бути мінімальним.

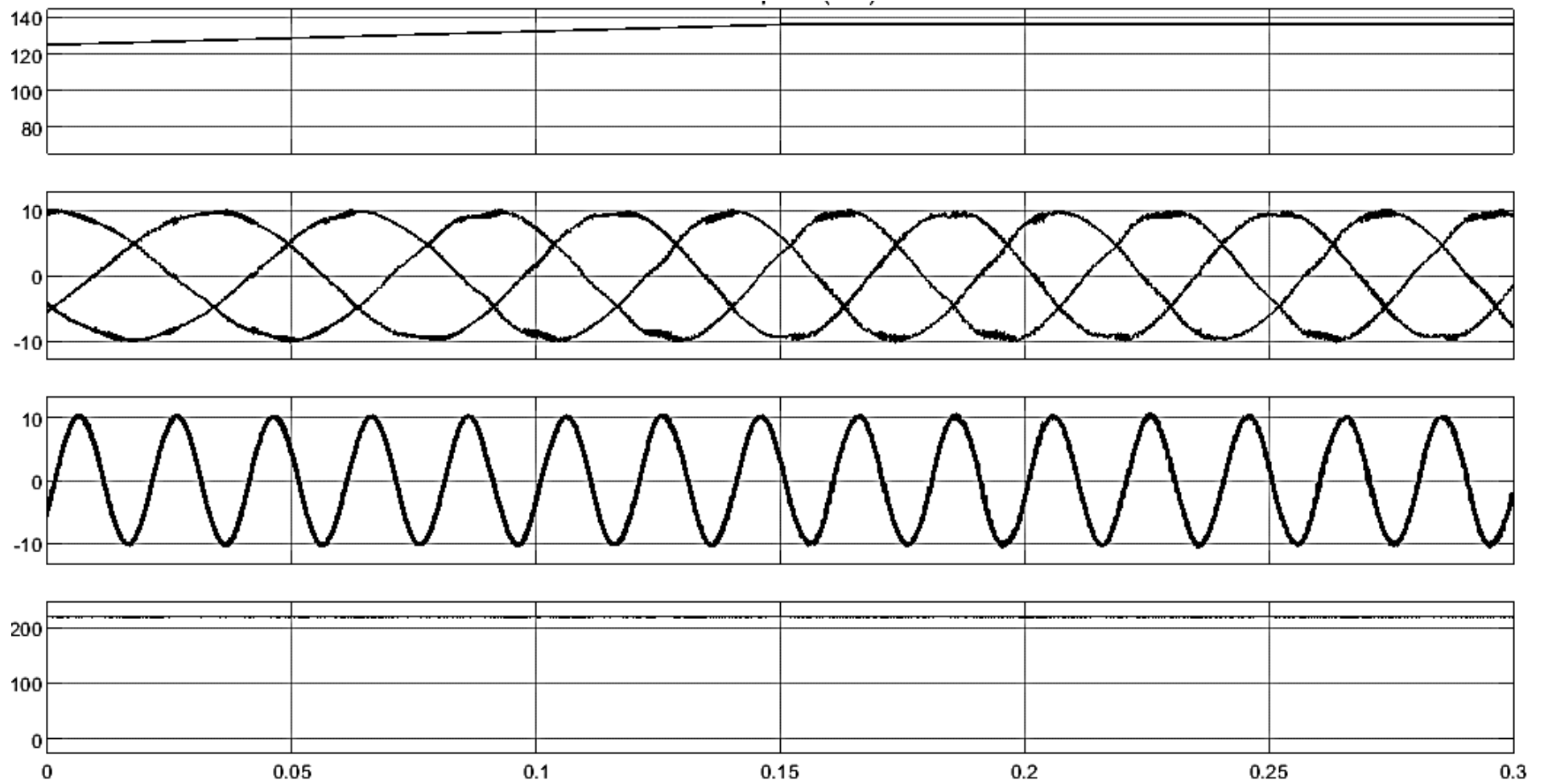
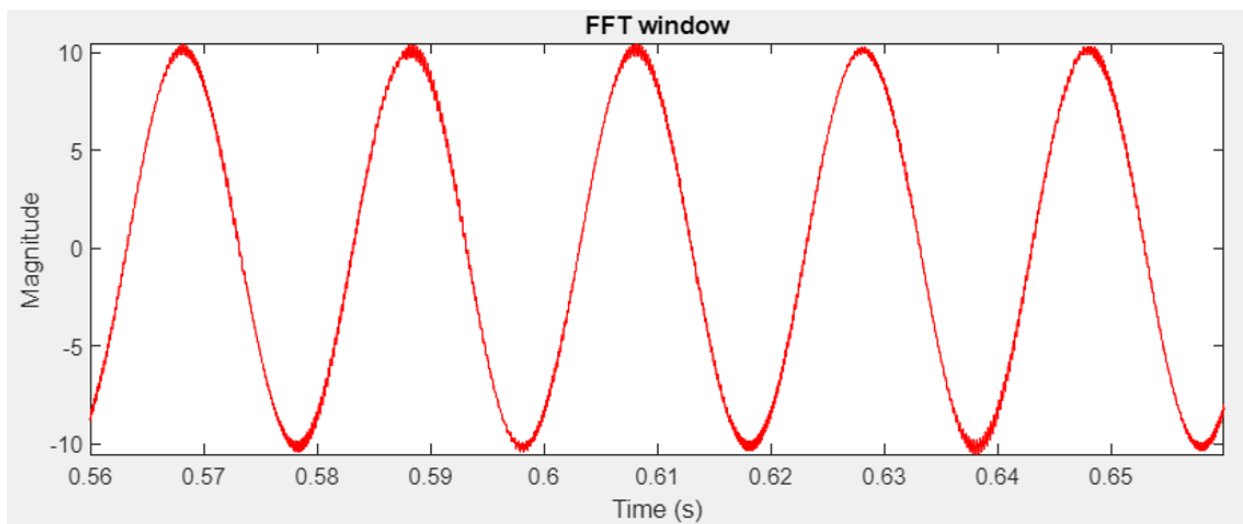
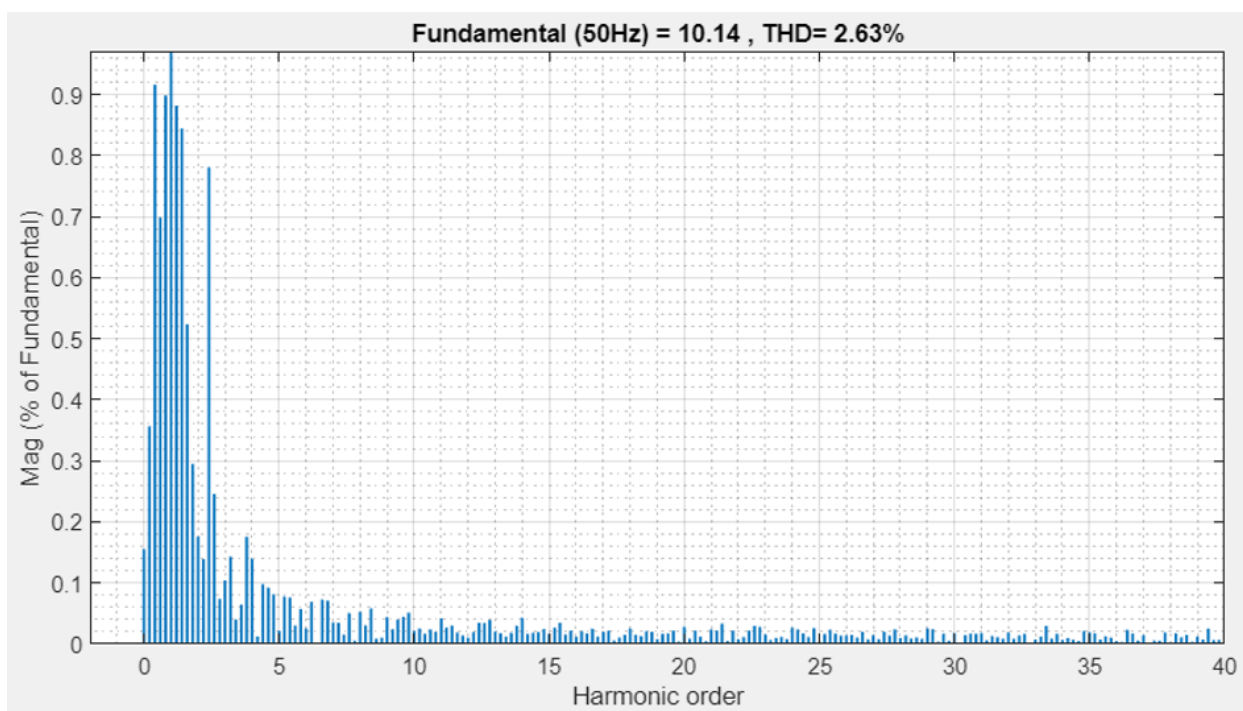


Рис. 7.7. Часові осцилограми ключових робочих параметрів аеродинамічної генераторної установки



a)



б)

Рис. 7.8. Спектрограма та аналіз нелінійних викривлень статорного струму за 5 вимірювальних циклів

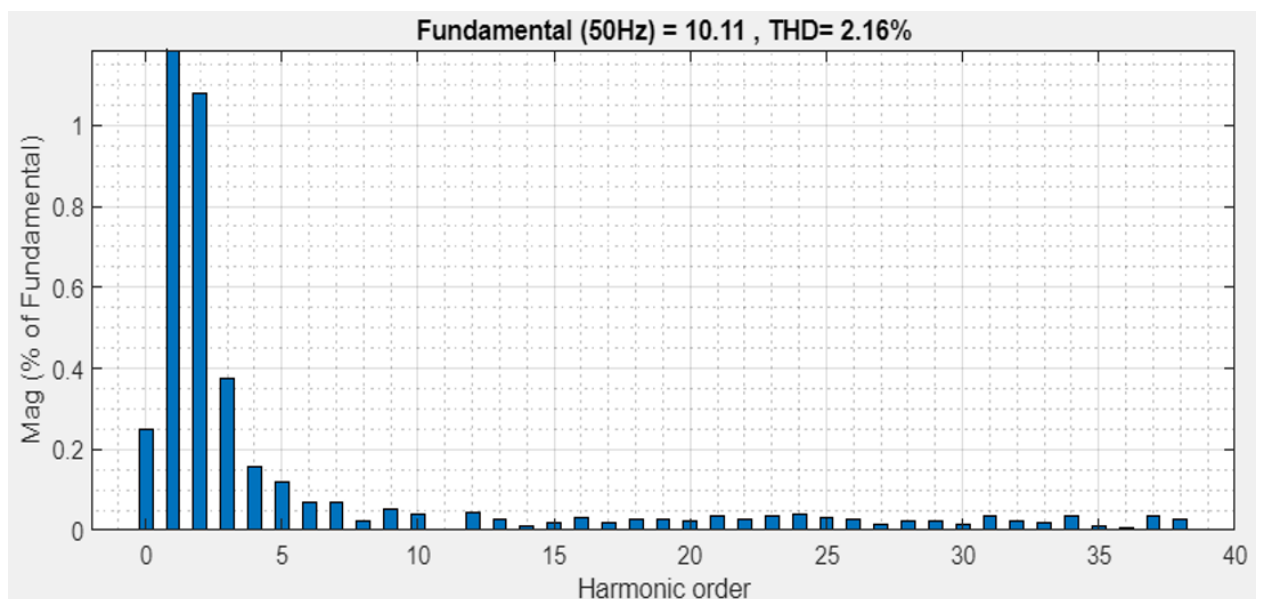
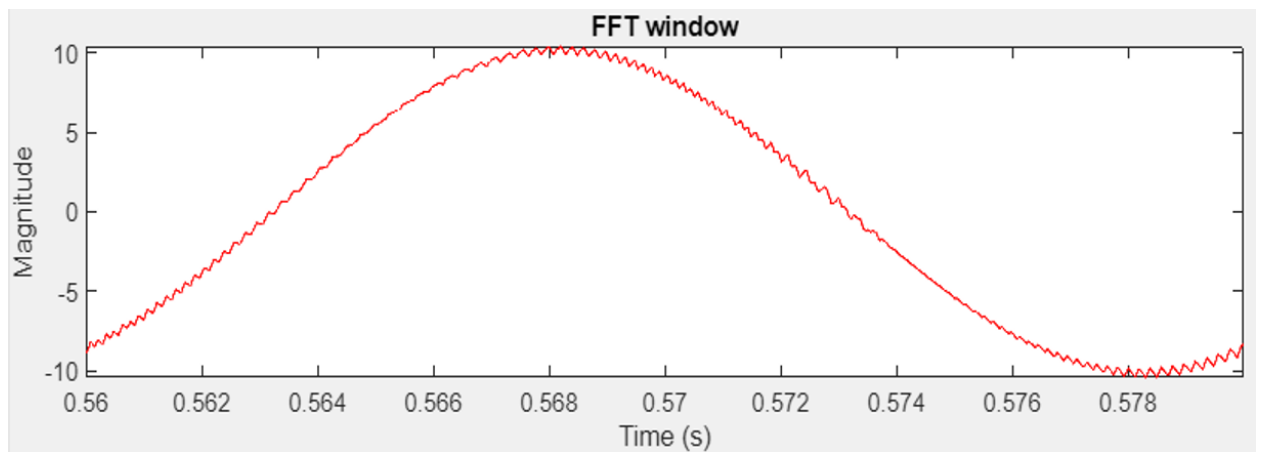
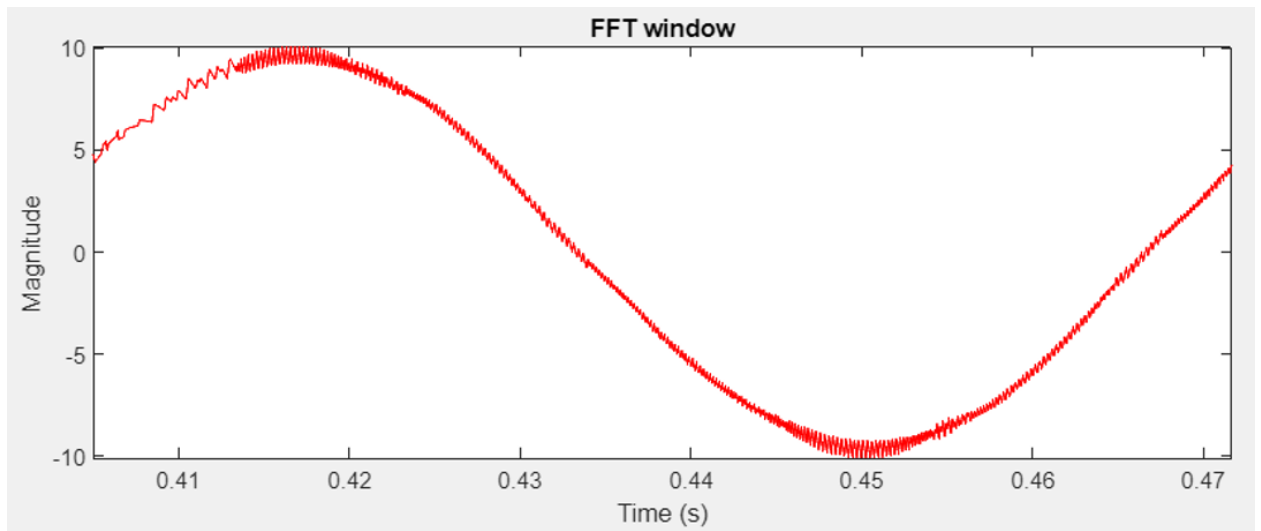
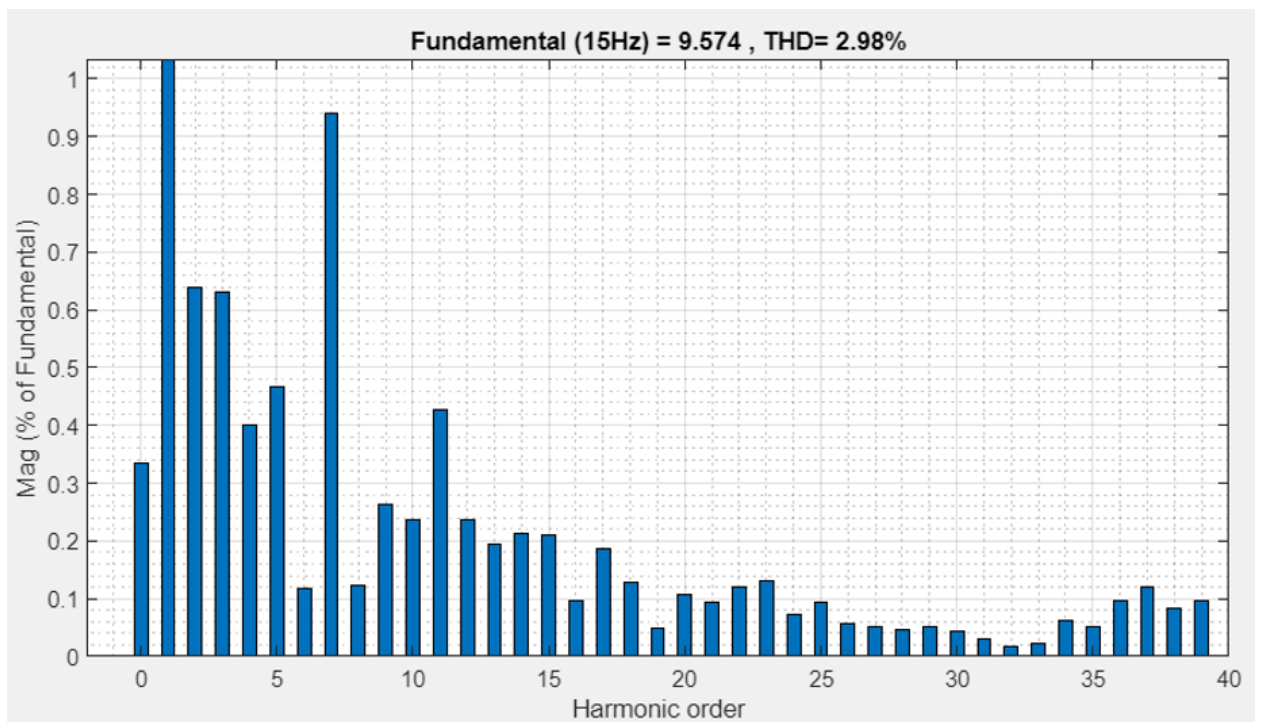


Рис. 7.9. Осцилографічний запис струму в роторному ланцюзі та розгорнутий аналіз його спектральних компонентів за одиничний проміжок часу

На рис. 7.10 зображено отриману на комп'ютерній імітаційній моделі осцилограму струму ротора асинхронного генератора та відповідний спектр гармонік на одному періоді коливання. Видно, що при зміні швидкості обертання ротора відбувається зсув частоти струму відносно основної гармоніки.



a)



б)

Рис. 7.10. Осцилографічне відображення та гармонічний розбір струмових показників роторного ланцюга за одиничний часовий цикл

Рис. 7.10. детально демонструє результати роботи віртуального стенду, фіксуючи часову розгортку струму в рухомому контурі індукційної машини. Ця осцилограма додатково супроводжується глибоким аналізом спектральних складових сигналу.

Аналіз приведених осцилограм дозволяє зафіксувати специфічне фізичне явище міграції частотної характеристики. Щойно механічний темп обертання головного валу зазнає найменших флуктуацій через пориви вітру, пульсація генерованого струму негайно відхиляється від своєї базової (основної) гармоніки.

З інженерної точки зору цей процес є абсолютно закономірним для генераторних комплексів подвійного живлення. Електрична частота всередині роторного ланцюга має пряму математичну залежність від величини поточного електромеханічного ковзання. Коли натиск повітряних мас посилюється і турбіна пришвидшується, силова автоматика інвертора миттєво перераховує та підлаштовує параметри намагнічування. Саме ця безперервна адаптація і викликає видимий на спектрограмі частотний зсув. Завдяки такому гнучкому та миттєвому підстроюванню транзисторів, фінальна напруга, що знімається зі статора та відправляється до загальної електромережі, залишається ідеально стабільною.

Таким чином було виконане комплексне дослідження розвитку, аеродинамічних принципів функціонування та систем автоматичного керування вітроелектричними установками. На основі теоретичного аналізу та цифрового моделювання силової електроніки отримано такі ключові результати.

Показано, що використання класичної горизонтально-осьової архітектури з трьома лопатями та алгоритмами змінної частоти обертання забезпечує найвищий коефіцієнт утилізації кінетики повітряних мас. Утримання розрахункового показника швидкохідності турбіни у вузькому діапазоні 6–8 дозволяє станції гнучко адаптуватися до атмосферної турбулентності. Відмова від жорсткої фіксації обертів ротора гарантує приріст загального виробітку енергії на 0,2–0,3 в.о. порівняно зі статичними системами.

Обґрунтовано доцільність застосування асинхронної машини подвійного живлення МПЖ для вітрогенераторів комерційного класу. Завдяки двоконтурній топології з'являється можливість керувати гіпосинхронними та гіперсинхронними режимами через електронний інвертор, пропускну здатність якого становить 25–30% від загального номіналу станції. Це радикально знижує масу гондоли,

мінімізує теплові комутаційні втрати транзисторів та кардинально здешевлює капітальний кошторис об'єкта.

Визначено, що сучасна синергія пасивного аеродинамічного саморегулювання (ефект зриву потоку) та активного цифрового пітч-контролю є критично необхідною. Разом із резервними дисковими гальмами та механізмами флюгерування ці системи гарантують збереження цілісності вежі та лопатей під час критичних штормових навантажень зі швидкістю понад 25 м/с.

У програмному середовищі комп'ютерної математики MATLAB (з використанням бібліотек Simulink/SimPowerSystems) успішно розроблено віртуальну копію інтелектуального частотного конвертера, побудованого на базі віденського випрямляча. Згенеровані осцилограми беззаперечно підтвердили миттєву та безпомилкову реакцію напівпровідникових ключів на мінливу швидкість обертання валу, зберігаючи сталу напругу в проміжній конденсаторній DC-ланці.

Спектральний розбір статорного струму, проведений протягом 5 вимірювальних тактів, зафіксував формування ідеально гладкої синусоїдної хвилі. Інтеграція алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) у зв'язці з вихідними LC-фільтрами дозволила зменшити загальний коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) до феноменального рівня у 2,7%. Зазначений показник із великим запасом відповідає жорстким міжнародним нормативам електромагнітної сумісності мереж.

Таким чином, результати дослідження та комп'ютерної симуляції повністю підтверджують технічну доцільність, енергетичну ефективність та експлуатаційну надійність запропонованої архітектури керування вітроелектричною установкою.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішувалося завдання щодо проектування електропостачальної системи для промислового об'єкта текстильного профілю.

Здійснені детальні обчислення електричних навантажень промислового об'єкта, визначення основних параметрів графіків споживання електроенергії, аналіз режимів реактивної потужності та дослідження параметрів короткого замикання в електричній мережі створили надійну основу для обґрунтованого вибору компонентів високовольтної електричної системи підприємства. Розроблена в результаті комплексних досліджень система електропостачання повністю задовольняє ключові технічні вимоги сучасного виробництва, зокрема забезпечує високий рівень надійності функціонування, необхідну експлуатаційну гнучкість та ефективну ремонтпридатність обладнання.

На основі проведених теоретичних досліджень доведено високу енергетичну та економічну ефективність застосування асинхронних генераторів подвійного живлення у структурі сучасних вітроелектричних комплексів із варіативною швидкістю ротора. Використання роторного напівпровідникового конвертера, масштабованого лише під 26–31% номінальної потужності системи, дозволило мінімізувати вагу і габарити обладнання при одночасному розширенні швидкісного коридору експлуатації. Розроблена в середовищі MATLAB/Simulink комп'ютерна модель повністю верифікувала працездатність частотного перетворювача на основі Віденської топології випрямляча за умов інтенсивних атмосферних збурень. Проведений спектральний аналіз згенерованого струму підтвердив бездоганну якість вихідної напруги із показником сумарного коефіцієнта нелінійних викривлень (THD) на рівні 2,71%, що цілком задовольняє жорсткі критерії сучасних стандартів електромагнітної сумісності мереж.

						Ар.
						94

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.