

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У СКЛАДІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
СТАНЦІЙ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ
ПІДПРИЄМСТВ

Виконав: здобувач групи ЕЕМ-23ск

Олександр КАБАНОВ

Керівник випускної роботи _____ д-р ф-ї, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Нормоконтролер _____ д-р ф-ї, ст. викладач Олег ДОЗОРЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Кабанова Олександра Олександровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз та оптимізація режимів функціонування вітроенергетичних установок у складі вітроенергетичних станцій в електроенергетичних мережах промислових підприємств

2. Строк подання студентом роботи 11 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Мета роботи – аналіз та оптимізація режимів функціонування вітроенергетичних установок у складі вітроенергетичних станцій в електроенергетичних мережах промислових підприємств. Завдання кваліфікаційної роботи: проаналізувати актуальний стан розвитку вітроенергетики України та перспективи впровадження ВЕС у системи електропостачання промислових підприємств; дослідити застосування автономних джерел генерації електричної енергії та режими роботи ВЕУ; проаналізувати методи керування ВЕУ з урахуванням зміни швидкості вітру, кута встановлення лопатей, навантаження та ємності збудження генератора; обґрунтувати вибір генератора для ВЕУ; розробити модель ВЕУ з асинхронним генератором із ємнісним збудженням; дослідити режими роботи одиначної ВЕУ та автономної ВЕС із паралельно працюючими установками; проаналізувати пускові режими, автоколивання частоти та визначити шляхи оптимізації режимів роботи системи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

1. Актуальний стан розвитку вітроенергетики України та перспективи впровадження ВЕС у промислових мережах; 2. Застосування автономних джерел генерації електроенергії в системах електропостачання промислових підприємств; 3. Аналіз режимів роботи ВЕУ; 4. Аналіз методів керування ВЕУ у складі ВЕС; 5. Обґрунтування вибору генератора для ВЕУ; 6. Розробка моделі ВЕУ з асинхронним генератором із ємнісним збудженням; 7. Моделні дослідження режимів роботи одиначної ВЕУ та автономної ВЕС із паралельно працюючими установками; 8. Аналіз пускових режимів, автоколивань частоти та шляхів оптимізації роботи ВЕС.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Узагальнена схема інтеграції ВЕС у систему електропостачання промислового підприємства; 2. Порівняльна характеристика режимів роботи вітроенергетичних установок; 3. Узагальнена структура збурюючих і керуючих впливів на ВЕУ; 4. Функціональна схема автономної ВЕУ з АГ; 5. Структура моделі ВЕУ у складі ВЕС; 6. Структура моделі автономної ВЕС з 8 ВЕУ; 7. Дослідження пуску вітроенергетичної установки в складі автономної вітроенергетичної станції; 8. Автоколивання частоти в автономній системі вітроенергетичної станції.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Дозоренко О.В.		
II	Дозоренко О.В.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Аналіз стану розвитку вітроенергетики України та перспектив впровадження ВЕС у системи електропостачання промислових підприємств	21 травня 2026 р.
2	Дослідження застосування автономних джерел генерації електроенергії та режимів роботи вітроенергетичних установок	24 травня 2026 р.
3	Аналіз методів керування ВЕУ з урахуванням зміни швидкості вітру, кута встановлення лопатей, навантаження та смності збудження генератора	28 травня 2026 р.
4	Обґрунтування вибору генератора для ВЕУ та розробка моделі установки з асинхронним генератором із ємнісним збудженням	31 травня 2026 р.
5	Проведення модельних досліджень режимів роботи одиначної вітроенергетичної установки	3 червня 2026 р.
6	Розробка моделі автономної ВЕС із паралельно працюючими ВЕУ та дослідження пускових і перехідних режимів	6 червня 2026 р.
7	Аналіз результатів моделювання, визначення шляхів оптимізації режимів роботи ВЕУ та оформлення пояснювальної записки	10 червня 2026 р.

Дата видачі завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олександр КАБАНОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег ДОЗОРЕНКО
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз та оптимізація режимів функціонування вітроенергетичних установок у складі вітроенергетичних станцій в електроенергетичних мережах промислових підприємств» містить: 58 с., 21 рис., 7 табл., 30 літературних джерел.

Робота присвячена аналізу та оптимізації режимів функціонування вітроенергетичних установок у складі вітроенергетичних станцій, інтегрованих в електроенергетичні мережі промислових підприємств. Основну увагу приділено дослідженню впливу швидкості вітру, навантаження, кута встановлення лопатей та ємності збудження генератора на стабільність напруги, частоти й режимів роботи вітроенергетичних установок.

Об'єкт дослідження – режими роботи вітроенергетичних установок у складі вітроенергетичних станцій, інтегрованих в електроенергетичні мережі промислових підприємств.

Мета роботи – аналіз та оптимізація режимів функціонування вітроенергетичних установок у складі вітроенергетичних станцій в електроенергетичних мережах промислових підприємств.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для обґрунтування впровадження та оптимізації режимів роботи вітроенергетичних установок у локальних і автономних системах електропостачання промислових підприємств. Результати моделювання можуть бути застосовані під час вибору способів стабілізації напруги й частоти, керування кутом встановлення лопатей, коригування ємності збудження генератора та організації стійкої паралельної роботи декількох вітроенергетичних установок у складі вітроенергетичних станцій.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.Р				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробив		Кабанов О.О.					5	2	
Перевірів		Дозсренко О.В.							
Н. Контр.		Дозсренко О.В.							
Затвердж.		Пересунько І.І.			КНУ гр. ЕЕМ-23ск				

У першому розділі розглянуто актуальний стан розвитку вітроенергетики України та перспективи впровадження вітроенергетичних станцій у практику роботи промислових підприємств. Проаналізовано доцільність застосування автономних джерел генерації електроенергії в системах електропостачання гірничорудних підприємств, основні режими роботи вітроенергетичних установок, а також методи керування ними у складі вітроенергетичних станцій.

У другому розділі виконано аналіз вибору генератора для вітроенергетичної установки. Розглянуто модель вітроенергетичної установки з асинхронним генератором із ємнісним збудженням, досліджено вплив зміни швидкості вітру, кута встановлення лопатей, навантаження та ємності збудження на параметри роботи установки. Розроблено модель автономної вітроенергетичної станції з паралельною роботою восьми вітроенергетичних установок. Проведено аналіз пускових режимів вітроенергетичних установок та автоколивань частоти в автономній системі.

У висновках приведено аналіз проведеної роботи та отримані відповідні очікувані результати.

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА МЕРЕЖА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПРОМИСЛОВІ ПІДПРИЄМСТВА

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.Р	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ У СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ НИМИ	9
1.1 Актуальний стан розвитку та перспективи впровадження вітроенергетичних станцій у промислові системи електропостачання України.....	9
1.2 Застосування автономних джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств.....	13
1.3 Аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок в системах електропостачання промислових підприємств	20
1.4 Аналіз методів керування вітроенергетичними установками у складі вітроенергетичних станцій.....	22
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У СКЛАДІ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	30
2.1 Загальні питання вибору генератора для вітроенергетичної установки.....	30
2.2 Розробка моделі вітроенергетичної установки з асинхронним генератором із ємнісним збудженням.....	32
2.3 Розробка моделі автономної вітроенергетичної станції з паралельно працюючими вітроенергетичними установками.....	39
2.4 Дослідження пускових режимів вітроенергетичної установки у складі автономної вітроенергетичної станції.....	44
2.5 Аналіз автоколивань частоти в автономній вітроенергетичній станції.....	51
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.3						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст			Літ.	Арк.	Аркушів	
Розробив		Кабанов О.О.									
Перевірів		Дозсренко О.В.							7	1	
								КНУ гр. ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Дозсренко О.В.									
Затвердж.		Пересунько І.І.									

ВСТУП

Електроенергетичні мережі промислових підприємств характеризуються значними рівнями споживання електричної енергії (ЕЕ), нерівномірними графіками навантаження та підвищеними вимогами до надійності електропостачання [1–2]. Особливо це стосується гірничорудних і гірничо-металургійних підприємств, у структурі яких функціонують потужні електроприводи, насосні, вентиляційні, компресорні та транспортні установки.

Значна територіальна розосередженість окремих технологічних об'єктів, зокрема кар'єрів, відвалів, шламосховищ і допоміжних виробничих ділянок, призводить до збільшення протяжності електричних мереж, зростання втрат ЕЕ та ускладнення забезпечення стабільних режимів електропостачання.

Одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності та енергетичної стійкості таких підприємств є використання автономних і локальних джерел генерації ЕЕ, зокрема вітроенергетичних установок (ВЕУ) [1, 3]. В умовах промислових підприємств ВЕУ можуть застосовуватися для часткового покриття власного навантаження, зменшення залежності від централізованої мережі та підвищення надійності живлення віддалених споживачів.

Водночас ефективне впровадження вітроенергетичних станцій (ВЕС) потребує детального аналізу їх режимів роботи. Змінність швидкості вітрового потоку, коливання навантаження, необхідність регулювання кута встановлення лопатей і параметрів збудження генератора визначають складний характер електромеханічних процесів у ВЕУ. Тому актуальним завданням є дослідження та оптимізація режимів функціонування ВЕУ у складі ВЕС, інтегрованих у мережі промислових підприємств.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.ВС		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Кабанов О.О.			Вступ	Літ.	Арк.
Перевірів		Доззренко О.В.					8
						КНУ	
Н. Контр.		Доззренко О.В.				гр. ЕЕМ-23ск	
Затвердж.		Пересунько І.І.					

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ У СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ НИМИ

1.1 Актуальний стан розвитку та перспективи впровадження вітроенергетичних станцій у промислові системи електропостачання України

Актуальність упровадження ВЕС у практику роботи промислових підприємств України визначається одночасною дією енергетичних, економічних і безпекових чинників [4].

Українська промисловість традиційно належить до енергоємних секторів: гірничо-металургійні комбінати, машинобудівні, цементні, хімічні та агропереробні підприємства формують значні електричні навантаження, часто з нерівномірними добовими графіками, високою часткою електроприводів, компресорних установок, насосних станцій, вентиляторів і електротермічних агрегатів. За таких умов власна або договірно закріплена вітрова генерація може розглядатися не лише як екологічний проект, а як елемент підвищення енергетичної стійкості, зменшення залежності від централізованого електропостачання та довгострокового управління собівартістю продукції.

До початку повномасштабної війни Україна мала сформований сектор промислової вітроенергетики, сконцентрований переважно у південних і південно-східних регіонах, де поєднувалися сприятливі вітрові умови, доступність земельних ділянок і можливість приєднання до мереж [5]. Однак саме значна частина таких територій стала зоною бойових дій або тимчасової окупації. Тому фактичний стан галузі сьогодні необхідно оцінювати обережно: статистична встановлена потужність не завжди дорівнює потужності, реально

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Кабанов О.О.				Розділ 1				
Перевірів	Дозсренко О.В.								
Н. Контр.	Дозсренко О.В.								
Затвердж.	Пересунько І.І.								
					Літ.	Арк.	Акрушів		
						9	21		
					КНУ гр. ЕЕМ-23ск				

доступний для енергосистеми. За оглядом Української вітроенергетичної асоціації, у 2024 році було введено 20,6 МВт нових вітрових потужностей, а сумарна встановлена потужність галузі становила 1921,4 МВт з урахуванням об'єктів на тимчасово окупованих територіях [6]. Водночас у 2025 році сектор продемонстрував помітне відновлення: повідомлялося про введення 324,4 МВт нових потужностей, а загальна встановлена потужність вітроенергетики досягла близько 2,2 ГВт, з яких орієнтовно 1,3 ГВт залишаються на тимчасово окупованих територіях [5].

Особливість українського етапу розвитку ВЕС полягає у зміні логіки їх використання. Якщо раніше основний акцент робився на продажі ЕЕ за «зеленим» тарифом або за підтримувальними механізмами, то нині дедалі важливішими стають корпоративні моделі: прямі договори купівлі-продажу ЕЕ, власні електростанції промислових підприємств, гібридні схеми «ВЕС - сонячна електростанція - накопичувач - мережа підприємства», а також участь у балансуванні та зменшенні дефіциту потужності [7]. Для промислового споживача це означає можливість частково замінити куповану ЕЕ, стабілізувати витрати в горизонті життєвого циклу обладнання, а також підтвердити нижчий вуглецевий слід продукції, що є важливим для експорту до країн ЄС.

Технічно впровадження ВЕС у мережі промислових підприємств має низку переваг [1, 3]. По-перше, великі підприємства зазвичай мають власні розподільчі мережі 6, 10, 35 або 110 кВ, що спрощує організацію точки приєднання порівняно з дрібними споживачами. По-друге, промислове навантаження часто є достатньо потужним, щоб локально споживати значну частину виробітку ВЕС без надмірного зворотного перетікання в зовнішню мережу. По-третє, наявність диспетчеризації, автоматизованих систем комерційного обліку та енергоменеджменту створює передумови для оптимізації режимів роботи ВЕУ, електроприймачів і компенсувальних пристроїв.

Таблиця 1.1 – Узагальнення передумов, переваг і проблем впровадження ВЕС у промислових мережах України

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напрямок аналізу	Позитивний ефект для підприємства	Основні обмеження
Енергетична стійкість	Часткове покриття власного навантаження, зменшення залежності від аварійних відключень	Змінність виробітку, потреба у прогнозуванні та резервуванні
Економіка електроспоживання	Зниження закупівель ЕЕ у пікові періоди, стабілізація витрат	Висока капітальна вартість, фінансові та воєнні ризики
Якість ЕЕ	Можливість керування реактивною потужністю сучасними перетворювачами	Коливання напруги, флікери, гармоніки, вимоги до РЗА
Декарбонізація виробництва	Зменшення вуглецевого сліду продукції та покращення експортної привабливості	Потреба у підтвердженні походження ЕЕ та прозорих корпоративних договорах
Розвиток локальних енергосистем	Поєднання ВЕС, СНЕ, керованого навантаження та мережі підприємства	Необхідність техніко-економічного моделювання режимів

Разом із тим, інтеграція вітрової генерації у промислові електромережі не є суто інвестиційним питанням. ВЕС мають змінний характер генерації, тому в мережах підприємств можуть виникати коливання напруги, флікери, зміна поточкорозподілу, ускладнення режимів реактивної потужності, а також нові вимоги до релейного захисту й автоматики [8–9].

Особливо важливим є аналіз режимів при мінімальному навантаженні підприємства, аварійному відключенні секцій шин, роботі компенсувальних установок, пуску потужних електродвигунів та обмеженні видачі активної потужності ВЕС. Це формує практично значуще поле дослідження: оцінка режимів напруги, втрат потужності, рівнів короткого замикання, пропускної здатності кабельних і повітряних ліній, а також доцільності встановлення систем накопичення енергії.

Безпековий контекст додатково підсилює перспективність вітрової генерації для промисловості України. Після масованих атак на енергетичну інфраструктуру країна зіткнулася з дефіцитом маневрової та резервної потужності, аварійними відключеннями й необхідністю імпорту ЕЕ. Урядовий план розвитку відновлюваної енергетики передбачає близько 20 млрд доларів

інвестицій, доведення частки ВДЕ до 27 % в енергетичному балансі до 2030 року та введення приблизно 10 ГВт нових генерувальних потужностей [10]. Для промислових підприємств це означає, що ВЕС можуть стати складовою не тільки декарбонізації, а й децентралізації енергозабезпечення, коли частина критичних виробничих процесів підтримується локальними джерелами.

Показовим прикладом збереження інвестиційного інтересу є проєкт розширення Тилігульської ВЕС у Миколаївській області: ДТЕК заявляв про інвестиції близько 450 млн євро для збільшення потужності станції зі 114 до 500 МВт, із залученням турбін Vestas та фінансуванням за участі данського експортно-інвестиційного фонду [11]. Хоча цей об'єкт не є станцією окремого промислового підприємства, він демонструє важливу тенденцію: навіть в умовах воєнних ризиків великі ВЕС розглядаються як реальний напрям відновлення енергетичної інфраструктури.

Додатково перспективним є поєднання ВЕС із системами накопичення енергії. Зокрема, ДТЕК оголошував про закупівлю систем накопичення сумарною потужністю 200 МВт для підвищення надійності електропостачання та швидшого відновлення після відключень [12]. Для промислових підприємств подібний підхід може застосовуватися у меншому масштабі: накопичувачі дозволяють згладжувати нерівномірність генерації, підтримувати напругу, обмежувати пікове споживання та забезпечувати резерв для відповідальних електроприймачів [13].

Перспективи впровадження ВЕС у промисловості України найбільш реалістичні для підприємств, розташованих у регіонах із достатнім вітровим потенціалом і відносно стійкою мережевою інфраструктурою: південь, захід, центр, окремі промислові вузли з відкритими майданчиками та доступом до мереж 35-110 кВ [14–15]. Найдоцільнішими є не ізольовані технічні рішення, а комплексні енергетичні схеми, у яких ВЕС працює спільно з електричною мережею підприємства, системою прогнозування генерації, автоматизованим керуванням навантаженням, компенсацією реактивної потужності та, за потреби, батареєм накопичувачем.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремо слід враховувати, що промислове застосування ВЕС в Україні буде ефективним лише за умови переходу від спрощеного підходу «встановити генератор і приєднати до шин» до повноцінного режимного проектування. На етапі техніко-економічного обґрунтування необхідно зіставляти погодинні профілі вітрової генерації з графіками активного і реактивного навантаження підприємства, визначати частку самоспоживання, можливі обмеження видачі потужності та економічний ефект від зменшення втрат у внутрішній мережі. Для великих підприємств також доцільно оцінювати сценарії участі у попит-керуванні, використання гнучких технологічних процесів у періоди високої генерації та встановлення автоматизованих систем керування, які координують роботу ВЕС, трансформаторних підстанцій, компенсувальних пристроїв і відповідальних електроприймачів.

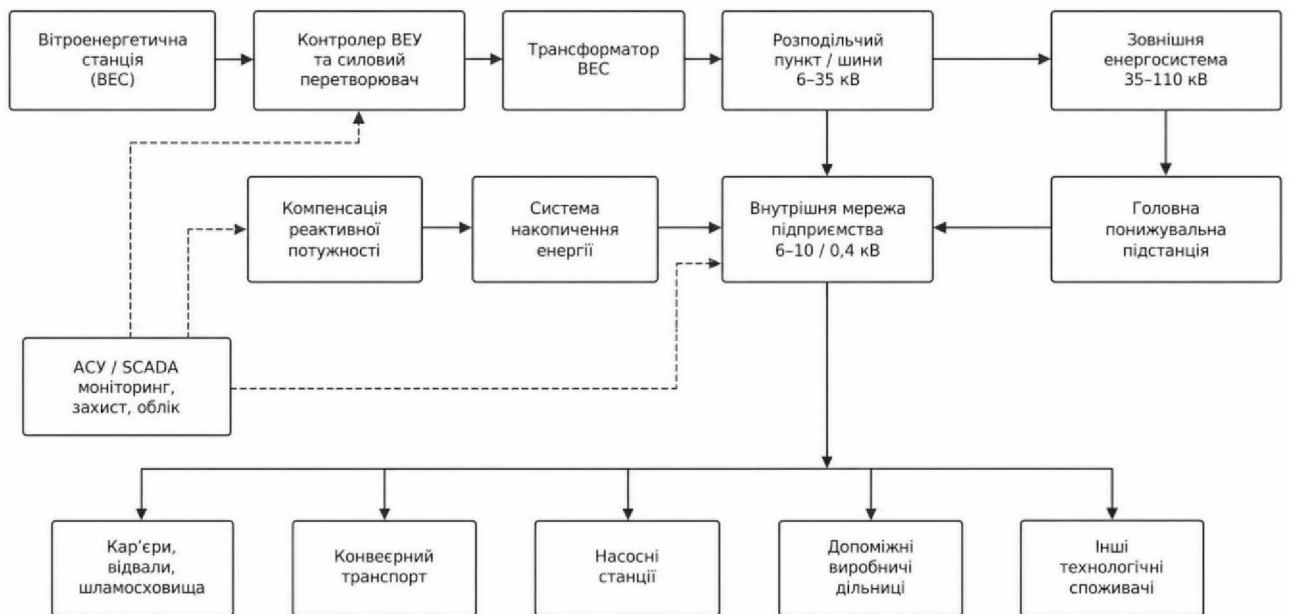


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема інтеграції ВЕС у систему електропостачання промислового підприємства

Отже, актуальний стан української вітроенергетики можна охарактеризувати як етап відновлення після різкого воєнного спаду, з поступовим переходом від класичної моделі «генерація для продажу» до моделі «генерація як елемент енергетичної стійкості споживача» [1, 7]. Для промислових підприємств ВЕС мають перспективу як інструмент зниження

енергетичних витрат, підвищення надійності електропостачання, виконання екологічних вимог і зменшення залежності від зовнішніх ризиків. Водночас їх ефективне впровадження потребує попереднього режимного аналізу, оцінки якості ЕЕ, вибору оптимальної точки приєднання, перевірки релейного захисту та розрахунку економічної доцільності. Саме тому тема аналізу та оптимізації режимів функціонування ВЕУ у складі ВЕС у мережах промислових підприємств України є актуальною.

1.2 Застосування автономних джерел генерації електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств

Промислові підприємства, особливо підприємства гірничо-збагачувального та гірничо-металургійного комплексів, належать до споживачів із високим рівнем електричного навантаження, складною структурою електроприймачів і значною територіальною розосередженістю виробничих об'єктів. До їх складу входять головні виробничі корпуси, дробарно-збагачувальні фабрики, насосні станції, компресорні установки, конвеєрний транспорт, кар'єри, відвали пустих порід, шламосховища та допоміжні технологічні дільниці. Частина таких споживачів розміщується на значній відстані від головних понижувальних підстанцій, що призводить до збільшення протяжності кабельних і повітряних ліній, зростання втрат ЕЕ, ускладнення підтримання допустимих рівнів напруги та підвищення експлуатаційних витрат [16–17].

У таких умовах застосування автономних або локальних джерел генерації ЕЕ є одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності та надійності електропостачання промислових підприємств. Під автономним джерелом генерації в цьому випадку доцільно розуміти електрогенеруючу установку або комплекс установок, які можуть забезпечувати живлення окремих технологічних споживачів без постійної залежності від централізованої мережі або працювати паралельно з нею в локальному режимі. До таких джерел

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

належать дизельні та газові електростанції, сонячні електростанції, ВЕУ, малі гідроенергетичні установки, а також гібридні системи з накопичувачами енергії.

Для умов гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) особливий інтерес становлять відновлювані джерела енергії, оскільки вони дозволяють не лише частково покрити власне електроспоживання, а й зменшити залежність від зовнішніх постачальників ЕЕ. Аналіз структури споживання ЕЕ типовими ГЗК показує, що окремі технологічні підрозділи мають різну частку в загальному електроспоживанні підприємства.

Це підтверджується діаграмою на рис. 1.2, де наведено середній розподіл рівнів споживання ЕЕ споживачами вітчизняних ГЗК. Нерівномірність такого розподілу вказує на доцільність не лише централізованого живлення від головних підстанцій, а й застосування локальних джерел для окремих груп споживачів [16–17].

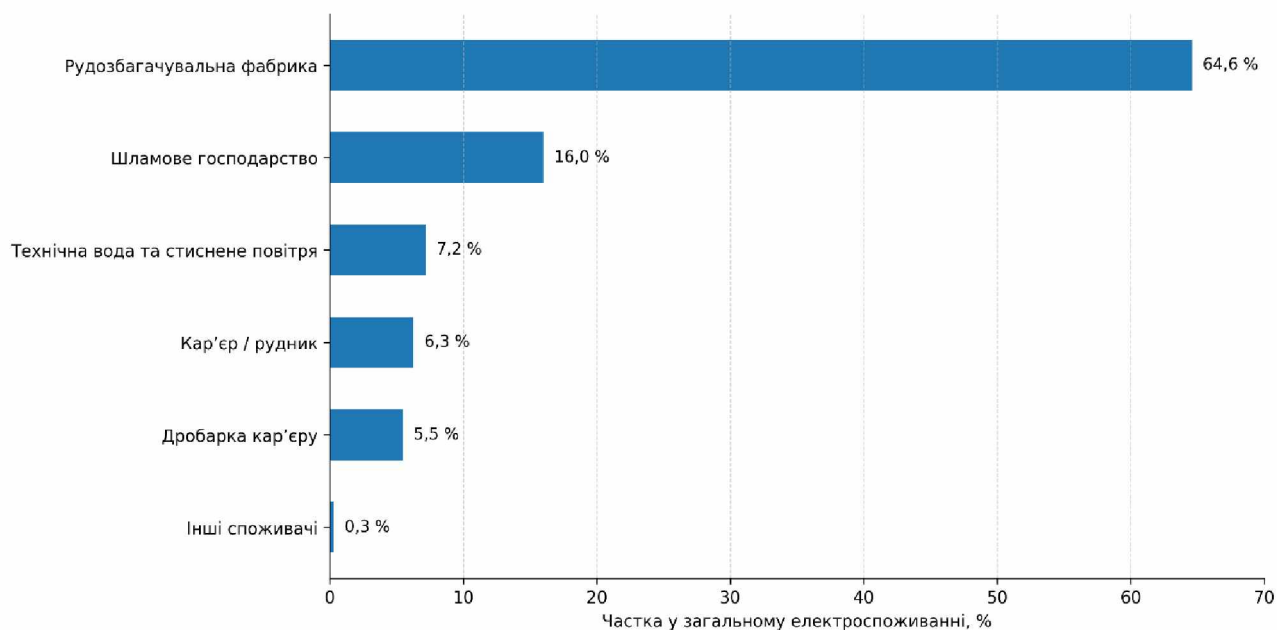


Рисунок 1.2 – Середній за 2016-2021 роки розподіл рівнів споживання ЕЕ споживачами вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів

Важливою особливістю ГЗК є наявність значних відкритих площ, які не завжди можуть бути ефективно використані для основної виробничої діяльності. До таких територій належать відвали пустих порід, шламосховища, технологічні майданчики, кар'єрні борти та інші ділянки, що часто займають значну частину

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промислової території. З одного боку, ці зони є техногенно навантаженими й мають обмежене господарське використання, а з іншого – можуть розглядатися як потенційні майданчики для розміщення об’єктів розподіленої генерації. Особливо це стосується ВЕУ, для яких важливими є відкритість території, відсутність щільної забудови, достатня відстань до перешкод і можливість встановлення вітроколеса на підвищених ділянках рельєфу.

Порівняння можливих автономних джерел генерації для промислових підприємств наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика автономних джерел генерації для промислових підприємств

Джерело генерації	Переваги для промислового підприємства	Основні обмеження	Доцільність для умов ГЗК
Дизельна або газова електростанція	Висока керованість, можливість швидкого резервування навантаження	Витрати на паливо, викиди, залежність від постачання палива	Доцільна як резервне або аварійне джерело
Сонячна електростанція	Відсутність витрат на паливо, простота масштабування	Залежність від освітленості, потреба у значних площах, зниження ефективності через пил	Обмежено доцільна через запиленість промислових майданчиків
ВЕУ	Можливість використання відкритих і підвищених територій, придатність для розподіленої генерації	Змінність швидкості вітру, потреба в системі керування та стабілізації параметрів	Доцільна для відвалів, шламосховищ і відкритих промислових зон
Гібридна система з накопичувачем	Підвищення надійності, згладжування генерації, резервування відповідальних споживачів	Висока вартість накопичувачів, складність керування	Перспективна для критичних і віддалених споживачів

З наведеного порівняння видно, що кожен тип автономного джерела має власну сферу раціонального застосування. Дизельні та газові електростанції залишаються ефективними для аварійного або резервного живлення, однак їх постійна експлуатація пов’язана з витратами на паливо та екологічними

обмеженнями. Сонячні електростанції мають переваги з точки зору простоти монтажу й експлуатації, проте для умов гірничорудних підприємств їх ефективність може істотно знижуватися через запиленість повітря, осідання абразивних частинок на поверхні фотоелектричних модулів і потребу в регулярному очищенні. Саме тому для техногенних територій ГЗК ВЕУ можуть бути більш придатними, оскільки відкриті простори, підвищені відмітки рельєфу та відсутність щільної забудови створюють сприятливі умови для використання енергії вітрового потоку [1, 18–19].

Окремої уваги потребують шламосховища та відвали пустих порід [20–21]. Такі об'єкти, як правило, мають значні площі, розташовуються на відкритій місцевості та можуть бути віддалені від основних виробничих корпусів. Крім того, вони потребують електропостачання для насосних станцій, освітлення, систем контролю, допоміжних механізмів і технологічного обладнання.

За даними, наведеними у табл. 1.3 та на рис. 1.3, рівень електроспоживання окремих складових технологічної структури ГЗК є нерівномірним, а для шламосховищ спостерігається тенденція до зростання споживання [2, 18, 22–23]. Це підтверджує актуальність пошуку локальних джерел живлення, здатних зменшити навантаження на протяжні лінії електропередач і підвищити надійність електропостачання таких об'єктів [21, 24].

Таблиця 1.3 – Показники рівнів споживання ЕЕ складовими ГЗК (НК ГЗК, м. Кривий Ріг)

Квартал	Дата	Рудник / кар'єр	Дробарна фабрика	Рудозбагачувальна фабрика	Шламово-господ.	Техн. вода / стис. повітря
1	15.02.2019	4,2	6,1	61,7	15,5	7,8
2	15.05.2019	3,6	5,8	63,2	16,8	7
3	15.08.2019	3,5	6	65,9	14	7,8
4	15.11.2019	3,4	6,3	64,5	15,7	7,5
5	15.02.2020	2,5	6,2	61,8	16,4	7,3
6	15.05.2020	2,6	6,1	61,7	16,6	7,2
7	15.08.2020	2,9	5,6	64,3	13,8	7,9
8	15.11.2020	3,3	5,6	62,4	17,4	7,5
9	15.02.2021	3,2	5,1	66,8	12,9	7,6
10	15.05.2021	3,5	5,8	66,4	13,2	7,5
11	15.08.2021	2,9	5,2	60,3	20,3	7,2

12	15.11.2021	3,6	5	59,7	20,7	6,5
----	------------	-----	---	------	------	-----

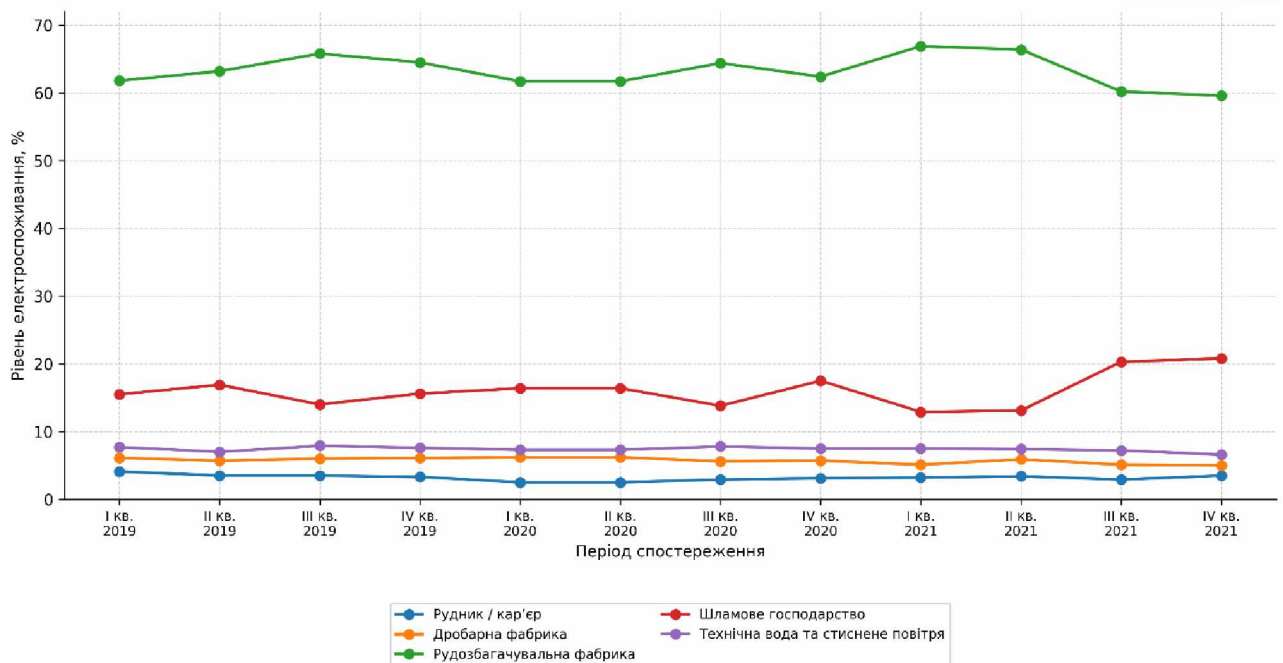


Рисунок 1.3 – Показники рівнів споживання ЕЕ складовими технології роботи ГЗК (м. Кривий Ріг)

Застосування ВЕУ у системах електропостачання промислових підприємств може здійснюватися за кількома схемами. Перша схема передбачає автономну роботу ВЕУ на окреме локальне навантаження. У цьому випадку установка повинна самостійно забезпечувати підтримання напруги та частоти в допустимих межах, що потребує використання системи керування, компенсувальних пристроїв і, за потреби, накопичувачів енергії. Друга схема передбачає паралельну роботу ВЕУ з внутрішньою мережею підприємства. За такого варіанта частина ЕЕ споживається безпосередньо промисловими електроприймачами, а дефіцит або надлишок потужності компенсується через мережу підприємства. Третя схема полягає у створенні гібридної локальної енергосистеми, де ВЕУ працює спільно з іншими джерелами генерації, накопичувачами енергії та керованим навантаженням.

Найбільш складним з технічної точки зору є автономний режим роботи ВЕУ. На відміну від роботи з потужною централізованою енергосистемою,

автономна ВЕУ не має зовнішнього джерела, яке стабілізує частоту та напругу. Тому будь-яка зміна швидкості вітру або навантаження безпосередньо впливає на електромеханічний режим генератора. У разі використання асинхронного генератора (АГ) з ємнісним збудженням особливого значення набуває баланс реактивної потужності, оскільки саме конденсаторні батареї забезпечують умови для самозбудження генератора та підтримання необхідного рівня напруги. Недостатня ємність може призводити до зниження напруги або втрати генераторного режиму, тоді як надмірна ємність здатна спричинити перенапругу та погіршення стійкості системи.

Для промислових підприємств важливо враховувати не лише енергетичний ефект від впровадження ВЕУ, а й режимні наслідки їх роботи. До таких наслідків належать можливі коливання напруги, зміна частоти в автономній мережі, поява перехідних процесів під час підключення або відключення навантаження, потреба у компенсації реактивної потужності, а також необхідність узгодження роботи декількох паралельно підключених установок. Саме ці питання мають безпосередній зв'язок із подальшим моделюванням у розділі 2, де досліджуються режими роботи ВЕУ з АГ із ємнісним збудженням, вплив зміни швидкості вітру, кута встановлення лопатей, навантаження та ємності збудження на параметри системи.

Таким чином, застосування автономних джерел генерації ЕЕ в системах електропостачання промислових підприємств є технічно та економічно обґрунтованим напрямом, особливо для територіально віддалених або енергетично відповідальних об'єктів. Для ГЗК найбільш перспективним є використання ВЕУ на відкритих техногенних територіях, зокрема відвалах і шламосховищах. Водночас ефективність такого рішення залежить не лише від наявності вітрового потенціалу, а й від правильного вибору схеми приєднання, типу генератора, параметрів ємнісного збудження та алгоритмів керування. Це обумовлює необхідність подальшого аналізу режимів роботи ВЕУ та дослідження їх поведінки в автономних і локальних системах електропостачання промислових підприємств.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Аналіз режимів роботи вітроенергетичних установок в системах електропостачання промислових підприємств

Після обґрунтування доцільності використання автономних джерел генерації в системах електропостачання промислових підприємств необхідно розглянути, у яких режимах можуть працювати ВЕУ. Саме режим роботи визначає вимоги до генератора, системи керування, засобів компенсації реактивної потужності, захисту, накопичувачів енергії та способу приєднання до електричної мережі. Для промислових підприємств це питання є особливо важливим, оскільки їх навантаження часто має змінний характер і може впливати на рівень напруги, частоту та стійкість локальної енергосистеми.

У загальному випадку ВЕУ можуть функціонувати в автономному режимі, у локальному режимі паралельно з внутрішньою мережею підприємства або у складі централізованої електроенергетичної системи [25–26]. Кожен із цих варіантів має різний рівень енергетичної незалежності, різні вимоги до стабілізації параметрів ЕЕ та різну складність технічної реалізації. Для умов гірничо-збагачувальних і гірничо-металургійних підприємств найбільший інтерес становлять автономні та локальні режими, оскільки вони дозволяють жити віддалені технологічні об'єкти, зменшувати втрати в протяжних лініях електропередачі та підвищувати надійність електропостачання окремих груп споживачів.

Автономний режим передбачає роботу ВЕУ без жорсткого електричного зв'язку з потужною зовнішньою енергосистемою. У цьому випадку установка або група установок самостійно забезпечує живлення споживачів. Перевагою такого режиму є можливість електропостачання віддалених об'єктів, для яких будівництво або реконструкція ліній живлення є економічно недоцільною. Однак автономний режим є найбільш складним з погляду стабілізації параметрів. Зміна швидкості вітру одразу впливає на механічну потужність турбіни, а зміна навантаження – на баланс активної та реактивної потужності [25–26].

Локальний режим роботи передбачає паралельну роботу ВЕУ з внутрішньою мережею промислового підприємства. Частина виробленої ЕЕ

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

споживається безпосередньо електроприймачами підприємства, а дефіцит або надлишок потужності компенсується через мережу. Такий режим є більш стійким порівняно з автономним, оскільки підприємство зберігає зв'язок із зовнішнім джерелом живлення. Водночас локальна ВЕС впливає на потокорозподіл, режим напруги, роботу компенсувальних пристроїв і релейного захисту. Тому при її впровадженні необхідно враховувати графік навантаження, точку приєднання та можливість обмеження генерації у періоди мінімального споживання.

Робота ВЕС у складі централізованої енергосистеми характерна для потужних промислових або комерційних ВЕС, які видають ЕЕ в мережу через підвищувальні трансформаторні підстанції. У цьому режимі основні функції стабілізації частоти та балансу потужності виконує енергосистема, однак сама ВЕС повинна відповідати вимогам щодо якості ЕЕ, реактивної потужності, захисту, диспетчерського керування та обмеження потужності. Для промислових підприємств такий режим є доцільним тоді, коли ВЕС має значну встановлену потужність і може працювати не лише для власного споживання, а й для передачі ЕЕ в зовнішню мережу [1, 27].

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика режимів роботи ВЕУ

Режим роботи	Сутність режиму	Переваги	Обмеження
Автономний	Живлення окремого об'єкта або локальної групи споживачів без постійного зв'язку із зовнішньою мережею.	Енергетична незалежність; доцільність для віддалених об'єктів.	Потреба у стабілізації напруги і частоти; складність керування навантаженням.
Локальний	Паралельна робота ВЕУ з внутрішньою мережею промислового підприємства.	Зменшення закупівлі ЕЕ; резервування з боку мережі.	Вплив на режим напруги, потокорозподіл, компенсацію реактивної потужності та РЗА.
Мережевий	Видача ЕЕ у централізовану енергосистему через трансформаторну підстанцію.	Можливість роботи з великою встановленою потужністю.	Вимоги до диспетчеризації, якості ЕЕ, прогнозування і балансування.

Порівняння режимів показує, що зі зменшенням впливу зовнішньої енергосистеми зростає роль власної системи керування ВЕУ. Якщо у мережевому режимі частота та напруга значною мірою підтримуються енергосистемою, то в автономному режимі ці параметри залежать від балансу між механічною потужністю турбіни, електричним навантаженням і параметрами генератора. Саме тому автономний режим є найбільш показовим для дослідження динамічних процесів у ВЕУ.

Для ВЕУ з АГ із ємнісним збудженням режим роботи визначається чотирма основними факторами: швидкістю вітрового потоку, кутом встановлення лопатей, величиною навантаження та ємністю конденсаторних батарей [28]. Перший і третій фактори переважно мають характер збурень, оскільки швидкість вітру та навантаження можуть змінюватися випадково або ступінчасто. Другий і четвертий фактори можуть використовуватися як керуючі впливи: зміна кута лопатей впливає на механічну потужність вітротурбіни, а зміна ємності збудження – на реактивну потужність і рівень напруги генератора.

Отже, аналіз режимів роботи ВЕУ підтверджує, що для промислових підприємств недостатньо лише вибрати місце встановлення та потужність ВЕУ. Необхідно також визначити режим її взаємодії з навантаженням і мережею, передбачити засоби стабілізації напруги та частоти, а також узгодити роботу систем керування, компенсації реактивної потужності та захисту. Саме ці питання є логічним підґрунтям для подальшого аналізу методів керування ВЕУ та модельного дослідження їх роботи у складі автономної ВЕС.

1.4 Аналіз методів керування вітроенергетичними установками у складі вітроенергетичних станцій

Ефективність функціонування ВЕУ у складі ВЕС значною мірою визначається не лише вибором типу генератора, а й способом керування електромеханічною системою за змінних зовнішніх та внутрішніх впливів. Для промислових підприємств це питання є особливо важливим, оскільки електроприймачі таких об'єктів часто мають нерівномірний графік

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження, значні пускові струми, змінну реактивну складову та підвищені вимоги до безперервності електропостачання. Тому ВЕС у промисловій мережі повинна розглядатися не як ізольоване джерело енергії, а як керований елемент локальної електроенергетичної системи, який взаємодіє з навантаженням, компенсуючими пристроями, лініями електропередачі та системами захисту [1, 29].

У розрахунково-модельній частині дипломного проєкту як об'єкт дослідження розглядається ВЕУ з АГ із ємнісним збудженням. Такий варіант є доцільним для аналізу автономних або локальних систем електропостачання, оскільки асинхронна машина має просту конструкцію, порівняно високу надійність і не потребує ковзних контактів. Водночас її робота в автономному режимі є чутливою до балансу активної потужності, рівня реактивної потужності та параметрів ємнісного збудження. Саме тому у складі системи керування необхідно враховувати не один, а декілька взаємопов'язаних каналів впливу: аеродинамічний, електромеханічний, електричний та навантажувальний.

Загальна потужність, що може бути відібрана вітротурбіною з повітряного потоку, визначається залежністю [25]:

$$P_B = 0,5 \cdot \rho \cdot F \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V^3,$$

де ρ – густина повітря, F – площа, яку описує вітроколесо, C_p – коефіцієнт використання енергії вітру, λ – швидкохідність, β – кут встановлення лопатей, V – швидкість вітру.

Ця залежність показує, що зміна швидкості вітру є найсильнішим природним збуренням, оскільки потужність повітряного потоку пропорційна кубу швидкості [25]. Навіть відносно невелике зниження швидкості вітру може призвести до істотного зменшення механічної потужності на валу турбіни, падіння швидкості обертання генератора та зменшення вихідної напруги.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

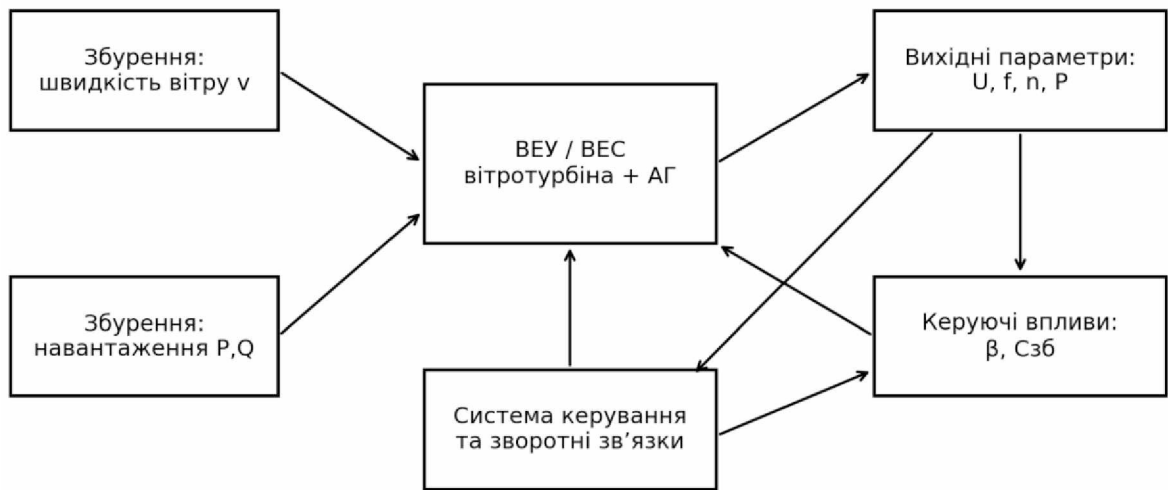


Рисунок 1.4 – Узагальнена структура збурюючих і керуючих впливів на БЕУ

Першим фактором, який визначає режим роботи БЕУ, є варіація швидкості вітрового потоку [4, 25]. Для реальних промислових майданчиків вітер має стохастичний характер: його швидкість і напрям змінюються під впливом рельєфу, забудови, температурних умов і турбулентності. У системах із безпосереднім приєднанням АГ це спричиняє коливання механічного моменту, а в автономних системах – відхилення частоти та напруги. Методи керування за цим фактором поділяються на пасивні та активні. Пасивні методи передбачають вибір оптимальної потужності турбіни, інерційності ротора, передаточного числа редуктора та параметрів генератора. Активні методи використовують зміну кута встановлення лопатей, регулювання електричного навантаження або керування збудженням генератора з метою компенсації змін вітрової енергії.

Другим і найбільш поширеним керуючим впливом є регулювання кута встановлення лопатей вітротурбіни [25, 29]. За допомогою зміни кута β змінюється аеродинамічна характеристика вітроколеса, а отже і коефіцієнт C_p . При малих та середніх швидкостях вітру лопаті зазвичай встановлюють у положення, близьке до оптимального, щоб забезпечити максимальний відбір енергії. При перевищенні допустимої потужності або швидкості обертання кут збільшують, переводячи лопаті у менш енергоефективне положення. У досліджуваній моделі такий канал керування є принциповим, оскільки після зменшення швидкості вітру відновлення параметрів генератора може досягатися

саме зміною кута лопатей. Перевагою цього методу є безпосередній вплив на первинне джерело енергії, а недоліком – наявність механічної інерційності, зношування приводу повороту та обмежена швидкодія.

Третім фактором є зміна навантаження установки [29]. Для промислових підприємств цей фактор є не менш важливим, ніж зміна вітру, оскільки навантаження може змінюватися ступінчасто: підключення електроприводів, компресорів, насосних станцій, конвеєрів або технологічних агрегатів викликає перерозподіл активної та реактивної потужності. У ВЕС з кількома паралельно працюючими ВЕУ раптове підключення навантаження може спричинити зміну напруги у спільній точці приєднання, появу перехідних процесів і навіть автоколивання частоти. Тому керування навантаженням може розглядатися у двох аспектах: як зовнішнє збурення, що порушує режим, і як технічний засіб стабілізації. У другому випадку використовують баластні навантаження, керовані перетворювачі, пріоритетне відключення другорядних споживачів або накопичувачі енергії, які згладжують миттєвий дисбаланс потужності.

Особливе значення для АГ з ємнісним збудженням має четвертий фактор – коригування ємності збудження [25, 29]. В автономному режимі конденсаторна батарея є джерелом реактивної потужності, необхідної для створення магнітного поля генератора. Недостатня ємність призводить до зниження напруги або неможливості самозбудження, а надмірна – до перенапруги, збільшення струмів і погіршення стійкості. У межах дипломного моделювання саме підключення додаткової ємності дозволяє зменшити відхилення швидкості обертання та підтримати напругу на близькому до номінального рівні після зміни навантаження.

Таблиця 1.5 – Вплив основних факторів на параметри роботи ВЕУ

Фактор	Характер впливу	Основні наслідки	Можливий спосіб компенсації
Швидкість вітру	Стохастичне зовнішнє збурення	Зміна механічної потужності, швидкості обертання та частоти	Регулювання кута встановлення лопатей, оптимізація швидкохідності, резерв навантаження

Кут лопатей β	Керуючий аеродинамічний вплив	Зміна коефіцієнта C_p і моменту турбіни	Автоматичний привід повороту лопатей
Навантаження P, Q	Збурення з боку споживача або керований канал	Провали напруги, зміна частоти, перехідні процеси	Кероване навантаження, накопичувачі, розвантаження другорядних споживачів
Ємність збудження C_{zb}	Керуючий електричний вплив	Зміна реактивної потужності та рівня напруги	Секціоновані батареї конденсаторів, статичні компенсатори

За принципом побудови системи керування ВЕУ можна поділити на декілька груп [25, 30]. Найпростіші системи реалізують фіксований кут лопатей і постійну ємність збудження, тому фактично працюють лише в обмеженому діапазоні швидкостей вітру та навантажень. Більш досконалі системи мають один регульований канал, наприклад тільки регулювання кута встановлення лопатей вітротурбіни або тільки перемикання секцій конденсаторів. Найбільш ефективними для автономних ВЕС є комбіновані системи, у яких одночасно використовуються два контури зворотного зв'язку: за напругою та за швидкістю обертання. Перший контур формує команду на зміну ємності збудження або реактивної компенсації, другий – на зміну кута лопатей чи електричного навантаження. Такий підхід дозволяє розділити швидкі електричні процеси та повільніші механічні процеси керування.

Для ВЕС, що працює у складі промислового підприємства, система керування повинна виконувати не лише стабілізаційні, а й координаційні функції [1]. Якщо у складі станції працює декілька ВЕУ, то зміна режиму однієї установки впливає на інші через спільну електричну мережу. Це проявляється у зміні частоти, напруги, потоків активної та реактивної потужностей, а також у зміні умов самозбудження окремих генераторів. Тому доцільним є ієрархічний принцип керування: локальний регулятор кожної ВЕУ підтримує власні параметри, а верхній рівень координує роботу всієї ВЕС, розподіляє

навантаження між агрегатами, визначає порядок підключення конденсаторних батарей і обмежує небезпечні перехідні режими.

Таблиця 1.6 – Порівняння методів керування ВЕУ з АГ

Метод керування	Об'єкт впливу	Переваги	Обмеження
Регулювання кута встановлення лопатей	Механічна потужність турбіни	Ефективне обмеження потужності та швидкості	Механічна інерційність і зношування приводу
Керування навантаженням	Баланс активної потужності	Швидка реакція на дисбаланс у мережі	Потребує резервних або баластних споживачів
Коригування ємності збудження	Реактивна потужність і напруга	Придатне для автономних АГ з ємнісним збудженням	Ступінчастість регулювання та ризик перенапруги
Комбіноване керування	Вся ВЕУ або ВЕС	Найкраща стабілізація U і f	Складніший алгоритм і потреба в датчиках

Важливою вимогою до систем керування є забезпечення селективності реакції на різні види збурень [1]. Наприклад, короткочасний порив вітру не завжди потребує негайної зміни кута лопатей, оскільки механічний привід має обмежену швидкодію, а надмірно часті переміщення лопатей прискорюють зношування вузлів. У таких випадках доцільно використовувати інерційність ротора, допустимий короткочасний діапазон зміни швидкості та швидкодіючі електричні засоби стабілізації. Навпаки, тривале зниження швидкості вітру або стійке збільшення навантаження потребує вже не короткочасної компенсації, а переходу системи до нового усталеного режиму. Це означає, що алгоритм керування повинен не лише реагувати на відхилення напруги чи частоти, а й розрізняти характер збурення за тривалістю, амплітудою та напрямом зміни.

Для практичної реалізації таких алгоритмів необхідна система вимірювання, яка забезпечує контроль швидкості вітру, швидкості обертання ротора, напруги, струму, активної та реактивної потужностей [25, 29–30]. На основі цих сигналів формується оцінка поточного енергетичного балансу. Якщо зниження напруги супроводжується зменшенням швидкості обертання, першочерговим є аеродинамічне регулювання та зменшення навантаження. Якщо ж напруга знижується за надмірної або близької до номінальної швидкості,

доцільно коригувати ємність збудження та реактивний баланс. Отже, однаковий зовнішній прояв, наприклад падіння напруги, може мати різні причини, а тому потребує різних керуючих дій. Саме це пояснює необхідність комплексного аналізу декількох параметрів, а не використання лише одного простого регулятора напруги.

З позиції оптимізації режимів роботи промислової ВЕС важливими критеріями є не тільки стабілізація миттєвих значень U та f , а й мінімізація втрат ЕЕ, обмеження струмових перевантажень, зменшення кількості комутацій конденсаторних секцій, підтримання допустимого коефіцієнта потужності та продовження ресурсу механічних вузлів. Тому оптимальне керування не зводиться до максимально швидкого усунення відхилення будь-якою ціною.

Наприклад, занадто часте перемикання конденсаторних батарей може покращити напругу, але погіршити комутаційну надійність і викликати додаткові перехідні процеси. Аналогічно, надмірно активне регулювання кута встановлення лопатей вітротурбіни може стабілізувати швидкість, але збільшити механічне навантаження на привод повороту лопатей. У зв'язку з цим перспективним є використання комбінованих алгоритмів із зонами нечутливості, обмеженнями швидкості зміни керуючих сигналів і пріоритетами між каналами керування.

У випадку приєднання ВЕС до електроенергетичної мережі промислового підприємства додатково необхідно враховувати взаємодію з існуючими засобами компенсації реактивної потужності, трансформаторами та кабельними лініями [1]. Невдале узгодження параметрів ВЕУ з внутрішньозаводською мережею може спричинити перетоки реактивної потужності, локальні перенапруги або зниження запасу статичної стійкості. Тому при виборі методу керування доцільно орієнтуватися саме на режимну модель усієї ділянки мережі, включаючи змінний склад працюючих споживачів. Для дипломного моделювання це має принципове значення, оскільки дозволяє обґрунтувати дослідження не тільки одиничної ВЕУ, а й групи паралельно працюючих агрегатів у складі автономної або локальної ВЕС.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремо слід зазначити, що керування пусковими режимами ВЕУ також є складовою загальної задачі оптимізації [25–26, 30]. Прямий пуск АГ в автономній мережі може спричиняти значні провали напруги, порушення стійкості та зміну швидкості інших агрегатів. Більш доцільним є попередній розгін від вітроколеса з подальшим підключенням генератора до мережі після досягнення прийнятної швидкості. Однак і такий спосіб потребує узгодження з ємнісним збудженням, оскільки момент підключення генератора супроводжується кидками струму та зміною балансу реактивної потужності. Для промислових мереж, де одночасно можуть працювати технологічні установки з високою чутливістю до провалів напруги, питання м'якого введення ВЕУ в роботу має практичне значення.

Таким чином, методи керування повинні оцінюватися не ізольовано, а за здатністю підтримувати узгоджену роботу механічної, електричної та навантажувальної підсистем. У даній роботі цей підхід є обґрунтованим, оскільки він безпосередньо пояснює вибір досліджуваних змінних у моделі: швидкості вітру, кута лопатей, навантаження та ємності збудження.

Узагальнюючи, існуючі методи керування ВЕУ у складі ВЕС можна розглядати як сукупність взаємопов'язаних дій, спрямованих на підтримання енергетичного балансу між вітровим потоком, генератором і навантаженням. Варіація швидкості вітру та зміна навантаження виступають основними збурюючими факторами, тоді як регулювання кута встановлення лопатей і коригування ємності збудження є основними керуючими впливами.

Для автономних або локальних промислових мереж найбільш доцільним є комбіноване керування, яке поєднує аеродинамічне регулювання, електричну компенсацію реактивної потужності, контроль навантаження та координацію паралельної роботи декількох агрегатів.

Саме такий підхід створює теоретичну основу для подальших модельних досліджень режимів роботи ВЕУ у складі ВЕС промислового підприємства.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.01	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У СКЛАДІ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІ

2.1 Загальні питання вибору генератора для вітроенергетичної установки

Вибір генератора є одним із ключових етапів побудови електротехнічного комплексу ВЕУ [1, 4, 19], оскільки саме від типу електричної машини значною мірою залежать режими роботи ВЕУ, склад системи керування, вимоги до перетворювальної техніки, способи стабілізації напруги та частоти, а також умови паралельної роботи декількох агрегатів у складі ВЕС. Для промислових підприємств це питання має особливе значення, оскільки їх електричні мережі характеризуються змінним навантаженням, наявністю потужних електроприводів, потребою у компенсації реактивної потужності та підвищеними вимогами до надійності електропостачання.

У складі сучасних ВЕУ можуть застосовуватися різні типи генераторів: синхронні генератори з електромагнітним збудженням, синхронні генератори з постійними магнітами, АГ з фазним ротором, АГ з короткозамкненим ротором, а також генератори, що працюють у поєднанні з силовими перетворювачами частоти [1, 4, 30]. Кожен із цих варіантів має власні переваги та обмеження, тому вибір конкретного типу генератора повинен виконуватися з урахуванням режиму роботи ВЕУ, потужності установки, вимог до якості ЕЕ, вартості обладнання та складності системи керування.

Синхронні генератори забезпечують стабільні електричні параметри та можуть ефективно працювати у складі потужних ВЕС, особливо за наявності сучасних систем збудження або перетворювальних пристроїв [1, 25, 29–30].

Синхронні генератори з постійними магнітами мають високий коефіцієнт

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.02		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 2		
Розробив	Кабанов О.О.						
Перевірів	Дозсренко О.В.						
Н. Контр.	Дозсренко О.В.						
Затвердж.	Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-23ск		
					Літ.	Арк.	Акрушів
						30	25

корисної дії, добрі масогабаритні показники та не потребують окремої системи збудження. Разом з тим вони є дорожчими, потребують складнішого силового перетворювача та чутливі до температурних і експлуатаційних умов. Тому для дослідження автономних або локальних систем електропостачання промислових підприємств такі рішення не завжди є найбільш простими й економічно доцільними.

АГ з короткозамкненим ротором мають просту конструкцію, високу механічну міцність, відносно невисоку вартість і достатню експлуатаційну надійність [25]. Вони широко застосовуються в електромеханічних системах завдяки відсутності колекторно-щіткового вузла, простоті обслуговування та можливості роботи в умовах змінної швидкості обертання в певному діапазоні.

Водночас такі генератори мають суттєву особливість: для створення магнітного поля вони потребують реактивної потужності. Якщо генератор працює паралельно з потужною електричною мережею, ця реактивна потужність може надходити з мережі або від компенсуючих пристроїв. Якщо ж ВЕУ працює автономно, необхідним стає застосування конденсаторних батарей або інших джерел реактивної потужності.

Для задач, що розглядаються у даній роботі, особливий інтерес становить АГ із ємнісним збудженням. Такий генератор може працювати в автономному режимі за умови підключення до його виводів конденсаторної батареї, яка забезпечує реактивну потужність, необхідну для самозбудження машини.

Саме ця властивість робить його придатним для дослідження ВЕУ, що живить локальне або автономне навантаження промислового підприємства. У цьому випадку генератор разом із конденсаторною батареєю, вітротурбіною, навантаженням і системою керування утворює єдиний електромеханічний комплекс, параметри якого істотно залежать від швидкості вітру, величини навантаження та ємності збудження.

Порівняльну характеристику основних типів генераторів, які можуть застосовуватися у складі ВЕУ, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика основних типів генераторів

					КНУ.РБ.141.26.250с-11.02	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тип генератора	Основні переваги	Основні обмеження	Доцільність для автономної ВЕУ
Синхронний генератор з електромагнітним збудженням	Можливість регулювання напруги, стабільні електричні параметри	Складніша система збудження, вища вартість і потреба в керуванні	Доцільний для потужних ВЕС, але складніший для малих автономних систем
Синхронний генератор з постійними магнітами	Високий ККД, відсутність втрат на збудження, компактність	Висока вартість, потреба в перетворювачі, складність ремонту	Перспективний, але економічно не завжди виправданий
АГ із короткозамкненим ротором	Простота, надійність, невисока вартість, відсутність ковзних контактів	Потреба в реактивній потужності, обмежене регулювання напруги	Доцільний за наявності мережі або компенсуючих пристроїв
АГ із ємнісним збудженням	Можливість автономної роботи, проста конструкція, придатність для моделювання локальних систем	Залежність напруги від ємності, швидкості обертання та навантаження	Найбільш доцільний для дослідження автономної ВЕУ в цій роботі

З наведеної порівняльної характеристики видно, що для дослідження режимів роботи автономної або локальної ВЕУ доцільно використовувати АГ із ємнісним збудженням. Його застосування дозволяє розглянути саме ті процеси, які є визначальними для промислових електричних мереж із розподіленою генерацією: зміну напруги при коливаннях навантаження, вплив швидкості обертання на частоту, роль реактивної потужності в підтриманні генераторного режиму та можливість стабілізації параметрів шляхом коригування ємності конденсаторних батарей.

Важливо враховувати, що в автономній ВЕУ АГ працює в умовах, суттєво відмінних від роботи у потужній централізованій мережі. У разі паралельної роботи з енергосистемою напруга і частота значною мірою задаються мережею, а генератор лише віддає активну потужність відповідно до механічної потужності вітротурбіни. В автономному режимі зовнішнє джерело стабілізації відсутнє, тому напруга і частота формуються всередині самої системи. Це означає, що будь-яка зміна швидкості вітру, кута встановлення лопатей,

активного навантаження або ємності збудження безпосередньо впливає на режим роботи генератора.

Саме тому для подальших модельних досліджень обрано структуру ВЕУ з АГ із ємнісним збудженням. Такий вибір дає можливість дослідити взаємозв'язок між механічною частиною ВЕУ, електричною машиною, конденсаторною батареєю та навантаженням. Крім того, ця структура дозволяє проаналізувати способи стабілізації вихідної напруги і частоти шляхом зміни кута встановлення лопатей та коригування ємності збудження. Отже, обраний тип генератора відповідає меті роботи та створює основу для побудови моделі ВЕУ, яка розглядається у наступному підрозділі.

2.2 Розробка моделі вітроенергетичної установки з асинхронним генератором із ємнісним збудженням

Після обґрунтування вибору АГ з ємнісним збудженням доцільно перейти до побудови моделі ВЕУ, яка дозволяє дослідити її поведінку в автономному режимі. Такий режим є найбільш показовим для аналізу, оскільки в ньому параметри напруги та частоти не задаються потужною зовнішньою енергосистемою, а формуються самою електромеханічною системою ВЕУ. Отже, будь-яка зміна швидкості вітру, навантаження або ємності конденсаторної батареї безпосередньо впливає на режим роботи АГ.

Особливість автономної ВЕУ з АГ полягає в тому, що генератор не має окремої системи електромагнітного збудження. Для створення магнітного поля використовується реактивна потужність, яку забезпечують конденсаторні батареї, підключені до виводів генератора. За правильно підібраної ємності та достатньої швидкості обертання виникає процес самозбудження, унаслідок чого на затискачах генератора формується напруга.

Якщо ж швидкість обертання або ємність збудження є недостатніми, напруга знижується, а генератор може втратити стійкий режим роботи. Саме тому для дослідження такої системи необхідно одночасно враховувати

					КНУ.РБ.141.26.250с-11.02	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічну частину вітротурбіни, електричну машину, конденсаторну батарею та навантаження.

На рис. 2.1 наведено функціональну схему автономної ВЕУ з АГ.

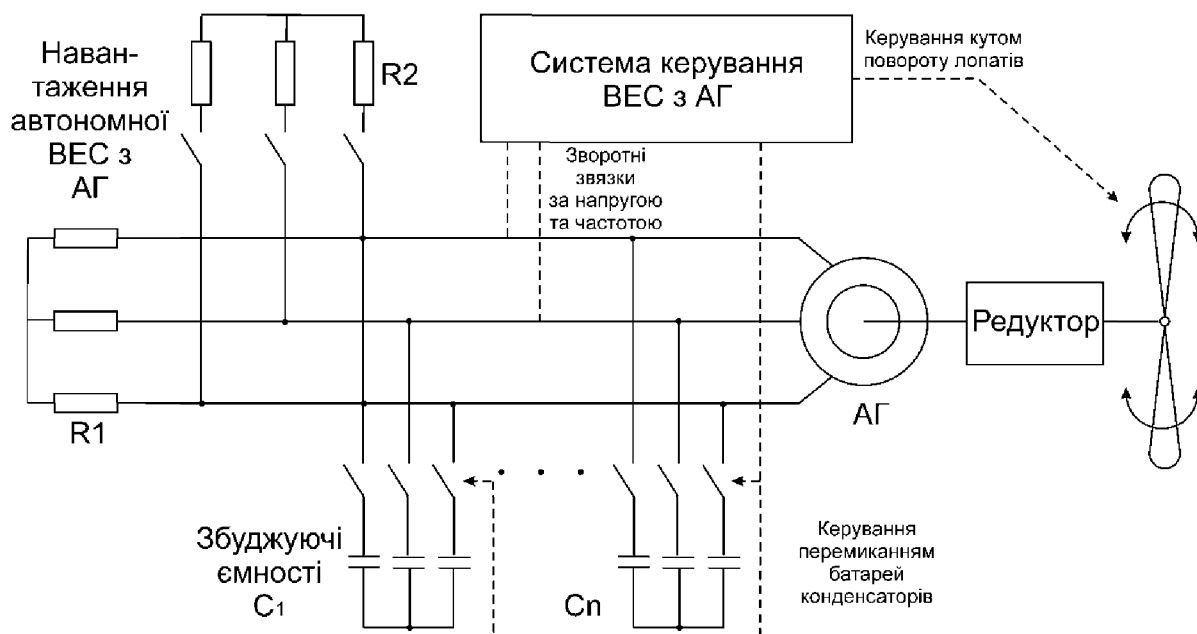


Рисунок 2.1 – Функціональна схема автономної ВЕУ з АГ

З наведеної схеми видно, що первинним джерелом енергії є вітровий потік, який діє на лопаті вітротурбіни та створює механічний момент на її валу. Механічна енергія передається на вал АГ, де перетворюється в ЕЕ.

Для забезпечення режиму самозбудження до генератора підключаються конденсаторні батареї, які формують необхідний рівень реактивної потужності. Навантаження отримує живлення від генератора, а його зміна впливає на баланс активної та реактивної потужностей. Тому така система є взаємопов'язаною: зміна одного параметра викликає зміну інших параметрів режиму.

Для детальнішого аналізу процесів у ВЕУ була розроблена імітаційна модель, структура якої наведена на рис. 2.2.

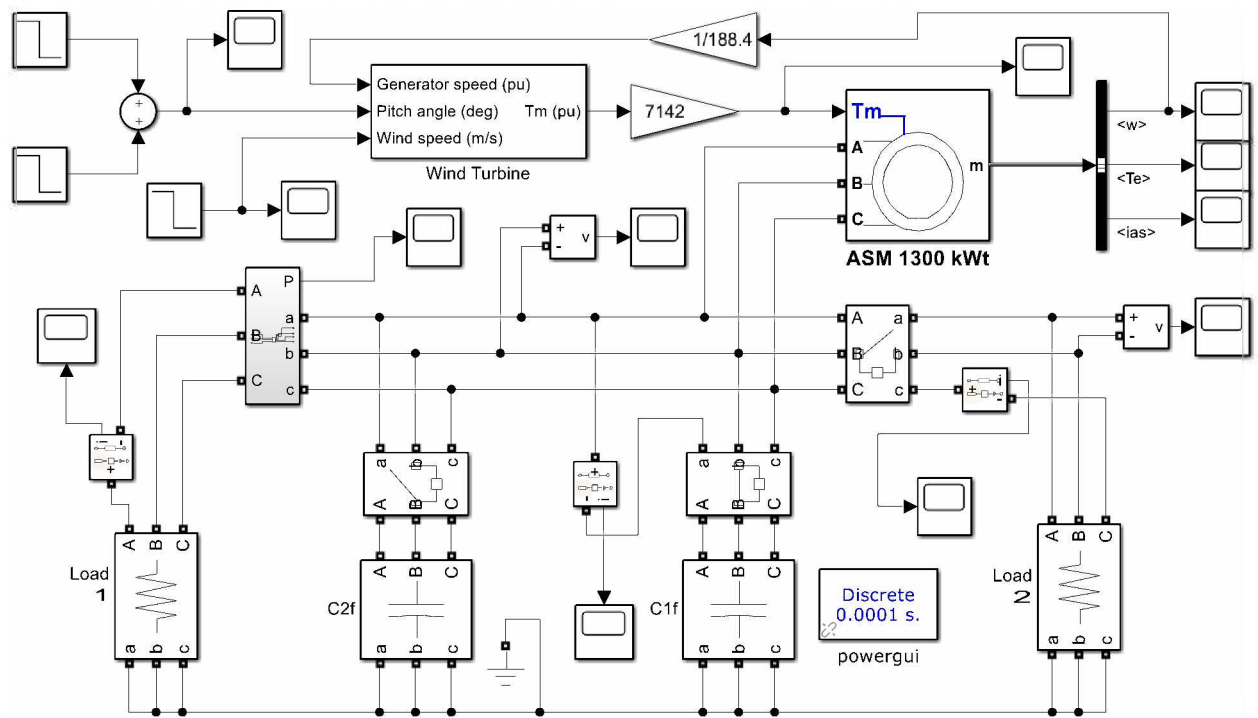


Рисунок 2.2 – Структура моделі БЕУ у складі ВЕС

У моделі враховано основні елементи, які визначають роботу автономної БЕУ: вітротурбіну, АГ, систему ємнісного збудження, навантаження та блоки вимірювання електричних і механічних параметрів. Така структура дозволяє дослідити, як змінюються швидкість обертання генератора, частота, напруга та характер перехідних процесів при зміні умов роботи. Особливу увагу приділено режимам, у яких порушується баланс між механічною потужністю, що надходить від вітротурбіни, та електричною потужністю, яка споживається навантаженням.

У запропонованій моделі використано асинхронну машину номінальною потужністю 1300 кВт, напругою статора 4160 В і частотою 50 Гц. Такий генератор дає можливість дослідити режими роботи БЕУ середньої потужності, яка може бути використана в локальних або автономних системах електропостачання промислових підприємств. Для моделювання вітротурбіни застосовано блок Wind Turbine з номінальною механічною потужністю 1,5 МВт та базовою швидкістю вітру 12 м/с. Зазначені параметри забезпечують

узгодження потужності механічної частини ВЕУ та електричної машини, а також дозволяють дослідити роботу установки за різних швидкостей вітрового потоку.

Турбінна характеристика для кута встановлення лопатей 0° наведена на рис. 2.3.

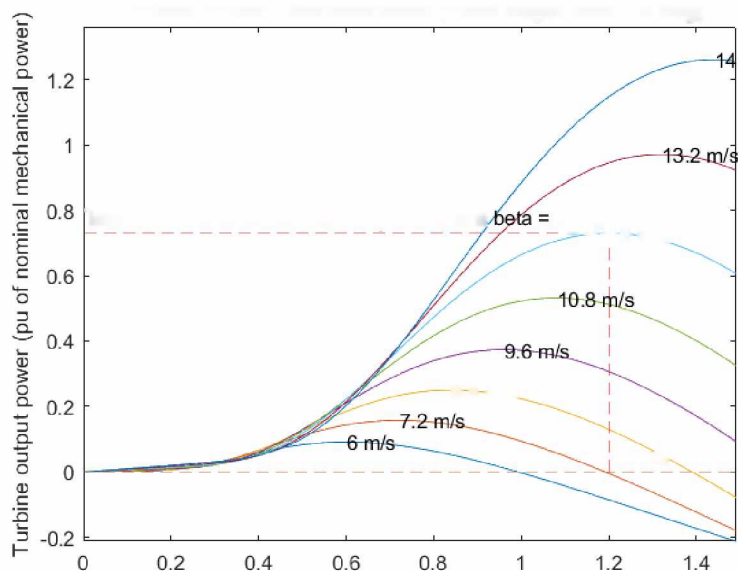


Рисунок 2.3 – Характеристики турбіни при куту лопатей 0°

Характеристика на рис. 2.3 відображає залежність механічної потужності вітротурбіни від швидкості обертання та швидкості вітру. Вона показує, що потужність, яку може передати турбіна на вал генератора, суттєво залежить від режиму обтікання лопатей і швидкохідності вітроколеса. При зміні швидкості вітру змінюється механічний момент, а отже, змінюється і режим роботи АГ. Саме ця особливість пояснює необхідність дослідження перехідних процесів, які виникають при раптовій зміні вітрових умов.

На основі розробленої моделі виконано дослідження автономного режиму роботи ВЕУ при двох основних збуреннях: різкому зменшенні швидкості вітру та стрибкоподібній зміні активного навантаження. Як базові параметри режиму прийнято лінійну напругу 2000 В та швидкість обертання генератора 188,4 об/хв, що відповідає частоті 50 Гц. Такі значення прийняті як орієнтир для оцінювання відхилень параметрів у перехідних режимах.

На рис. 2.4 наведено зміну швидкості АГ за різних умов роботи.

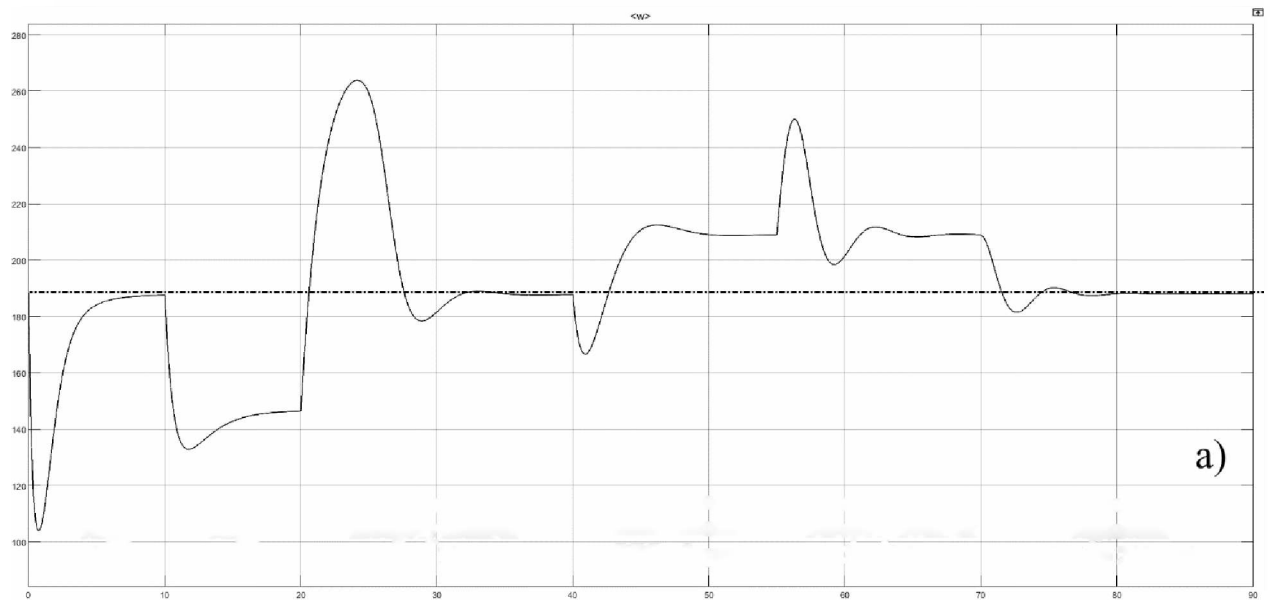


Рисунок 2.4 – Графік швидкості АГ за різних умов

На рис. 2.5 наведено зміну напруги АГ в тих самих режимах.

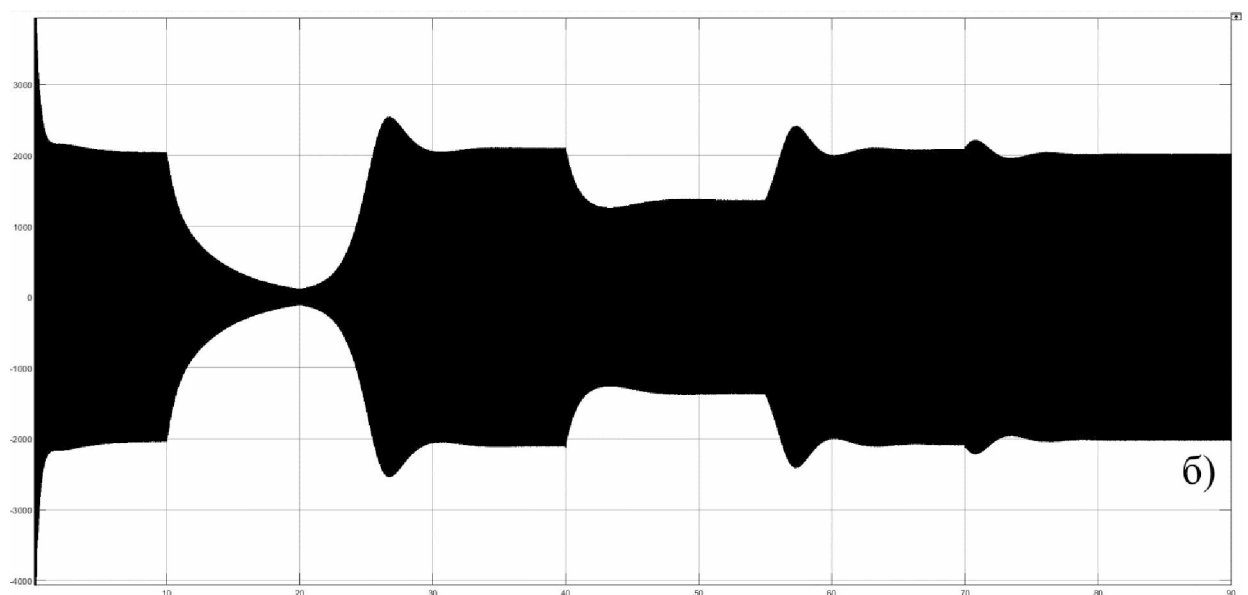


Рисунок 2.5 – Графік напруги АГ

Аналіз графіків показує, що зменшення швидкості вітру на 10-й секунді з 15 до 10 м/с викликає різке погіршення режиму роботи ВЕУ. У цей момент механічна потужність, що надходить від турбіни, зменшується, тому швидкість обертання генератора знижується приблизно з 190 до 145 об/хв. Одночасно відбувається значне падіння вихідної напруги з 2000 до 100 В. Такий характер процесу пояснюється тим, що при зменшенні швидкості обертання

погіршуються умови самозбудження АГ, а наявної ємності конденсаторної батареї вже недостатньо для підтримання попереднього рівня напруги.

Для відновлення параметрів ВЕУ на 20-й секунді здійснено зміну кута встановлення лопатей турбіни з 25° до 12° . Зменшення кута лопатей приводить до збільшення ефективності відбору енергії з вітрового потоку, внаслідок чого швидкість обертання генератора та напруга поступово повертаються до початкового рівня. Після регулювання кута лопатей швидкість наближається до 190 об/хв, а напруга – до 2000 В. Це підтверджує, що аеродинамічне керування може бути ефективним засобом компенсації зниження швидкості вітру.

Наступне збурення пов'язане зі зміною навантаження. На 40-й секунді відбувається подвоєння навантаження ВЕС, що призводить до порушення балансу потужностей. У результаті швидкість обертання АГ підвищується до 210 об/хв, тобто приблизно на 11,7 % перевищує номінальне значення. Одночасно напруга зменшується до 1300 В, що на 35 % нижче від прийнятого номінального рівня. Такий режим є небажаним, оскільки він поєднує перевищення швидкості обертання з істотним погіршенням якості електроживлення за напругою.

Для компенсації цього збурення на 55-й секунді виконано додаткове зменшення кута повороту лопатей на $9,5^\circ$. Це дозволяє відновити напругу до рівня, близького до 2000 В. Однак швидкість обертання генератора при цьому практично не зменшується і залишається близькою до 210 об/хв. Отже, у даному випадку регулювання кута лопатей позитивно впливає на напругу, але не забезпечує повної нормалізації швидкісного режиму генератора. Це свідчить про те, що лише одного аеродинамічного каналу керування недостатньо для стабілізації всіх параметрів автономної ВЕУ.

Для зниження швидкості генератора до допустимого рівня на 70-й секунді необхідно збільшити ємність збудження шляхом підключення додаткової батареї конденсаторів. Після такого коригування змінюється реактивний баланс системи, поліпшуються умови електромагнітного перетворення енергії, а напруга утримується близькою до 2000 В. Таким чином, підключення додаткової

					КНУ.РБ.141.26.250с-11.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

ємності дозволяє впливати не тільки на рівень напруги, а й на електромеханічний режим АГ.

Отримані результати показують, що режим роботи автономної ВЕУ з АГ із ємнісним збудженням визначається взаємодією чотирьох основних факторів: швидкості вітрового потоку, кута встановлення лопатей, величини навантаження та ємності збудження генератора. Швидкість вітру та навантаження переважно виступають як зовнішні збурення, що порушують сталий режим роботи. Кут встановлення лопатей і ємність збудження можуть використовуватися як керуючі впливи для компенсації цих збурень.

Проведене моделювання підтверджує, що для стабільної роботи автономної ВЕУ необхідно застосовувати комбіновану систему керування. Така система повинна мати щонайменше два основні контури зворотного зв'язку: за напругою та за швидкістю обертання генератора. Контур регулювання напруги доцільно пов'язувати з керуванням ємністю збудження або реактивною компенсацією, а контур регулювання швидкості – з керуванням кутом встановлення лопатей вітротурбіни. Узгоджена робота цих каналів дозволяє зменшити вплив випадкових змін вітру та навантаження на параметри електропостачання.

Отже, розроблена модель ВЕУ з АГ із ємнісним збудженням дає можливість оцінити динаміку автономної ВЕУ за умов зміни вітрового потоку та навантаження. Результати моделювання підтверджують доцільність використання регулювання кута лопатей і коригування ємності збудження як основних засобів стабілізації напруги та швидкості генератора. Подальше дослідження доцільно виконувати вже не для одиначної ВЕУ, а для групи паралельно працюючих установок у складі автономної ВЕС, оскільки в такій системі додатково виникає взаємний вплив агрегатів через спільну електричну мережу.

2.3 Розробка моделі автономної вітроенергетичної станції з паралельно працюючими вітроенергетичними установками

					КНУ.РБ.141.26.250с-11.02	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після дослідження режимів роботи одиничної ВЕУ доцільно перейти до аналізу автономної ВЕС, що містить декілька паралельно працюючих агрегатів. Такий перехід є принциповим, оскільки робота однієї ВЕУ не повною мірою відображає процеси, які виникають у груповій автономній системі. У складі ВЕС окремі установки електрично пов'язані між собою через спільну мережу та загальне навантаження, тому зміна режиму однієї ВЕУ впливає на параметри інших установок. Це проявляється у зміні напруги в точці спільного підключення, перерозподілі активної та реактивної потужностей, зміні швидкості обертання генераторів, а також у можливому виникненні перехідних і коливальних процесів.

У даній роботі автономна ВЕС розглядається як електротехнічний комплекс, до складу якого входять вісім ВЕУ з АГ. Така кількість агрегатів дає змогу дослідити не лише роботу окремої ВЕУ, а й взаємодію декількох джерел генерації в межах однієї автономної системи електропостачання. Для промислових підприємств подібна структура є практично доцільною, оскільки локальна ВЕС може складатися не з однієї потужної установки, а з групи агрегатів меншої потужності, розміщених на відкритих промислових майданчиках, відвалах, шламосховищах або інших віддалених ділянках підприємства.

На рис. 2.6 наведено структуру моделі автономної ВЕС з вісьмома ВЕУ. У моделі окремо показано перші три установки, а інші п'ять об'єднано у підсистему LAST 5 VEU (рис. 2.8). Такий спосіб побудови моделі дозволяє зберегти наочність схеми та водночас врахувати сумарний вплив усіх восьми агрегатів на режим автономної мережі. Кожна ВЕУ має однакову базову структуру і включає вітротурбіну, АГ, конденсаторну батарею, лінію приєднання та вимірювальні блоки. Це дає можливість розглядати станцію як сукупність однотипних генеруючих модулів, які працюють на спільне навантаження.

					КНУ.РБ.141.26.250с-11.02	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

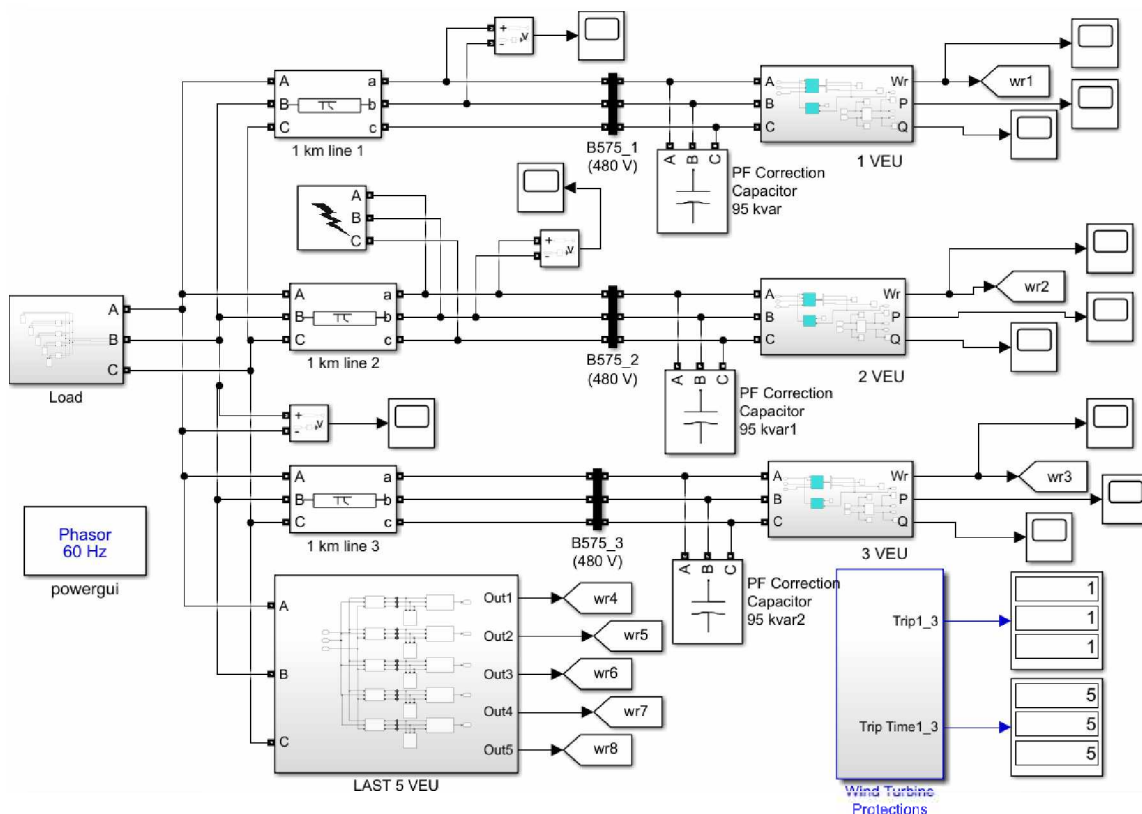


Рисунок 2.6 – Структура моделі автономної ВЕС з 8 ВЕУ

АГ окремих ВЕУ мають номінальні параметри 480 В і 275 кВА (рис. 2.7). Застосування генераторів однакового типу спрощує аналіз режимів паралельної роботи, оскільки відмінності у поведінці окремих агрегатів у такому випадку визначаються переважно режимними факторами: моментом підключення, швидкістю вітру, навантаженням, станом конденсаторної батареї та параметрами лінії приєднання. Кожна установка з'єднана із загальним вузлом навантаження через лінію довжиною 1 км. Наявність таких ліній у моделі дозволяє врахувати падіння напруги, перетоки потужності та взаємний вплив установок через електричну мережу.

Важливим елементом кожної ВЕУ є батарея конденсаторів потужністю 95 кВАр. Її призначення полягає у забезпеченні реактивної потужності, необхідної для збудження АГ та підтримання напруги у робочому режимі. У груповій автономній системі роль ємнісної компенсації зростає, оскільки реактивний баланс формується не однією машиною, а сукупністю генераторів і компенсувальних пристроїв. Недостатня компенсація може призвести до

зниження напруги в загальній точці приєднання, тоді як надлишкова – до перенапруги або погіршення стійкості перехідних процесів.

Блоки вимірювання активної та реактивної потужностей, передбачені у структурі кожної ВЕУ, дають можливість контролювати внесок окремих агрегатів у загальний баланс потужності станції. Це важливо для аналізу режимів, у яких одна установка підключається до вже працюючої групи ВЕУ або коли змінюється навантаження автономної системи. За таких умов необхідно оцінювати не лише сумарну потужність ВЕС, а й характер розподілу навантаження між окремими генераторами.

У моделі також передбачено блок Wind Turbine Protection, який використовується для контролю аварійних і нештатних режимів. Для автономної ВЕС це має важливе значення, оскільки порушення роботи однієї ВЕУ може вплинути на параметри всієї станції. До таких порушень можна віднести перевищення допустимої швидкості обертання, значний провал напруги, втрату збудження, перевантаження генератора або нестійкий режим після підключення додаткової установки.

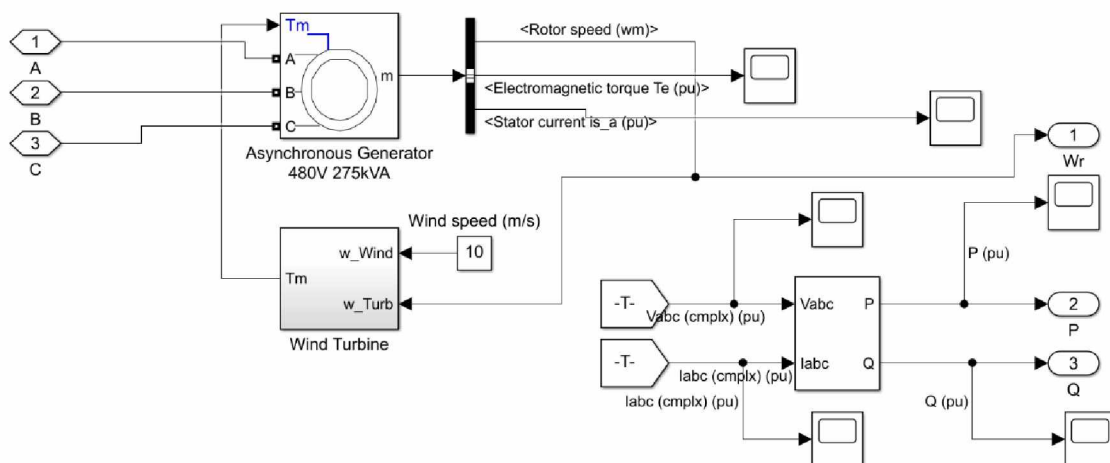


Рисунок 2.7 – Структура моделі з одиночною ВЕУ

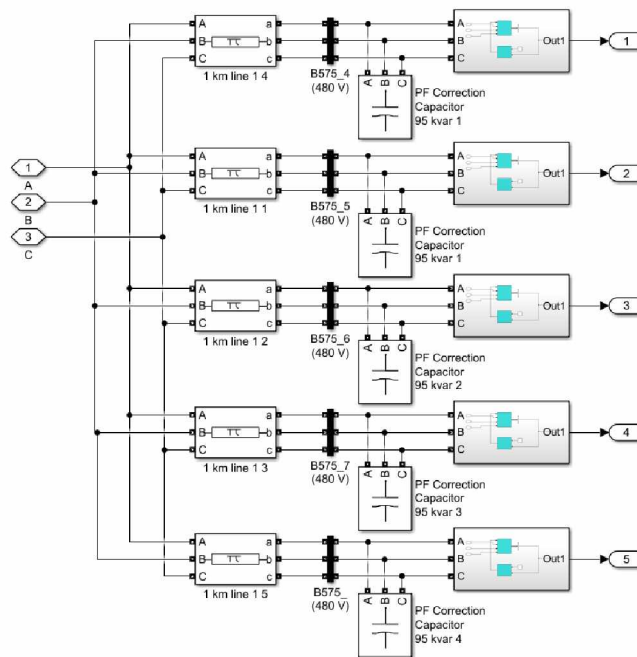


Рисунок 2.8 – Структура моделі підсистеми моделі LAST 5 VEU

На рис. 2.9 наведено структуру підсистеми LOAD, що включає 5 резистивних елементів, що підключаються до загальної мережі касадно у часовій послідовності.

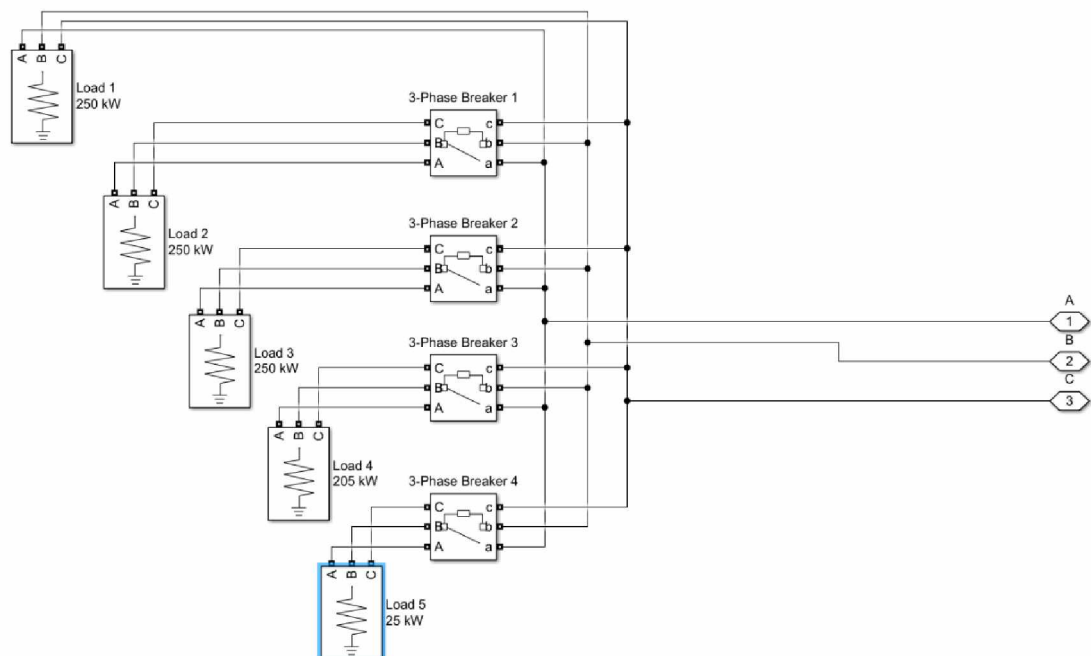


Рисунок 2.9 – Структура моделі підсистеми LOAD – дискретно перемикаємого навантаження автономної ВЕС

Запропонована структура моделі автономної ВЕС дозволяє перейти від аналізу одиничної ВЕУ до дослідження групової роботи декількох ВЕУ. Саме така модель є основою для подальшого аналізу пускових режимів, оскільки підключення додаткової ВЕУ до вже працюючої автономної станції може супроводжуватися значними перехідними процесами. Зокрема, необхідно оцінити, як пуск однієї установки впливає на напругу у спільній точці підключення, швидкість обертання інших генераторів і стійкість усієї автономної системи. Це безпосередньо пов'язує підрозділ 2.3 з наступним підрозділом, у якому досліджується пуск ВЕУ у складі автономної ВЕС.

2.4 Дослідження пускових режимів вітроенергетичної установки у складі автономної вітроенергетичної станції

Важливим аспектом функціонування ВЕУ, зокрема їх електромеханічних комплексів, є режими пуску. Асинхронні електроприводи ВЕУ можуть вводитися в роботу після неробочого стану (профілактика, технічний огляд, ремонт тощо) різними способами [25, 28–30]. Найпростішим і найбільш відомим є прямий пуск АГ. Однак через значну інерційність ВЕУ такий процес відбувається відносно повільно, а пусковий режим асинхронної машини суттєво впливає як на сам генератор, так і на інші установки у складі ВЕС.

У випадку реалізації прямого пуску в умовах автономної енергосистеми, що складається з восьми ВЕУ, з'єднаних між собою лініями довжиною 1 км, можливе порушення стійкості всієї системи, як це показано на рис. 2.14. Протягом перших 100 секунд здійснюється поступове, ступінчасте підключення навантаження до рівня 800 кВт, після чого на 100-й секунді ініціюється запуск восьмої ВЕУ методом прямого пуску АГ. Як свідчать результати, система втрачає працездатність: інші установки різко збільшують швидкість обертання майже вдвічі (що супроводжується відповідним зростанням частоти), напруга у вузлі спільного підключення практично знижується до нуля, а генератор, що запускається, досягає лише незначного значення швидкості – близько 0,006 відносних одиниць.

					КНУ.РБ.141.26.250с-11.02	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наведені на рис. 2.10–2.12 залежності характеризують процес прямого пуску восьмої ВЕУ в автономній системі електропостачання, яка до моменту пуску вже містить сім паралельно працюючих ВЕУ. Такий режим є одним із найбільш складних для автономної ВЕС, оскільки пуск АГ супроводжується значним споживанням реактивної потужності, появою підвищених пускових струмів і різкою зміною балансу активної та реактивної потужностей у вузлі спільного підключення.

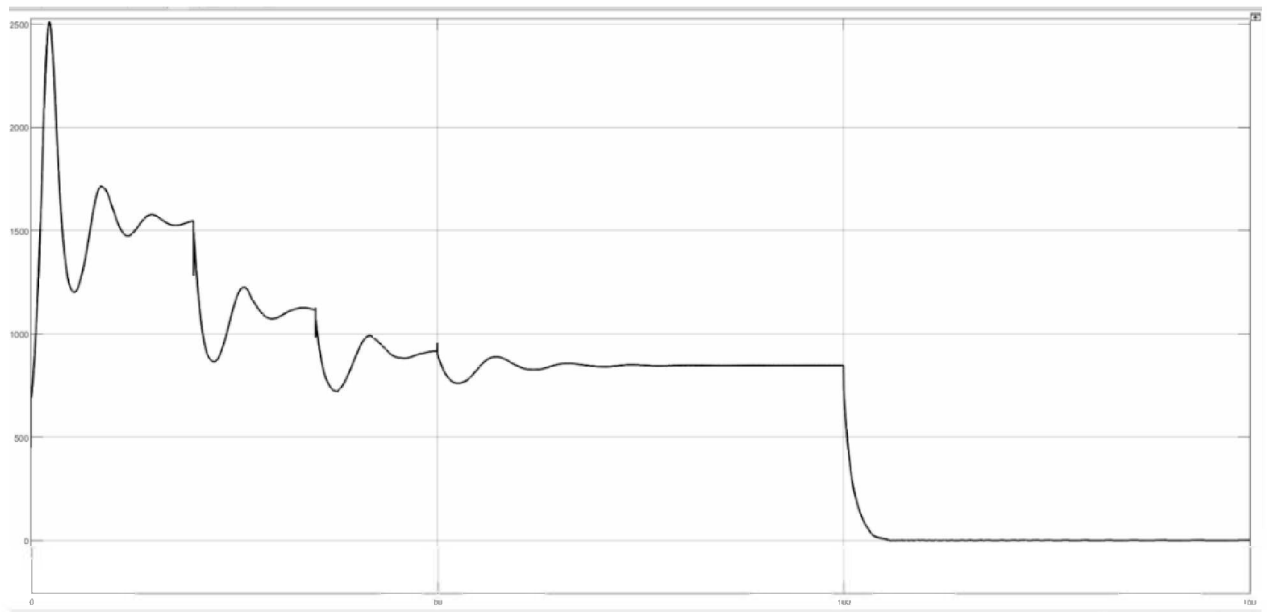


Рисунок 2.10 – Графік величини напруги в загальній точці автономної енергосистеми

З рис. 2.10 видно, що в момент підключення додаткової ВЕУ напруга в загальній точці автономної енергосистеми зазнає глибокого провалу. Початкові коливання напруги мають виражений перехідний характер, після чого рівень напруги поступово знижується. У момент прямого пуску восьмої установки напруга практично падає до нульового значення, що свідчить про втрату електричної стійкості системи. Такий характер процесу пояснюється тим, що АГ, який запускається, на початковому етапі поводить себе як асинхронний двигун із великим пусковим струмом. У результаті різко зростає споживання реактивної потужності, а наявної ємнісної компенсації та генеруючої потужності інших ВЕУ виявляється недостатньо для підтримання напруги.

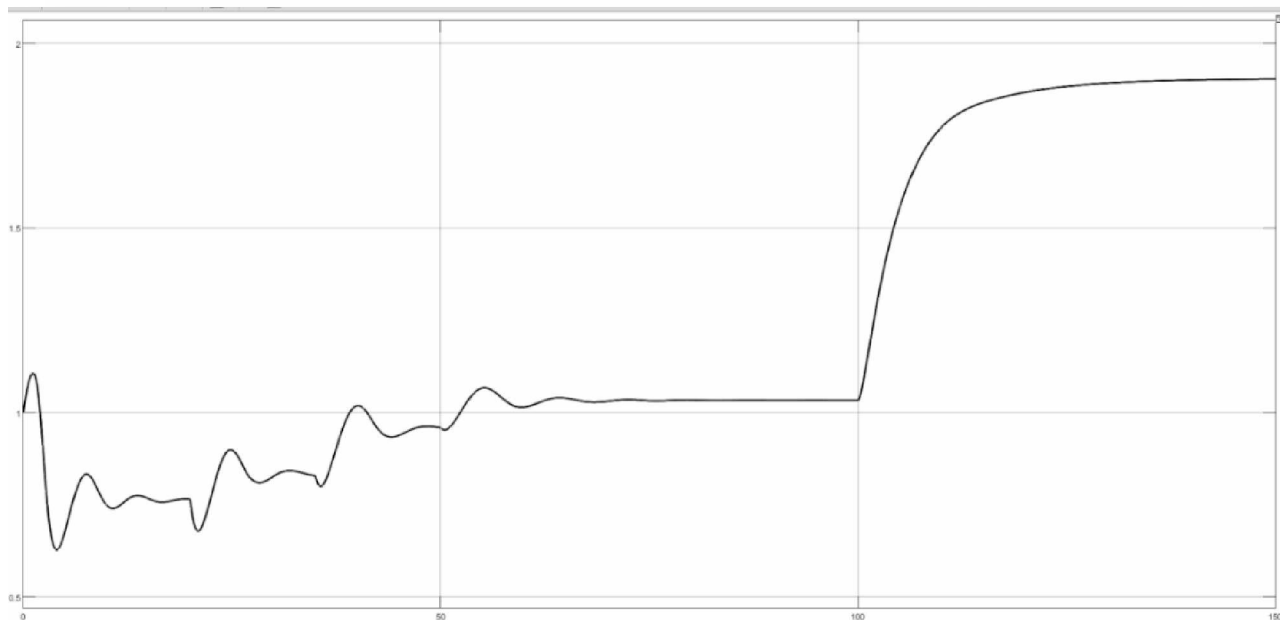


Рисунок 2.11 – Графік швидкості будь-якого АГ з інших 7 ВЕУ

На рис. 2.11 показано зміну швидкості будь-якого АГ з семи ВЕУ, що вже працювали у складі станції до моменту пуску додаткової установки. Графік демонструє, що внаслідок різкого порушення режиму роботи мережі швидкість обертання діючих генераторів суттєво зростає. Це можна пояснити різким зменшенням електромагнітного моменту навантаження при провалі напруги: механічна потужність від вітротурбін у цей момент продовжує надходити на вали генераторів, однак електрична потужність у мережу передається неефективно. Унаслідок цього виникає розбалансування між механічним і електромагнітним моментами, що призводить до прискорення роторів працюючих генераторів.

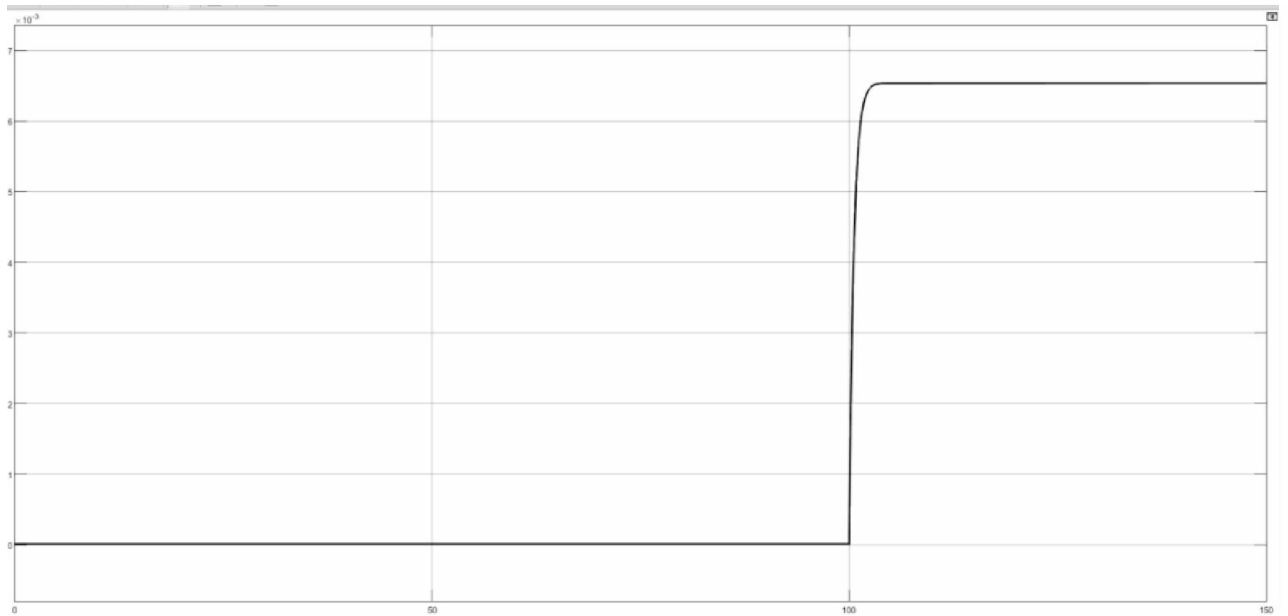


Рисунок 2.12 – Графік швидкості АГ, що запускається

Рис. 2.12 характеризує процес зміни швидкості АГ, який запускається. Як видно з графіка, навіть після подачі команди на пуск генератор не набирає необхідної швидкості обертання. Його швидкість залишається близькою до нульового значення, що свідчить про фактичну неможливість успішного прямого пуску в умовах автономної ВЕС за заданих параметрів системи. Отже, пряме підключення АГ до автономної мережі без попереднього розгону та без спеціальних засобів обмеження пускового струму є недоцільним, оскільки може призвести до порушення роботи всієї ВЕС.

З цієї причини на практиці застосовують альтернативний підхід – попередній розгін АГ за рахунок вітротурбіни з подальшим його підключенням до мережі [25, 28–30]. За умови дії вітру зі швидкістю 8 м/с тривалість розгону ВЕУ суттєво скорочується, причому сам процес має нелінійний характер. Така нелінійність обумовлена аеродинамічними властивостями турбіни і не пов’язана з параметрами генератора.

Як видно з наведених рисунків, приєднання восьмої ВЕУ до системи, що вже містить сім установок, істотно впливає на режим роботи мережі. Зокрема, за зміною швидкості обертання валів АГ можна встановити, що частота в мережі зменшується приблизно на 7,6 %. Для відновлення номінального значення

частоти необхідно здійснювати коригування ємності конденсаторних батарей одночасно для всіх ВЕУ.

На рис. 2.13–2.16 наведено результати моделювання альтернативного способу введення восьмої ВЕУ в роботу, який передбачає попередній розгін АГ за рахунок механічної енергії вітротурбіни з подальшим його підключенням до автономної мережі. Такий підхід є технічно більш обґрунтованим порівняно з прямим пуском, оскільки дозволяє зменшити початкове електромеханічне навантаження на автономну енергосистему.

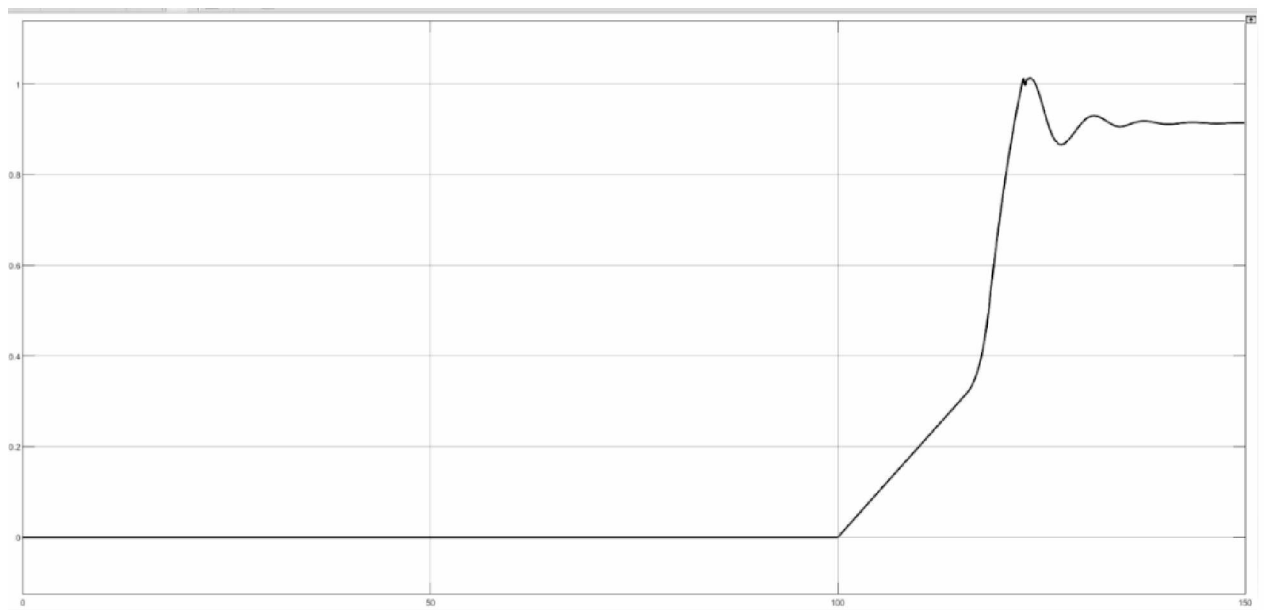


Рисунок 2.13 – Графік швидкості АГ при розгоні від вітряка (підключення АГ до мережі здійснюється біля 120 с)

Як видно з рис. 2.13, швидкість АГ, що запускається, до моменту підключення до мережі поступово зростає під дією вітрового потоку. Процес розгону має нелінійний характер, що зумовлено аеродинамічними властивостями вітротурбіни та залежністю механічної потужності від швидкості вітру і швидкості обертання ротора. Після досягнення необхідної швидкості генератор підключається до мережі приблизно на 120-й секунді. У момент підключення спостерігається короткочасний перехідний процес, після якого швидкість генератора стабілізується на новому рівні.

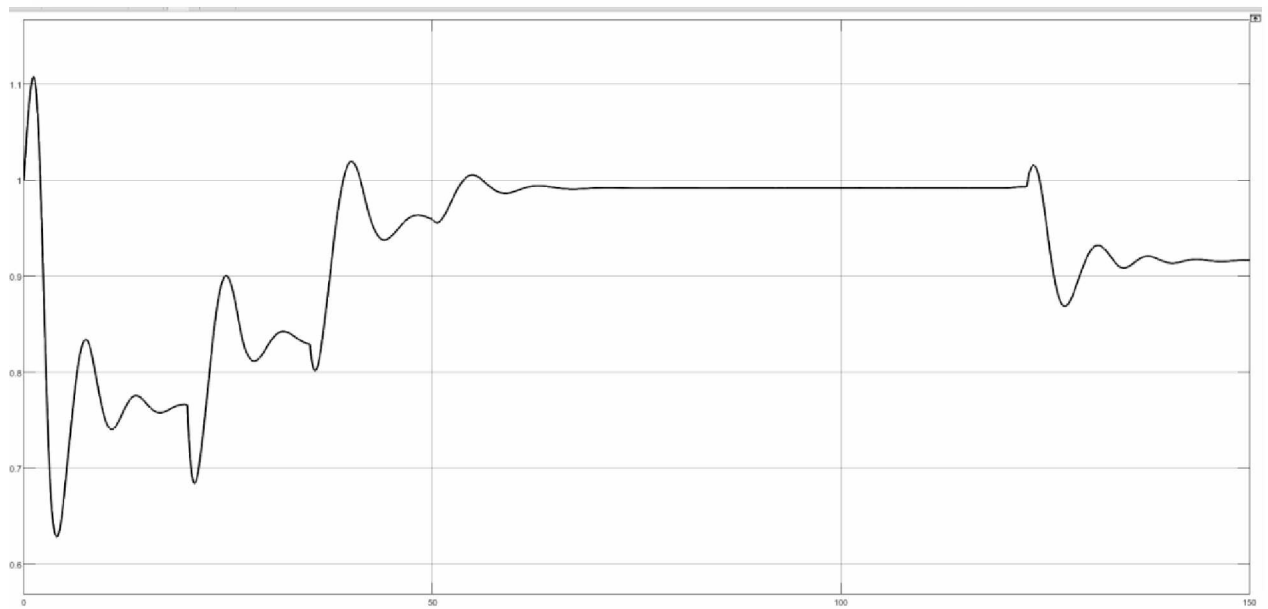


Рисунок 2.14 – Графік швидкості (частоти мережі) решти АГ ВЕС при розгоні додаткової 8-ї ВЕУ

Рис. 2.14 відображає зміну швидкості, а отже й частоти, інших АГ, які вже працювали у складі автономної ВЕС. У період розгону додаткової ВЕУ у системі спостерігаються коливання швидкості, що пов'язані зі зміною балансу потужностей і взаємним електромеханічним впливом паралельно працюючих установок. Після підключення восьмої ВЕУ до мережі швидкість інших генераторів короткочасно зменшується, що відповідає зниженню частоти автономної системи. Це пояснюється тим, що новий генератор після приєднання потребує певної частки реактивної та активної потужності для встановлення сталого режиму, внаслідок чого виникає додаткове навантаження на всю систему.

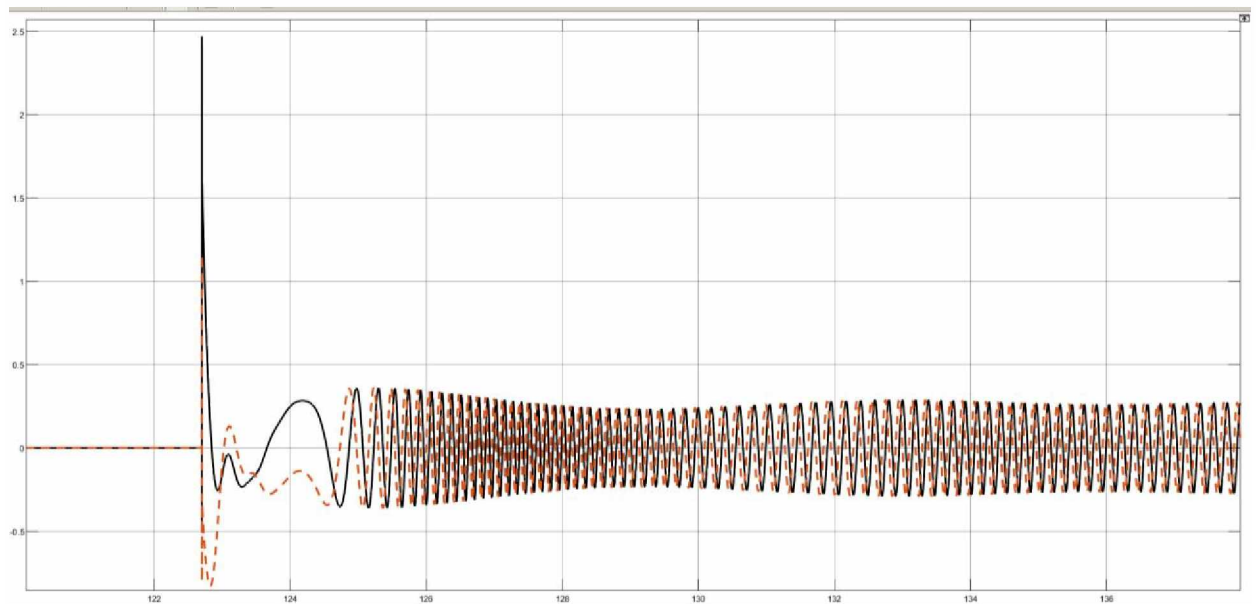


Рисунок 2.15 – Графіки активного та реактивного струмів АГ, що запускається у автономну мережу ВЕС

На рис. 2.15 наведено графіки активного та реактивного струмів АГ, що вводиться в роботу. У момент підключення виникає короточасний струмовий сплеск, після чого струми переходять у коливальний режим із поступовим затуханням. Наявність значної реактивної складової струму є характерною особливістю асинхронної машини, оскільки для створення магнітного поля генератор потребує реактивної потужності. У розглянутій системі джерелом цієї потужності виступають конденсаторні батареї, тому правильний вибір і керування їх ємністю має принципове значення для забезпечення стійкого режиму роботи.

Окремої уваги потребують струми АГ, що вводиться в роботу: їх значення досягають приблизно 2,5 відносних одиниць, що перевищує рівень струмів, характерних для прямого пуску. Водночас напруга у вузлі спільного підключення автономної ВЕС після збурення дещо зростає, що також відображено на відповідному рисунку.

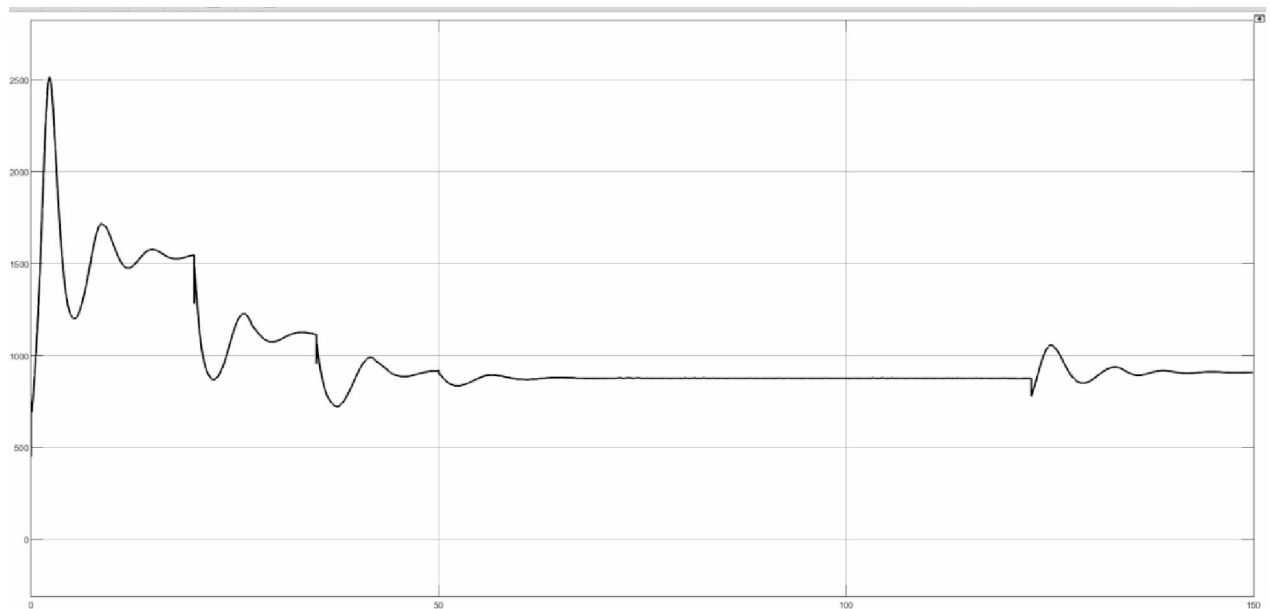


Рисунок 2.16 – Графік напруги в загальній точці автономної системи електропостачання з ВЕС

Рис. 2.16 показує зміну напруги у загальній точці автономної системи електропостачання під час введення додаткової ВЕУ. На відміну від режиму прямого пуску, у цьому випадку провал напруги є менш критичним, а після завершення перехідного процесу напруга поступово стабілізується. Разом з тим графік свідчить, що навіть попередній розгін генератора не повністю усуває вплив пускового процесу на електричний режим автономної ВЕС. Тому для практичного застосування такого способу доцільно передбачати автоматизоване керування ємністю збудження, контроль напруги у вузлі спільного підключення та узгодження моменту підключення генератора з поточним режимом роботи станції.

2.5 Аналіз автоколивань частоти в автономній вітроенергетичній станції

У процесі багатоваріантного моделювання на основі схеми (рис. 2.6) спостерігалися режими, за яких система переходила в стан автоколивань. Хоча амплітуда цих коливань була незначною (як показано на рис. 2.17), такий режим

доцільно вважати небажаним. Найчастіше подібні явища виникали під час підключення чергового ступеня навантаження.

Звертає на себе увагу те, що автоколивання можуть з'являтися навіть при відносно малих приростах навантаження. Зокрема, у випадку, наведеному на рис. 2.17, підключення перших чотирьох ступенів по 250 кВт не супроводжується особливими ефектами – перехідні процеси швидко згасають (ці ділянки не відображені на графіках з метою скорочення часу розрахунку). Водночас введення останнього ступеня потужністю лише 50 кВт (що у 5 разів менше за попередній і у 20 разів менше за сумарне навантаження) призводить до появи слабких автоколивань у всій системі ВЕС.

При цьому навіть незначне збільшення навантаження або інше збурення, наприклад підключення останнього ступеня потужністю 75 кВт замість 50 кВт, дозволяє повністю уникнути виникнення автоколивальних режимів.

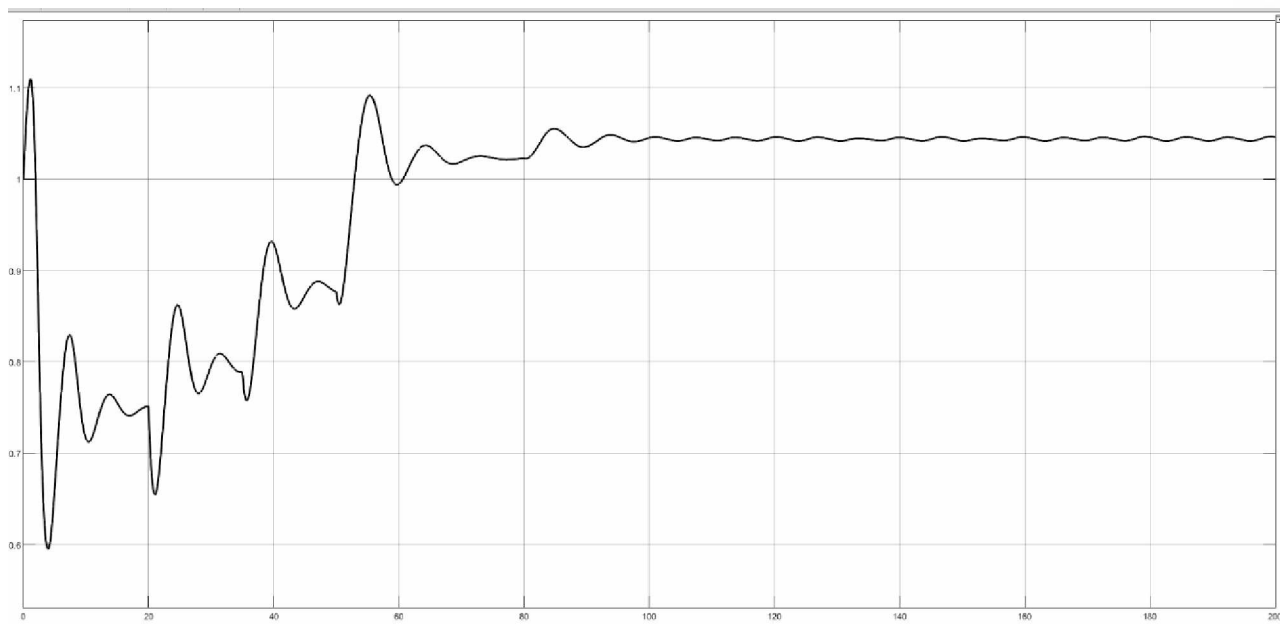


Рисунок 2.17 – Графік швидкості будь-якої ВЕУ при ступінчастому накиді навантаження

На рис. 2.17 наведено зміну швидкості будь-якої ВЕУ при ступінчастому накиді навантаження в автономній системі ВЕС. Цей графік характеризує появу автоколивальних процесів, які можуть виникати у системі навіть при відносно малих змінах навантаження. Особливість такого режиму полягає в тому, що

після завершення основного перехідного процесу швидкість обертання не повертається до повністю сталого значення, а продовжує коливатися з невеликою амплітудою.

Фізично виникнення автоколивань можна пояснити взаємодією декількох факторів: інерційності вітротурбін, електромагнітної інерції АГ, дискретного характеру зміни навантаження та особливостей ємнісного збудження. При підключенні чергового ступеня навантаження змінюється баланс активної потужності, що викликає зміну швидкості обертання генераторів. Одночасно змінюється режим споживання і компенсації реактивної потужності, від якого залежить рівень напруги та електромагнітний момент асинхронних машин. Якщо система не має достатнього демпфування, ці взаємопов'язані процеси можуть підтримувати один одного, формуючи слабкі, але тривалі коливання частоти.

З практичної точки зору автоколивальний режим є небажаним навіть за малої амплітуди. Він може призводити до погіршення якості ЕЕ, додаткових механічних навантажень на вали, муфти, редуктори та підшипникові вузли, а також до нестійкої роботи систем автоматичного керування. Для промислових споживачів це особливо важливо, оскільки технологічне навантаження часто має дискретний або змінний характер, а тому може періодично створювати умови для виникнення подібних режимів.

Отже, аналіз рис. 2.17 підтверджує необхідність не лише підтримання середніх значень напруги та частоти, а й забезпечення достатнього демпфування перехідних процесів. Для цього доцільно застосовувати координоване керування кутом встановлення лопатей, ємністю конденсаторних батарей і ступенями навантаження. Крім того, у системі керування автономною ВЕС необхідно передбачати алгоритми виявлення автоколивань і коригування параметрів регулювання у разі їх появи.

					КНУ.РБ.141.26.250с-11.02	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі виконано виконано аналіз та дослідження режимів функціонування ВЕУ у складі ВЕС, що можуть бути інтегровані в електроенергетичні мережі промислових підприємств. Встановлено, що використання ВЕС є перспективним напрямом підвищення енергоефективності, надійності та енергетичної стійкості промислових об'єктів, особливо для гірничорудних і гірничо-металургійних підприємств. Такі підприємства характеризуються значним електроспоживанням, територіальною розосередженістю споживачів, наявністю віддалених технологічних дільниць і складними режимами роботи електроприймачів.

У першому розділі проаналізовано актуальний стан розвитку вітроенергетики України та перспективи впровадження ВЕС у системи електропостачання промислових підприємств. Показано, що в сучасних умовах вітрова генерація може розглядатися не лише як джерело відновлюваної ЕЕ, а й як засіб децентралізації електропостачання, зменшення залежності від зовнішньої енергосистеми та підвищення стійкості виробничих процесів. Обґрунтовано доцільність застосування автономних і локальних джерел генерації для живлення віддалених споживачів, зокрема відвалів, шламосховищ та допоміжних виробничих дільниць.

Розглянуто основні режими роботи ВЕУ: автономний, локальний та мережевий. Встановлено, що для промислових підприємств найбільший практичний інтерес становлять автономні та локальні режими, оскільки вони дозволяють частково покривати власне навантаження, зменшувати втрати в протяжних лініях електропередачі та підвищувати надійність живлення окремих груп споживачів.

Водночас автономний режим є найбільш складним з погляду стабілізації напруги та частоти, оскільки параметри системи безпосередньо залежать від швидкості вітру, навантаження, характеристик генератора і засобів компенсації

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.В		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Кабанов О.О.				Висновки	Літ.	Арк.
Перевірів	Дозсренко О.В.						54
							2
Н. Контр.	Дозсренко О.В.					КНУ гр. ЕЕМ-23ск	
Затвердж.	Пересунько І.І.						

реактивної потужності.

У другому розділі обґрунтовано вибір АГ з ємнісним збудженням для дослідження режимів роботи ВЕУ. Такий генератор має просту конструкцію, високу експлуатаційну надійність і може використовуватися в автономних системах електропостачання. Разом з тим його робота потребує підтримання належного балансу активної та реактивної потужностей, оскільки недостатня або надмірна ємність збудження може призводити до зниження напруги, перенапруги або порушення стійкості генераторного режиму.

На основі моделі одиничної ВЕУ встановлено, що зменшення швидкості вітрового потоку призводить до зниження швидкості обертання генератора та падіння вихідної напруги. Регулювання кута встановлення лопатей дозволяє впливати на механічну потужність турбіни, однак цього впливу не завжди достатньо для повної стабілізації режиму. Тому важливим додатковим засобом керування є коригування ємності збудження, яке впливає на реактивну потужність і рівень напруги генератора.

Дослідження автономної ВЕС із паралельно працюючими ВЕУ показало, що робота окремих установок є взаємопов'язаною через спільну електричну мережу. Прямий пуск додаткової ВЕУ може спричиняти значні провали напруги та порушення стійкості системи, тому більш доцільним є попередній розгін генератора від вітротурбіни з подальшим підключенням до мережі. Також встановлено можливість виникнення автоколивань частоти при зміні навантаження, що підтверджує необхідність координованого керування ВЕУ.

Отже, оптимізація режимів роботи ВЕС у мережах промислових підприємств повинна базуватися на комплексному врахуванні швидкості вітру, навантаження, кута встановлення лопатей, ємності збудження та умов паралельної роботи установок. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час проєктування локальних і автономних систем електропостачання промислових підприємств на базі ВЕУ.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.В	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Бойко С. М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств : монографія / С. М. Бойко ; за ред. О. М. Сінчука. – Кременчук : Щербатих О. В., 2020. – 260 с.

[2] Сінчук І. О. Методологічні засади оцінювання електроефективності залізорудних підприємств: монографія, ПП Щербатих. – 2019. 284 с.

[3] Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): Монографія / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О.; Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.

[4] І. О. Сінчук, С. М. Бойко, І. В. Касаткіна, О. В. Дозоренко. Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізорудних підприємств // *Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць.* – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 52. – С. 70–76. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77>.

[5] Енергетична стратегія України на період до 2050 р. / сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. URL: <https://mpe.kmu.gov.ua>.

[6] Українська вітроенергетична асоціація. UWEA releases Ukraine's Wind Power Market Overview 2024. URL: <https://uwea.com.ua/en/news/entry/uvea-vipustila-oglyad-vtroenergetichnogo-rinku-2024>.

[7] Сінчук І.О., Берідзе Т.М., Федотов В.О., Барановська М.Л., Сменова М.Л., Пироженко А.В. Сучасний ринок електричної енергії: Підручник. Курс лекцій. За редакцією доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука – Кременчук: ПП Щербатих О.В. – 2021. – 232 с.

[8] Лежнюк П.Д. Розосереджені джерела електроенергії в електричних мережах / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.А. Ковальчук, В.О. Хоменко // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету.* – 2011. – № 1. – С.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.Л				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Список використаних джерел	Літ.	Арк.	Акрушіє	
Розробив		Кабанов О.О.							
Перевірів		Дозренко О.В.					56	4	
						КНУ гр. ЕЕМ-23ск			
Н. Контр.		Дозренко О.В.							
Затвердж.		Пересунько І.І.							

104–108.

[9] Денисюк С.П., Дерев'янка Д.Г., Горенко Д.С. Особливості оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами. *Енергетика: економіка, технологія, екологія*. №1, 2020. С.7-20. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217558>.

[10] Reuters. Ukraine approves \$20 billion plan to increase renewable energy production by 2030. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/ukraine-approves-20-bln-plan-increase-renewable-energy-production-by-2030-2024-08-13>.

[11] Reuters. Ukraine energy firm DTEK plans \$470 million wind farm expansion. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/ukraine-energy-firm-dtek-plans-470-million-wind-farm-expansion-2025-01-22>.

[12] Reuters. Ukraine's DTEK buys 200MW energy storage systems in bid to limit outages. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/ukraines-dtek-buys-200mw-energy-storage-systems-bid-limit-outages-2025-01-13>.

[13] Бойко С.М., Сінчук І.О., Жуков О.А., Савицький О.І. Комплексне використання відновлювальних джерел енергії: Підручник. За редакцією доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука – Кривий Ріг: ПП Щербатих О.В. – 2021. 204 с.

[14] Бойко, С. М. Особливості електропостачання залізорудних підприємств при впровадженні розосередженої генерації / С.М. Бойко, Борисенко, Некрасов, Городній, Касянов // *Технічні науки та технології : науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т.* – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – № 2 (16). – С. 118-128.

[15] Сінчук О.М. Аналіз факторів впливу на основні енергетичні характеристики вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, А.О. Онищенко // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* – 2020 – Том 31 (70) № 2. – С. 256-262.

[16] Півняк Г. Г., Білий М. М., Бажін Г. М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008. – 550 с.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.Л	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

[17] Електрифікація гірничих робіт: Підручник. - Вид. 2-е, допрац. та доп. / Г. Г. Півняк, М. М. Белий, Л. П. Ворохов, В. Т. Заїка, Ю. М. Зражевський, Ю. Т. Разумний, А. Я. Рибалко, В. І. Тесленко, Ф. П. Шкрабець ; За ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. 615 с.

[18] І. О. Сінчук, Э. С. Гузов, В. А. Кольсун, В. С. Козлов, С. М. Бойко, та О. Є. Мельник, Енергозбереження на підприємствах гірничовидобувної промисловості. Проблеми, шляхи реалізації: Монографія. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2016.

[19] Сінчук, О.М. До питання проектування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, М. М. Федь // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2020 – Том 31 (70) № 3. – С. 153-157.

[20] Сінчук О. М., Бойко С. М., Краснопольський Р. І. До питання формування джерел розосередженої генерації в умовах залізрудних підприємств. *Вісник Криворізького національного університету*, 2020. № 50. С. 41-45.

[21] Energy-efficient system of power supply of remote consumers of mining and concentration plants: monograph / I. Sinchuk, O. Dozorenko, M. Baranovska, O. Zamytskyi, P. Polishchuk. Warsaw: iScience Sp. z.o.o. 2023. 107 p.

[22] І. О. Сінчук, Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2018. – 166 с.

[23] Ю. Г. Вілкул, А. А. Азарян, В. А. Колосов, Ф. І. Караманиць, та А. С. Батарєв, «Сучасний стан залізрудної галузі, прогноз розвитку та пропозиції», *Качество минерального сырья. Сб. науч. тр.*, т. 1, с. 9-24, 2017.

[24] Operating modes of mining enterprises. Condition, problems.: monograph / O. Dozorenko, I. Peresunko, O. Mykhailenko, V. Fedotov, A. Pyrozhenko. Warsaw: iScience Sp. z.o.o. 2023. 114 p.

[25] Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.Л	Арк.
ЗМН.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

[26] Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах : монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : Вінниця : ВНТУ, 2014. – 204 с. ISBN 978-966-641-577-9.

[27] Берідзе Т.М. Дослідження критеріїв оцінювання якісних показників електропостачання промислових підприємств / Берідзе Т.М., Касаткіна І.В., Бойко С.М. // *Вісник Криворізького національного університету*: зб. наук, праць, Кривий Ріг, вип. 57, 2023. с. 121-127.

[28] Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Під заг. ред. Шидловського А.К. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 559 с.

[29] Сьомочкин А. Б. До форматизації варіантів керування вітроелектричною установкою / А. Б. Сьомочкин, О. В. Дозоренко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. – Кременчук: КрНУ, 2022. – Вип. 1/2022 (57). – С. 46-54. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.1.57.46-54>.

[30] Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. ISBN 978-966-999-077-8.

					КНУ.РБ.141.26.250с-6.Л	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		