

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ  
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ З УРАХУВАННЯМ СТІЙКОСТІ РІВНІВ  
НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЕМ- 20 Ілля КОВАЛЕНКО

Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Владислав  
ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2024 p.

## **ЗАЯВА**

### **щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи**

Я, КОВАЛЕНКО Ілля Юрійович, здобувач вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка заявляю, що моя кваліфікаційна робота, яка подана до екзаменаційної комісії для публічного захисту, виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше кваліфікаційних робіт, кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим Положенням про академічну доброчесність у Криворізькому національному університеті. Згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску письмової роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

14 червня 2024 р.

\_\_\_\_\_

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

КОВАЛЕНКО Ілля Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесів функціонування вітроенергетичних джерел з урахуванням стійкості рівнів напруги в електричній мережі»

2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2024 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Мета роботи – розробка системи широтно-імпульсного перетворювача – двигун постійного струму у комплексі електровоза ВЛ – 11. Завдання кваліфікаційної роботи: з'ясувати структуру існуючих типів перетворювачів; проаналізувати технічні засоби існуючі системи для роботи тягового електроприводу електровозу ВЛ-11; розробити концептуальні рішення щодо модернізації електротехнічного комплексу електровоза ВЛ-11

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

1. Загальні поняття про розподілені генерації. 2. Основні схеми та характеристики вітрової генерації. 3. Вплив вітрової генерації на стійкість електроенергетичної системи. 4. Основні схеми систем генерації електроенергії на основі вітроенергетичними установками (ВБУ) 5. Моделювання системи.

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

1. Розвиток відновлюваної енергетики в Україні 2. Особливості вироблення вітрової енергії. 3. Основні схеми систем генерації електроенергії на основі ВЕУ. 4. Моделювання режимів роботи системи ВЕУ

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Пересунько І.І.		
II	Пересунько І.І.		
III	Пересунько І.І.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Загальні поняття про розподілені генерації</i>	<i>3 травня 2021 р.</i>
2	<i>Розвиток відновлюваної енергетики в Україні</i>	<i>6 травня 2021 р.</i>
3	<i>Особливості вироблення вітрової енергії</i>	<i>11 травня 2021 р.</i>
4	<i>Оцінка впливу ВДЕ на енергосистему</i>	<i>13 травня 2021 р.</i>
5	<i>Основні схеми систем генерації електроенергії на основі ВЕУ</i>	<i>17 травня 2021 р.</i>
6	<i>Аналіз структур і вживаності головних схем електричних з'єднань сучасних мережевих ВЕУ</i>	<i>20 травня 2021 р.</i>
7	<i>Вплив вітрової генерації на стійкість ЕЕС</i>	<i>27 травня 2021 р.</i>
8	<i>Моделювання режимів роботи системи ВЕУ</i>	<i>3 червня 2021 р.</i>
9	<i>Моделювання розробленої системи.</i>	<i>10 червня 2021 р.</i>

Дата видачі завдання 30.04.2024 р.

**Здобувач вищої освіти**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Ілля КОВАЛЕНКО**

\_\_\_\_\_ (ПІБ)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Ігор ПЕРЕСУНЬКО**

\_\_\_\_\_ (ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Дослідження процесів функціонування вітроенергетичних джерел з урахуванням стійкості рівнів напруги в електричній мережі»: 43 с., 25 рис., 22 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – аварійні режими вітроенергетична установка та їх вплив на стійкість напруги в мережі.

У першому розділі розглянуто розвиток відновлювальних джерел енергії в Україні, їх перспективи та основні напрями. Також узагальнено плани щодо побудови вітроенергетичних систем та їх інтеграції в загальну електроенергетичну систему країни.

У другому розділі проведено аналіз різноманітних конструкцій вітроенергетичних установок і типів електрогенераторів, які використовуються, а також розглянуто вимоги до систем управління та регулювання. Особливу увагу приділено схемам підключення до електричних мереж і впливу вітрової генерації на стійкість напруги та інші ключові параметри електроенергетичних систем.

У третьому розділі проведено моделювання основного режиму генерації вітроенергетичних установок з урахуванням зміни навантаження через зміни вітрового потоку. Описано основні характеристики вітроенергетичних установок щодо генерації потужності, вихідної напруги та струму в системі ВСУ. Також розглянуто стратегії компенсації короточасних провалів напруги, які можуть впливати на енергетичну систему.

### ГЕНЕРАТОР, ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, СИСТЕМА

ГЕНЕРАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, АСИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР.					
ЕГФ.КНУ.РВ.141.24.303-07					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
Розробив		Коваленко І.			
Перевірів		Пересуцько І.І			
Н. Контр.		Пересуцько І.І			
Затвердж.		Пересуцько І.І			
Реферат			Літ.	Арк.	Акрушів
				5	1
			КНУ гр. ЕЕМ-20		

# ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1. Загальні поняття про розподіленої генерації .....	10
1.1. Загальні відомості про джерела розподіленої генерації .....	10
1.2 Розвиток відновлюваної енергетики в Україні .....	13
1.3 Особливості вироблення вітрової енергії.....	14
1.4 Оцінка впливу ВДЕ на енергосистему.....	17
Висновки до 1 розділу. ....	19
РОЗДІЛ 2. Основні схеми та характеристики вітрової генерації.....	20
2.1. Основні схеми систем генерації електроенергії на основі ВЕУ .	20
2.2 Аналіз структур і вживаності головних схем електричних з'єднань сучасних мережевих ВЕС.....	26
2.3 Вплив вітрової генерації на стійкість ЕЕС.....	29
Висновки до 2 розділу .....	30
РОЗДІЛ 3. Моделювання режимів роботи системи ВЕУ .....	32
3.1. Моделювання аеромеханічної частини .....	32
3.4 Моделювання основних характеристик ВСУ .....	33
Висновки до 3 розділу .....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-07					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст			Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив	Коваленко І.							6	1	
Перевірів	Пересунько І.І									
Н. Контр.	Пересунько І.І							КНУ		
Затвердж.	Пересунько І.І							гр. ЕЕМ-20		

## ВСТУП

Сучасна енергетика переважно базується на невідновлювальних джерелах енергії, які мають обмежені запаси, є вичерпними і не можуть забезпечити стійкий розвиток світової енергетики у довгостроковій перспективі. Крім того, їх використання є одним із головних факторів, що призводить до погіршення стану навколишнього середовища та його кризового стану.

З 2004 року у світі значно зросли капіталовкладення в розвиток альтернативної енергетики. Це призвело до того, що за останні роки щорічні показники приросту виробництва сонячної енергії в середньому оцінюються у 60%, вітрової – 27%, етанолу – 20%. Країни ЄС планують до 2020 року довести використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до 20% загального обсягу їхнього енергоринку.

Україна не залишилась осторонь світових тенденцій. Сьогодні, завдяки державному стимулюванню, спостерігається інтенсивна розбудова ВДЕ, які інтегруються до електроенергетичної системи на рівні розподільних електричних мереж. Це сприяє поступовому переходу від суто централізованої моделі електропостачання споживачів, основою якої є потужні ТЕС і АЕС, до комбінованої моделі, де частина електроенергії виробляється розосередженими джерелами. Розбудова ВДЕ має як позитивні, так і негативні наслідки для функціонування електроенергетичних систем як України, так і інших країн світу.

ВДЕ мають принципові відмінності, тому їх ефективне використання стає можливим на основі науково обґрунтованих принципів перетворення в різні види енергії, необхідні споживачам. У навколишньому середовищі завжди існують потоки відновлювальної енергії, тому в процесі розвитку відновлювальної енергетики необхідно орієнтуватись на місцеві енергоресурси, вибираючи з них найефективніші. Використання ВДЕ має бути багатоваріантним і комплексним, що дозволить прискорити економічний

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-07			
	розвиток.							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Коваленко І.			Вступ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.І					7	1
Н. Контр.		Пересунько І.І				КНУ		
Затвердж.		Пересунько І.І				гр. ЕЕМ-20		



					КНУ.РБ.141.21.313с-03.01	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1. Загальні поняття про розподілену генерацію

## 1.1. Загальні відомості про джерела розподіленої генерації

В Україні активно впроваджуються нові технології в енергетичному секторі, зокрема інформаційні та діагностичні системи, сучасні засоби вимірювань і управління. Споживачі тепер мають вибір: орієнтуватися на централізовані джерела енергії або використовувати автономні системи. Значна увага приділяється розподіленій генерації, що базується на альтернативних джерелах енергії, таких як вода, сонце та вітер.

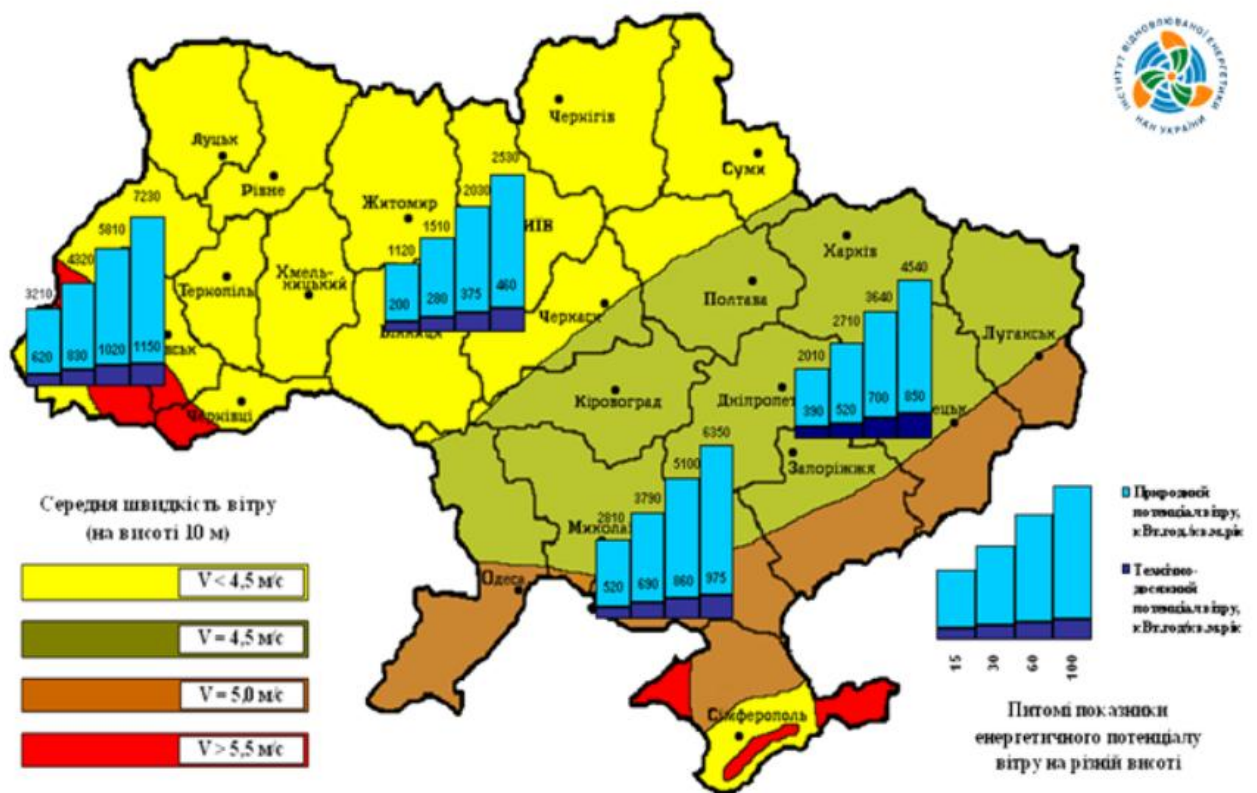


Рисунок 1.1 -Питомі показники енергетичного потенціалу вітру на різній висоті на території України

Розподілені джерела енергії класифікуються за рівнем впливу неконтрольованих факторів навколишнього середовища та первинними

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-07		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1		
Розробив		Коваленко І.					
Перевірів		Пересунько І.І					
Н. Контр.		Пересунько І.І					
Затвердж.		Пересунько І.І			Літ.	Арк.	Акрушів
						8	10
					КНУ гр. ЕЕМ-20		

енергоносіями на кілька типів:

- Відновлювані джерела зі слабо-керованим генеруванням, які використовують відновлювані ресурси, але їхня продуктивність значно залежить від часу доби та погодних умов (вітрові електростанції (ВЕС), сонячні електростанції (СЕС)).

- Відновлювані джерела з керованим генеруванням, які також використовують відновлювані ресурси, проте мають стабільну генерацію протягом встановленого часу (малі гідроелектростанції (МГЕС), геотермальні, біогазові установки).

- Не відновлювані джерела з керованим генеруванням, які здебільшого використовують традиційні джерела енергії, але забезпечують абсолютно контрольований процес генерації (когенераційні установки (КГУ), парогазові та газотурбінні установки (ПГУ, ГТУ)).

Станом на 1 січня 2015 року в Україні встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики, яким призначено «зелений» тариф, становила 1462,2 МВт, з яких у 2014 році було введено 280,6 МВт. За перші шість місяців 2017 року в Україні введено в експлуатацію 126,5 МВт потужностей відновлюваної електроенергетики, що більше, ніж за весь 2016 рік, коли було встановлено 121 МВт.

Таким чином, розвиток розподіленої генерації та впровадження новітніх технологій сприяє підвищенню ефективності енергетичної системи України.

Впровадження альтернативних джерел енергії в електроенергетичних системах має багато переваг, серед яких зниження шкідливого впливу на навколишнє середовище, вирішення проблем із забрудненням відходами під час виробництва електричної енергії, зменшення використання природних ресурсів та розвантаження системоутворюючих і розподільчих ліній електропередач. Однак відновлювані джерела енергії мають і свої недоліки.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.01	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електричні мережі проектувалися для централізованого електропостачання, тому інтеграція в них відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) створює нові проблеми та питання, нетипові для попередніх періодів. Однією з ключових проблем є нестабільне генерування ВДЕ через залежність від погодних умов. Це вимагає вдосконалення систем релейного захисту та автоматики для узгодження електропостачання від ВДЕ та живильних підстанцій електроенергетичної системи.

Вплив ВДЕ на режими розподільчих електричних мереж (РЕМ) суттєво залежить від значення сумарного розосередженого генерування в них, від одиної встановленої потужності ВДЕ, їх типу та місця підключення в електричній мережі. Це можуть бути шини нижчої напруги підстанцій або відгалуження ліній електропередач.

Зіставлення графіків електроспоживання і генерування такими відновлюваними джерелами, як сонячні електростанції (СЕС) та вітрові електростанції (ВЕС), дозволяє говорити про низьку стабільність їхньої роботи для забезпечення балансу потужності в електричній мережі. Це відображено на рисунках 1.2 та 1.3.

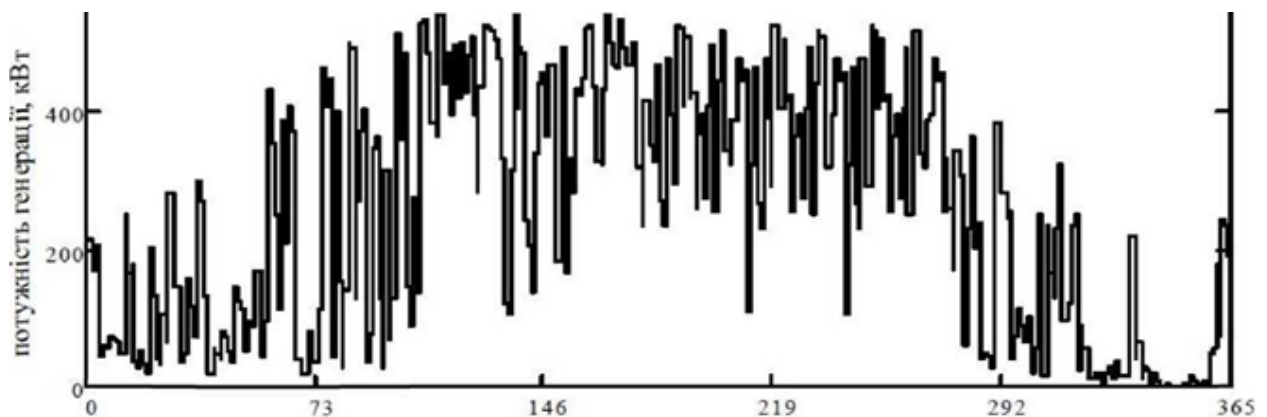


Рисунок 1.2- Характер зміни середніх значень генерації СЕС, визначених за добовими графіками, протягом року

Отже, впровадження ВДЕ вимагає ретельного планування та модернізації існуючих електромереж для ефективної і стабільної роботи всієї енергосистеми.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

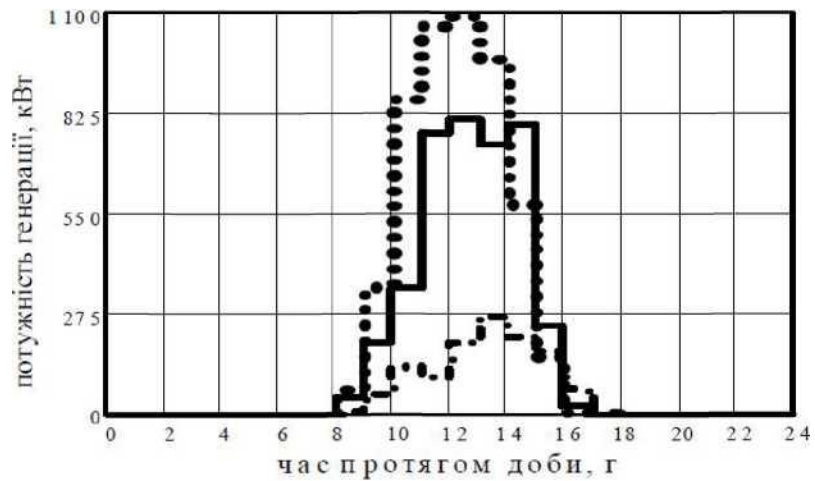


Рисунок 1.3 - Сезонна зміна добового графіка роботи СЕС

### *1.2 Розвиток відновлюваної енергетики в Україні*

За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, на 1 квітня 2019 року встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики в Україні, що працюють за «зеленим» тарифом, склала 3136 МВт. З цієї потужності 862 МВт було введено в експлуатацію за перший квартал 2019 року. Найбільший внесок зробили промислові сонячні електростанції, сумарна потужність яких становила 684 МВт. Динаміку введення об'єктів відновлюваної енергетики за роками можна побачити на рисунку 1.3.

Розвиток відновлюваної енергетики в Україні закріплений на державному рівні. Для підтримки цього напрямку впроваджено «зелений» тариф – спеціальний тариф, за яким скуповується електроенергія, вироблена на об'єктах відновлюваної енергетики. Цей тариф діє як для промислових підприємств, так і для приватних домогосподарств.

Згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2035 року, частка відновлюваних джерел енергії в загальному постачанні енергії повинна становити не менше 12% на 2025 рік і 25% до 2035 року.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.01	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Встановлена потужність об'єктів відновлюваної електроенергетики, що працюють за «зеленим» тарифом, МВт (станом на 01.04.2019)**



Рисунок 1.4 – Дані введення в експлуатацію об'єктів ВДЕ за роками, МВт.

### 1.3 Особливості вироблення вітрової енергії

Вітроенергія вносить додаткову варіативність і невизначеність в енергосистему, що може вплинути на її ефективність та надійність. Варіативність вітру згладжується при великій площі розподілу вітроустановок. Для експлуатації енергосистеми з вітроенергією важливі такі характеристики: інформація про мінливість вітрової енергії, можливості вітротурбін і плановане будівництво вітроустановок.

Прогнозування вироблення вітроенергії базується на ймовірнісному описі випадкового процесу зміни вітроенергетичного потенціалу. Відомо, що вихідна потужність вітротурбіни залежить від швидкості вітру в кубі, тому прогнозування швидкості вітру є ключовим завданням. Вітер характеризується швидкістю, що є випадковою величиною в просторі і часі.

Короткострокове прогнозування вироблення вітроенергії є порівняно новим інструментом у порівнянні з прогнозуванням навантаження, і його рівень точності не такий високий. Для управління енергосистемою важлива не тільки точність прогнозів, але й невизначеність цих прогнозів. Рівень точності

збільшується при прогнозуванні вироблення на більших площах: для одиничної вітроустановки величина помилки варіюється від 10% до 20%, тоді як для прогнозування на великих площах – менше 10%.

Сукупність аерологічних і енергетичних характеристик вітру об'єднується в вітроенергетичний кадастр регіону, який включає середньорічну швидкість вітру, повторюваність швидкостей, вертикальний профіль середньої швидкості вітру, питому потужність і питому енергію вітру, а також вітроенергетичні ресурси регіону.

Зменшення відрізка часу спостереження впливає на невизначеність, при цьому секундова і хвилинна мінливість великої вітроферми зазвичай невисока, тоді як годинна мінливість залишається високою навіть на великій території. Для отримання достовірних даних про середні швидкості вітру необхідно використовувати значні обсяги вимірювань протягом тривалого часу, найдоцільніше – десятирічні обсяги вибірки спостережень.

Варіативність вироблення вітроенергії знижується при збільшенні числа вітротурбін, розподілених по території. Несподівана втрата всієї вітроенергії в системі малоймовірна, оскільки великі площі також зменшують число годин з нульовою вихідною потужністю. Проте несподівана втрата великих обсягів енергії через зниження рівня напруги в мережі може бути відвернена при правильному використанні реактивної потужності вітротурбін.

Таким чином, розвиток вітроенергетики потребує врахування багатьох факторів, таких як мінливість вітру, точність прогнозування, а також економічна доцільність інтеграції вітроенергії в енергосистему. Позитивний вплив вітроенергії може позначитися негативно, коли вартість її інтеграції перевищує допустиму.

Дослідження та обґрунтування ефективного застосування ВДЕ в електричних мережах розглядаються в низці робіт. Очевидно, що на значення

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.01	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

втрат в електричних мережах впливають параметри ВДЕ, схеми їх приєднання, а також обсяг та графік споживання суміжних навантажень.

На рисунку 1.5 наведено можливі схеми приєднання ВДЕ в розподільчих електричних мережах (РЕМ). Ці схеми суттєво відрізняються впливом на потоки потужності, що, у свою чергу, впливає на втрати потужності та електроенергії в мережі.

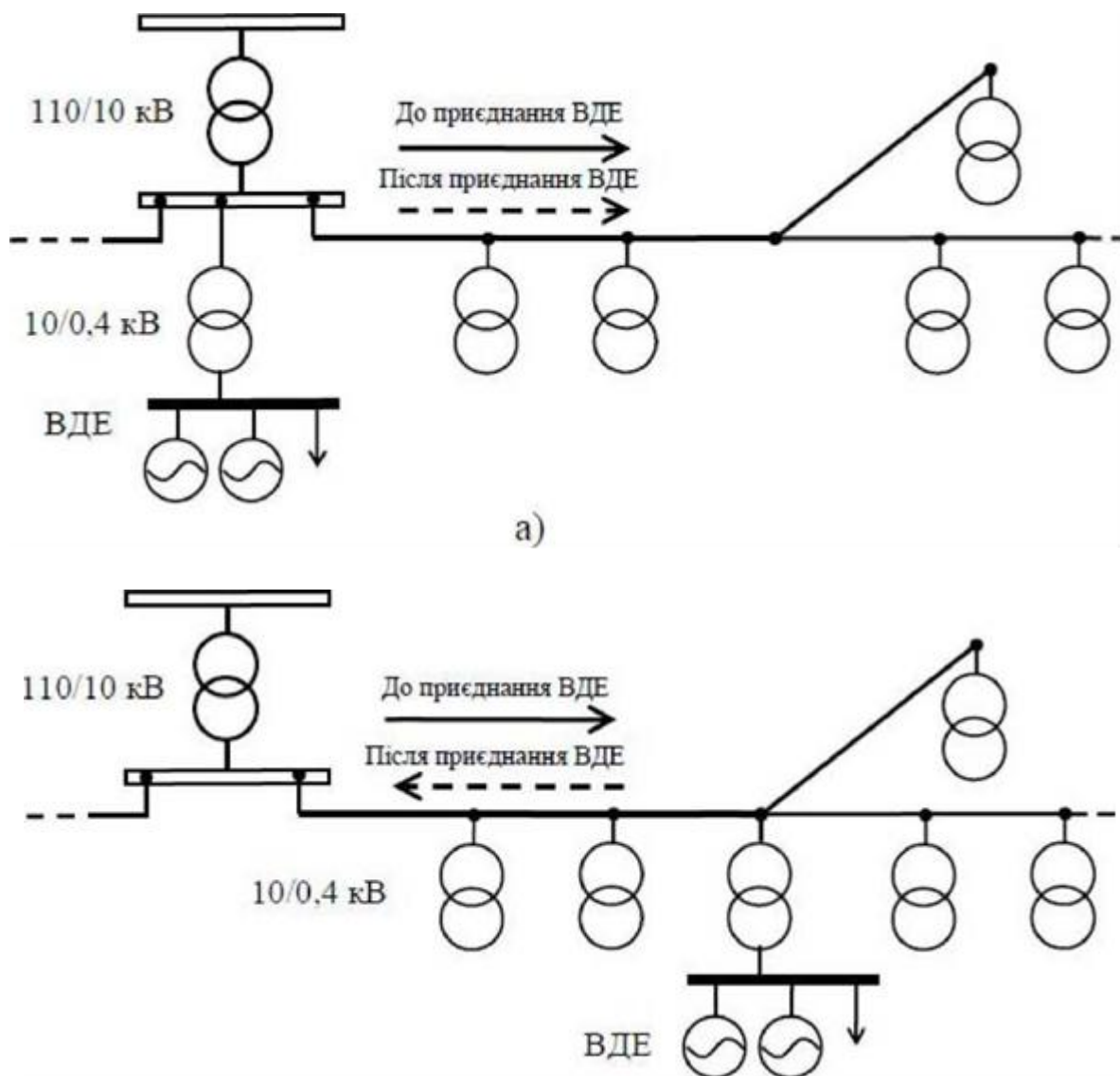


Рисунок 1.5 - Варіанти приєднання ВДЕ в електричній мережі

Наведені в таблиці 1.1 параметри різних типів джерел розподіленої генерації наочно демонструють переваги для загальної електричної мережі. Зокрема, ці джерела забезпечують додаткові резервні потужності енергосистеми під час генерації електроенергії у мережу. Також вони сприяють



підвищенню якості електропостачання, забезпечуючи можливість автономного функціонування під час аварійних відключень в енергосистемі. Додатково, ці джерела дозволяють підтримувати стабільні рівні напруги та потужності в обмежених ділянках загальної мережі під час генерації від відновлюваних джерел.

Таблиця 1.1 - Характеристики джерел РГ на основі НВДЕ

Характеристик	СЕС	ВЕС	МГЕС	ГТУ	ПГУ	ДГ
<b>Наявність</b>	Залежно від географ. положення	Залежно від географ. положення	Залежно від географ. положення	Завжди	Завжди	Завжди
<b>Вихідний сигнал</b>	Постійний струм	Постійний/ змінний струм	Змінний струм	Змінний струм	Змінний струм	Змінний струм
<b>Керування</b>	Некерований	Некерований	Некерований	Керований	Керований	Керований
<b>Перетворювач</b>	Перетворювач типу DC-DC-AC	Перетворювач типу AC-DC-AC	Синхронний або асинхронний генератор	Немає	Немає	Немає
<b>Вид палива</b>	Енергія сонця	Енергія вітру	Енергія річок	Природний та біогаз	Природний та біогаз	Продукти нафти
<b>ККД</b>	6-20%	1-35%	92-94%	30-45%	20-40%	30-45%
<b>Можливість роботи по графіку</b>	Немає	Немає	Немає	Високий	Високий	Високий

#### 1.4 Оцінка впливу ВДЕ на енергосистему

Основні проблеми, пов'язані з якістю електроенергії для кожного з типів джерел РГ відзначені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Проблеми з якістю електроенергії, викликані наявністю  
НВДЕ

Порушення якості електроенергії	ВЕС	СЕС	МГЕС	ДГ
Провисання/ стрибки напруги	+		+	+
Падіння/перенапруга	+			+
Дисбаланс напруг		+		
Коливання напруги	+			
Гармоніки напруги	+	+	+	
Флікер	+	+		+
Гармоніки струму	+	+	+	
Переривчатий характер генерації	+	+		

Різні види вітротурбін мають різні регульовальні характеристики і, відповідно, різні можливості для підтримки синхронізму в системі в нормальному і аварійному режимі. Це стосується контролю напруги і потужності, а також реакції вітротурбін на різні аварійні ситуації і збої. Розташування вітрових електростанцій відносно центрів навантаження також впливає на системну стійкість. Для забезпечення стійкості системи за допомогою вітротурбін необхідні інструменти, схожі на ті, що використовуються в енергосистемах з традиційними генераторами. Подальші дослідження щодо забезпечення стійкості енергосистем з різними видами вітротурбін і використанням нових компонентів на вітрових електростанціях або найближчих шинах є критичними [2].

Наочно параметри різних типів джерел розподіленої генерації наведено в табл. 1.1. Ці джерела забезпечують додаткові резервні потужності енергосистеми при генерації електроенергії у мережу, підвищують якість електропостачання і підтримують рівні напруги та потужності в обмежених ділянках загальної мережі під час генерації від відновлюваних джерел.

Дана проблема стосується кількості доступної енергії під час пікових навантажень. Оцінка потреби в генерації включає в себе попит на енергію з боку системи і власні потреби установок. Критерії для оцінки достатності енергії включають математичне очікування втрати навантаження, ймовірність втрати навантаження та математичне сподівання втрати енергії.

Ефективність передачі енергії залежить від розташування вітрових електростанцій відносно навантаження і кореляції між виробленням вітроенергії і споживанням. Вплив вітроенергії на перетоки потужності в мережах може змінювати напрямок потоків енергії, збільшувати або зменшувати втрати енергії. Для максимізації використання існуючих ліній можна застосовувати FACTS технології і контроль вихідної потужності вітротурбін, але для забезпечення передачі всієї енергії може бути необхідне посилення мережі.

### ***Висновки до 1 розділу.***

За оцінками, потенціал вітрової енергії в Україні підтверджено як міжнародними фаховими установами, так і вітчизняними. Прогнозується, що встановлена потужність вітрових електростанцій досягне 321 ГВт. За даними Інституту вітроенергетики НАН України, встановлена потужність може досягти 10 ГВт до 2030 року, що забезпечить виробництво електроенергії на рівні 30 тис. ГВт·год.

Основними рушійними силами розвитку технології вітрової енергетики залишаються технічні вимоги системи при підключенні вітрових електростанцій до мережі та ефективність їх виробництва електроенергії. Крім того, розвиток і вартість силової електроніки відіграють ключову роль у виборі оптимальних схем технічного підключення вітрових електростанцій до електроенергетичних систем.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.01	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2. Основні схеми та характеристики вітрової генерації

### 2.1. Основні схеми систем генерації електроенергії на основі ВЕУ

Використання різноманітних типів генераторів електричної енергії є основною особливістю конструкцій вітрових енергетичних установок (ВЕУ). Це вимагає різних підходів до систем управління і регулювання, а також може потребувати наявності додаткових ступенів перетворення електроенергії перед підключенням до електричних мереж.

Основні схеми сучасних системних ВЕУ включають:

Прямий змінний струм (DC) до змінного струму (AC): Ця схема використовується з генераторами постійного струму, які конвертують енергію безпосередньо до змінного струму через інвертори. Вона проста і ефективна для підключення до мережі.

Постійний струм (DC) безпосереднє підключення (DC-direct): В цій схемі енергія з генераторів DC надсилається безпосередньо до мережі без використання інверторів. Це дозволяє уникнути додаткових втрат через конвертацію.

Змінний струм (AC) безпосереднє підключення (AC-direct): Використання цієї схеми дозволяє генераторам AC підключатися безпосередньо до мережі AC, що спрощує систему і зменшує витрати на обладнання.

Гібридні системи з сонячною енергією: Інтеграція вітрових та сонячних панелей в одну систему дозволяє зменшити залежність від одного джерела та збільшити загальну ефективність генерації.

Кожна з цих схем має свої переваги та обмеження, які варто враховувати при проектуванні та підключенні вітрових енергетичних установок до електричних мереж.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-07			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Коваленко І.</i>			Розділ 2	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Пересунько І.І</i>					18	12
<i>Н. Контр.</i>		<i>Пересунько І.І</i>				КНУ гр. ЕЕМ-20		
<i>Затвердж.</i>		<i>Пересунько І.І</i>						

В загальному випадку вітротурбіна може бути обладнана різними типами генераторів електроенергії. Сучасний попит на електроенергію вимагає використання частотних перетворювачів, що дозволяють забезпечити необхідну якість електропостачання навіть при генерації змінної напруги і частоти. Ось основні типи генераторів, що застосовуються в вітротурбінах:

Асинхронні (індукційні) генератори:

- Асинхронний генератор з короткозамкненим ротором.
- Асинхронний генератор з фазним ротором.
- Індукційний генератор з оптичним керуванням.
- Індукційний генератор подвійного живлення.

Найбільш поширеним типом генератора в вітротурбінах є індукційний генератор. Його перевагами є надійність, простота конструкції і низька вартість. Головним недоліком є необхідність у реактивному намагнічуванні струмів. Асинхронний генератор потребує окремого джерела струму збудження і споживає реактивну потужність, оскільки магнітне поле створюється лише під час роботи в мережі. Ротор індукційного генератора може бути короткозамкненим або фазним.

Синхронні генератори:

- Синхронний генератор з фазним ротором.
- Синхронний генератор на постійних магнітах.

Синхронний генератор має вищу вартість і складніше виконання порівняно з індукційним генератором такої ж потужності. Однак його безумовною перевагою є відсутність споживання реактивної потужності з мережі. Два основних типи синхронних генераторів широко використовуються в вітротурбінах: синхронний генератор з фазним ротором і синхронний генератор на постійних магнітах. Останній широко застосовується завдяки здатності до самозбудження, що дозволяє працювати з високим коефіцієнтом потужності і ефективністю.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, розглянуті можливі майбутні кандидати для використання в вітротурбінах включають:

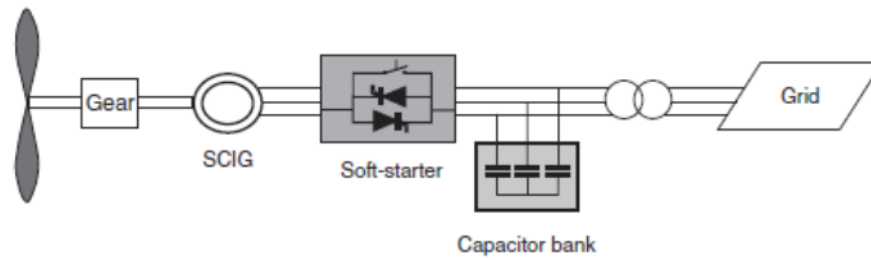
- Високовольтні генератори.
- Генератори з перемикаємим магнітним опором.
- Генератори з перехресним магнітним потоком [3].

Найбільш часто застосовуються конфігурації вітротурбін класифікуються за їх здатності контролювати швидкість і по типу контролю потужності. Застосовуючи контроль швидкості як критерій, можна виділити чотири різних домінуючих типу вітротурбін, як показано на рис. 2.1.

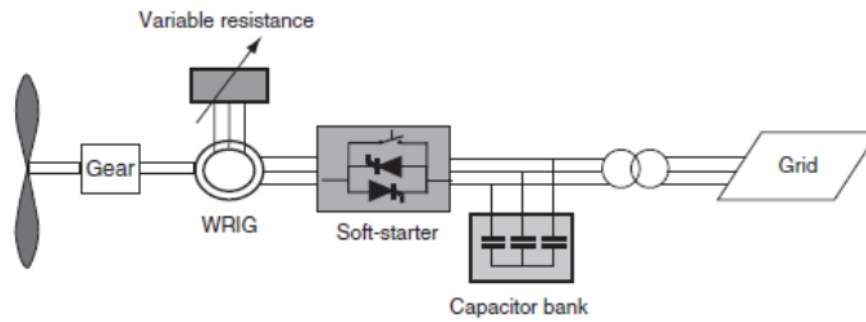
Застосовуючи контроль швидкості як критерій, можна виділити чотири різних домінуючих типи вітротурбін. Найбільш часто застосовуються конфігурації вітротурбін класифікуються за їх здатності контролювати швидкість і по типу контролю потужності. Це показано на рис. 2.1.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

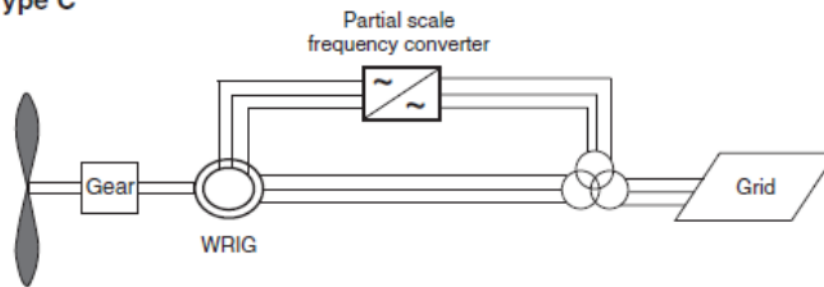
Type A



Type B



Type C



Type D

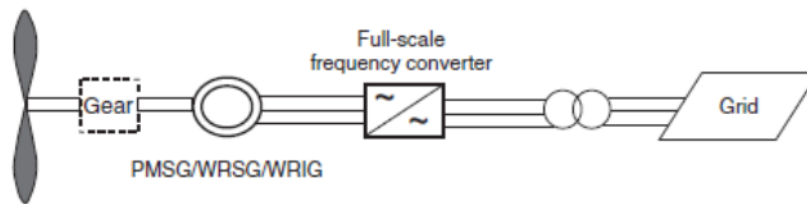


Рисунок 2.1 - Типові конструкції ВЕУ

Конфігурації ВЕУ можуть бути класифіковані за типом контролю потужності: контроль зупинки, контроль нахилу, активний контроль зупинки. Таблиця 2.1 узагальнює різні типи ВЕУ, враховуючи обидва критерії (контроль швидкості і контроль потужності). Кожна комбінація цих двох критеріїв має відповідну назву, і сірими зонами позначені комбінації, що не використовуються в індустрії ВЕУ на даний момент.

Таблиця 2.1 - Концепції вітротурбін

контроль швидкості		контроль потужності		
		контроль зупинки	контроль нахилу	Активний контроль зупинки
Постійна швидкість	Тип А	Тип А0	Тип А1	Тип А2
змінна швидкість	Тип В	Тип В0	Тип В1	Тип В2
	Тип С	Тип С0	Тип С1	Тип С2
	Тип D	Тип D0	Тип D1	Тип D2

Далі в випусковій роботі представлено найрозповсюджені схеми виконання ВЕУ.

Система генерації електричної енергії (СГЕЕ) для вітрових енергетичних установок (ВЕУ) може бути реалізована у різних варіантах, одним з найпростіших є СГЕЕ з постійною частотою обертання. Вона включає в себе:

Редуктор: Використовується для зниження обертової швидкості від вітрового ротора до оптимального рівня для генерації електроенергії.

Асинхронний генератор (АГ) з короткозамкненим ротором (КЗ): Цей тип генератора прямо підключається до електричної мережі. Він характеризується тим, що в номінальному режимі працює у вузькому діапазоні ковзання.

Така конфігурація часто використовується для горизонтально-осьових ВЕУ з трилопатеvim вітровим крилом. Ці типи систем часто мають «саморегулююче» вітрове крило, що досягається за рахунок спеціального профілю лопаті. Наприклад, такі системи, які були розроблені та використовувалися декількома виробниками в Данії у 80-90 роках, отримали назву «Данської» конструкції.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Ця конфігурація дозволяє досягати ефективної роботи в умовах високих швидкостей вітру, забезпечуючи стабільне виробництво електроенергії з вітрових ресурсів.

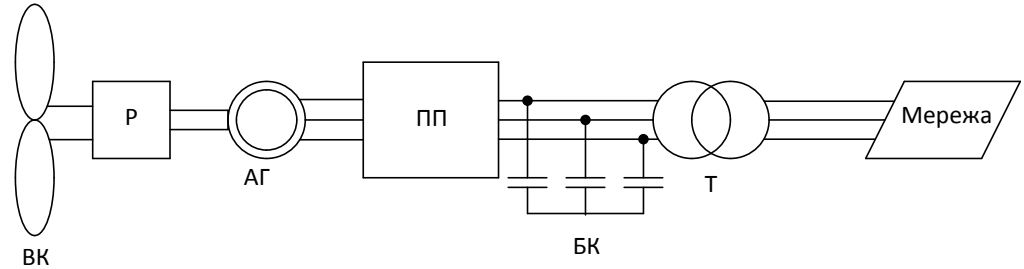


Рисунок 2.2 - СГЕЕ з постійною частотою обертання: ВК - вітроколесо, Р - редуктор, АГ - асинхронний генератор з КЗ ротором, ПП – пусковий пристрій, БК - батарея конденсаторів, Т – трансформатор.

Основними перевагами цієї СГЕЕ є:

- відносна простота і надійність у порівнянні з іншими схемами вітроенергетики;
- дешевизна, що сприяє поширенню цієї технології;
- сталість частоти обертання ВЕУ, яка забезпечується мережею, що дозволяє використовувати як нерегульоване вітроколесо (ВК) зі спеціальним профілем лопаті, так і регульоване ВК з системою регулювання кута установки лопатей ВК;
- відносно простий процес підключення до мережі;
- прямий пуск (розгін) від мережі або за допомогою частотно-регульованих і струмообмежуючих пристроїв.

Ці переваги роблять цю конструкцію привабливою для використання у вітроенергетиці, забезпечуючи надійність, ефективність та економічність у виробництві електроенергії з вітрових ресурсів.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СГЕЕ зі змінною частотою обертання і частковим перетворенням потужності генератора.

Схема СГЕЕ включає в себе асинхронізований синхронний генератор (АСГ) з прямим підключенням статора до мережі, а ротора - через проміжну ланку постійного струму, найчастіше з використанням проміжної ланки постійного струму (див. Рис. 2.2). Ця система відрізняється універсальністю, мінімальною вартістю обладнання і високим коефіцієнтом корисної дії, оскільки тільки частина потужності АСГ (зазвичай близько 25-30%) піддається перетворенню. В номінальному режимі АСГ працюють у діапазоні ковзання приблизно 1%, в той час як для ПЧ цей діапазон значно ширший - до  $\pm 30\%$  [21].

Ця схема СГЕЕ є стандартом для багатьох виробників, таких як Vestas, Gamesa (з винятком моделі ВЕУ потужністю 4,5 МВт), Repower, Nordex. Максимальна можливість видачі або споживання реактивної потужності ВЕУ обмежується гранично допустимим значенням струму ПЧ і рівнем активної потужності, залежно від вітрового режиму. Регулювання реактивної потужності зазвичай може бути реалізоване протягом декількох мілісекунд [22].

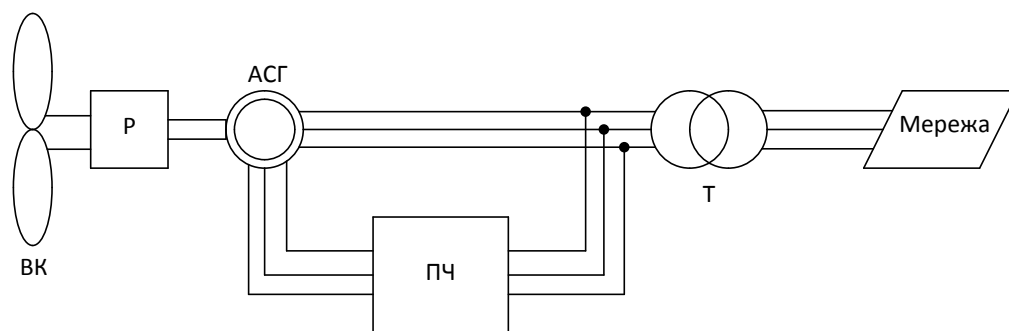


Рисунок 2.3 - СГЕЕ зі змінною частотою обертання на базі АСГ: ВК - вітроколесо, Р - редуктор, АСГ - асинхронізований синхронний генератор, ПЧ - перетворювач частоти, Т - трансформатор.

## 2.2 Аналіз структур і вживаності головних схем електричних з'єднань сучасних мережевих ВЕС

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На відміну від традиційних електростанцій, де первинні і вторинні перетворювачі енергії знаходяться компактно, ВЕС, залежно від їх потужності, можуть займати значні площі. Окремі вітроенергетичні установки розташовуються на різних рівнях по вертикалі і можуть мати протяжність від сотень метрів до декількох десятків кілометрів. Ураховуючи великі потужності сучасних ВЕУ (від 1 до 5 МВт), такий підхід вимагає застосування проміжних ступенів трансформації електричної енергії для зменшення електричних втрат.

Принцип проектування схеми ВЕС полягає в тому, що передача потужності до ЕЕС може бути здійснена для різних потужностей ВЕС через один мережевий трансформатор та одну лінію зв'язку з ЕЕС. Наприклад, якщо напруга в розподільчій мережі ЕЕС поруч з ВЕС становить 110 кВ, то мережевий трансформатор має мати напругу 110/10 кВ або 110/6 кВ, залежно від напруги підвищувальних трансформаторів, які встановлені на ВЕС.

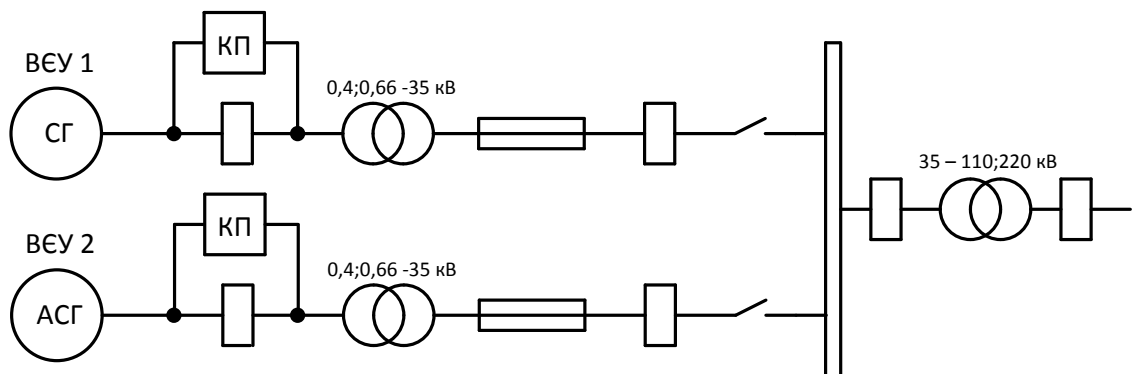


Рисунок 2.4 - Радіальна схема з'єднань ВЕС з ВЕУ з СГЕЕ на базі СГ

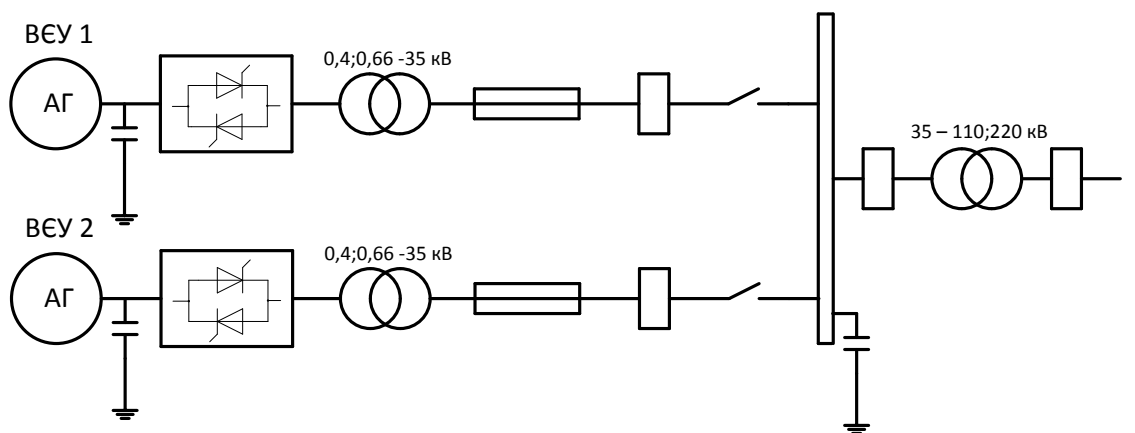


Рисунок 2.5 - Радіальна схема з'єднань ВЕС на базі ВЕУ з СГЕЕ з АГ з КЗ

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

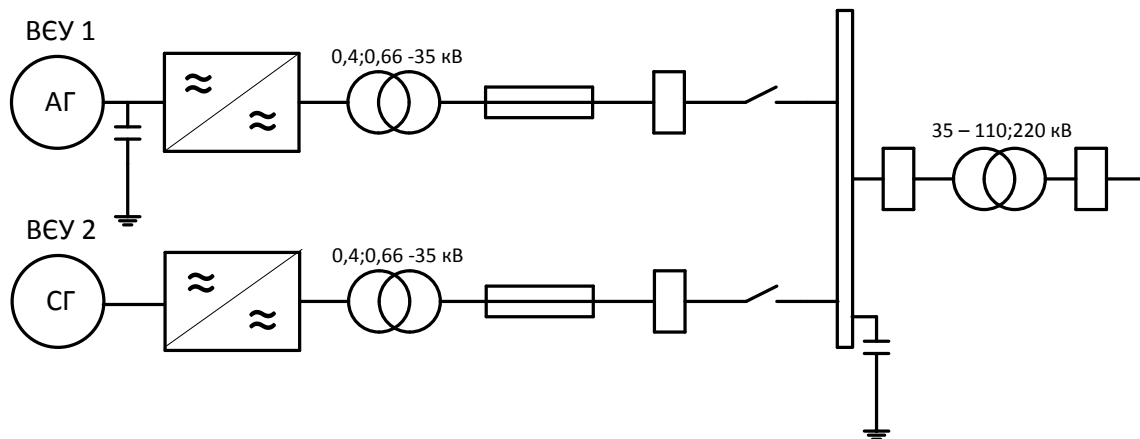


Рисунок 2.5 - Радіальна схема з'єднань ВЕС на базі ВЕУ з СГЕЕ з АГ або СГ змінної частоти обертання і повним перетворенням потужності генератора

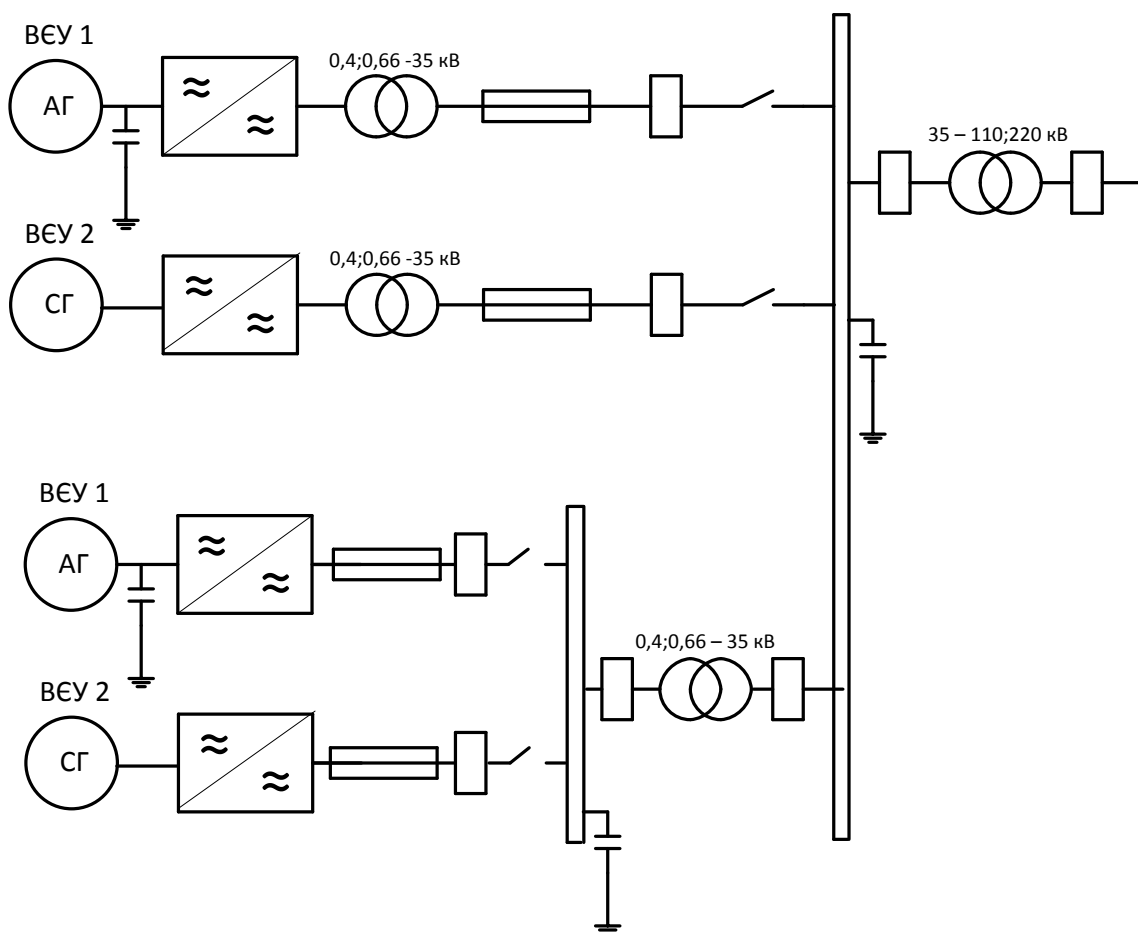


Рисунок 2.7 - Варіант складної розгалуженої радіальної схеми ВП

На сьогоднішній день найбільш поширеними є ВЕУ з одиничними потужностями від 1,5 до 3,5 МВт і генераторами з номінальною напругою на виході 660-690 В та діаметрами вітроколів від 60 до 90 метрів. Простий розрахунок показує, що при таких потужностях генераторів і вказаних

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

довжинах кабельних ліній економічна робота колекторних мереж ВП можлива тільки за умови застосування підвищених робочих напруг. Зазвичай сучасні мережеві ВЕУ оснащені власними підвищувальними трансформаторами, а зв'язок між ВЕУ здійснюється через середню напругу від 6 до 30 кВ.

Структура, характеристики і компоненти схем електричних з'єднань ВЕУ визначаються їхньою потужністю, кількістю та розташуванням на місцевості, а також типом застосовуваних СГЕЕ в ВЕУ. В залежності від цих параметрів мережа зв'язку ВЕУ може бути побудована по магістральному, радіальному або змішаному принципу. Взаємне розташування ВЕУ і відстань між ними в основному визначаються одиничною потужністю ВЕУ і формою траси вітру на розглянутому майданчику.

### ***2.3 Вплив вітрової генерації на стійкість ЕЕС***

При введенні в експлуатацію нових вітроенергетичних потужностей, а також з появою нових споживачів і зростанням вимог до надійності роботи ЕЕС, стає критично важливим перегляд методів та алгоритмів розрахунку перехідних процесів. Необхідно також впровадження нових систем автоматичного регулювання та протиаварійної автоматики для забезпечення динамічної стійкості ЕЕС, що є ключовим фактором надійного електропостачання [14].

При приєднанні великої кількості ВЕУ до конкретної ЕЕС можуть виникати такі проблеми, як зміна напруги, зміна частоти, поява гармонік, коливання активної і реактивної потужності, відключення ліній і ВЕУ. Вирішення цих питань вимагає спеціалізованих методів і механізмів, оскільки інтеграція великого обсягу вітрової генерації в роботу ЕЕС в різних регіонах свідчить про необхідність перегляду існуючих вимог до технічного підключення ВЕС і розробки механізмів оцінки їх виконання [14].

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після аналізу загальних вимог до технічного підключення ВЕС до мережі можна виділити наступні аспекти:

1. Безперебійна робота ВЕС під час провалів напруги.
2. Регулювання напруги, реактивної потужності та коефіцієнта потужності ВЕС.
3. Робочі режими ВЕС при відхиленнях частоти.
4. Контроль активної потужності ВЕС.

Ці вимоги визначаються специфічними умовами експлуатації та можуть варіюватись залежно від характеристик мережі та ВЕС.

### ***Висновки до 2 розділу***

Проведений порівняльний аналіз СГЕЕ сучасних ВЕУ дозволяє виділити наступні фактори, які слід враховувати при виборі ВЕУ і розробці схем функціонування ВЕС, що підключаються до ЕЕС України:

- ВЕУ зі схемами на базі асинхронного генератора з прямим підключенням (АСГ-ПЧ) та синхронного генератора з прямим підключенням (СГ-ПЧ) очікуються домінуючими у мережевій вітроенергетиці в найближчому майбутньому.
- Зниження вартості силової електроніки робить все більш привабливими схеми СГЕЕ з повним перетворенням потужності генератора.
- Вибір регульованих по частоті обертання ВЕУ дозволяє підвищити віддачу потужності при роботі зі змінною швидкістю вітру до 20%.
- ВЕУ з асинхронним генератором (АСГ) та мультиплікатором мають найменшу вагу і є найбільш економічними серед розглянутих схем.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема СГЕЕ на базі синхронного генератора з постійним магнітним збудженням і приводом через ПЧ відрізняється найвищими показниками вироблення електроенергії серед усіх розглянутих схем СГЕЕ.

Схема СГЕЕ на базі багатополюсного синхронного генератора з електромагнітним збудженням і приводом через ПЧ відрізняється великими габаритними показниками і є найдорожчою серед розглянутих схем СГЕЕ.

Після аналізу загальних вимог до технічного підключення ВЕС до мережі можна виділити наступні аспекти:

- Забезпечення безперебійної роботи ВЕС під час провалів напруги.
- Регулювання напруги, реактивної потужності та коефіцієнта потужності ВЕС.
- Робочі режими ВЕС при відхиленнях частоти.
- Контроль активної потужності ВЕС.

Ці вимоги визначаються специфічними умовами експлуатації та можуть варіюватись залежно від характеристик мережі та ВЕС.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.02	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3. Моделювання режимів роботи системи ВЕУ

### 3.1. Моделювання аеромеханічної частини

Виділена потужність ( $Paer$ ) і крутний момент, що розвивається турбіною ( $Caer$ ), виражаються:

Коефіцієнт потужності  $C_p$  представляє частину енергії вітру, захоплену турбіною. Це залежить від двох параметрів, а саме співвідношення швидкості ВК  $\lambda$  та кута нахилу лопатей  $\beta$ , як показано на рис 3.4. Перший параметр представляє співвідношення між швидкістю наконечника леза та швидкістю вітру.  $C_p$  і  $\lambda$ . [18].

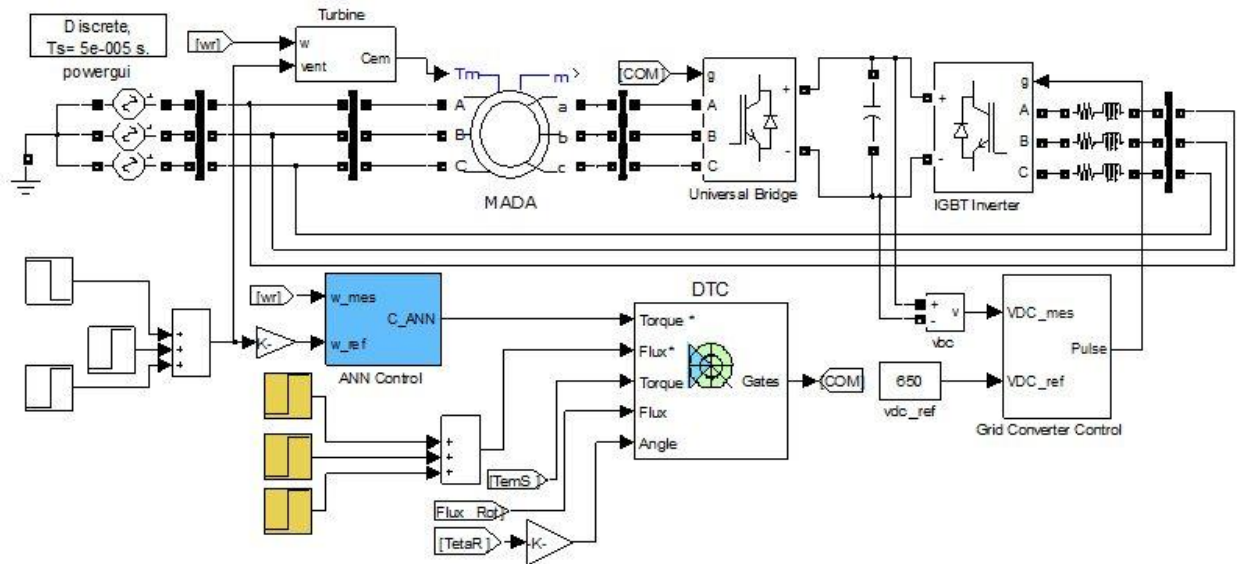


Рисунок 3.1 - Блок схема моделювання ВЕУ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-07			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Коваленко І.				Розділ 3	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І.І						30	11
Н. Контр.	Пересунько І.І					КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.	Пересунько І.І							



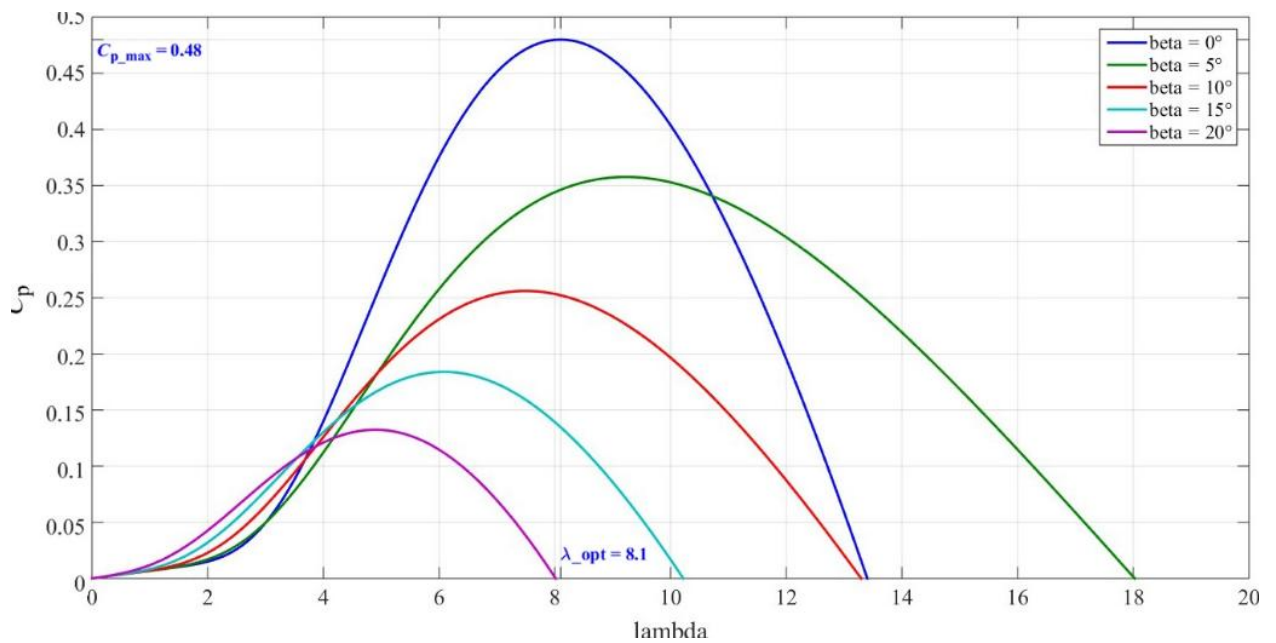


Рисунок 3.2 - Співвідношення швидкості ВК  $\lambda$  та кута нахилу лопатей  $\beta$

### 3.4 Моделювання основних характеристик ВСУ

Основна мета стратегії оптимізації полягає у максимізації видобутку енергії вітру без необхідності вимірювання швидкості вітру. Цей підхід застосовується у випадках, коли швидкість вітру нижче номінального значення  $v_n$ , при якому вітрогенератор генерує свою номінальну потужність ( $v \leq v_n$ ), зберігаючи кут нахилу на нулі [18].

Як показано на рис. 3.3, існує оптимальна швидкість турбіни, за якої досягається максимальна вітрова потужність при заданій швидкості вітру. Тому для підвищення ефективності перетворення вітрової енергії важливо, щоб вітрогенератор працював у режимі змінної швидкості.

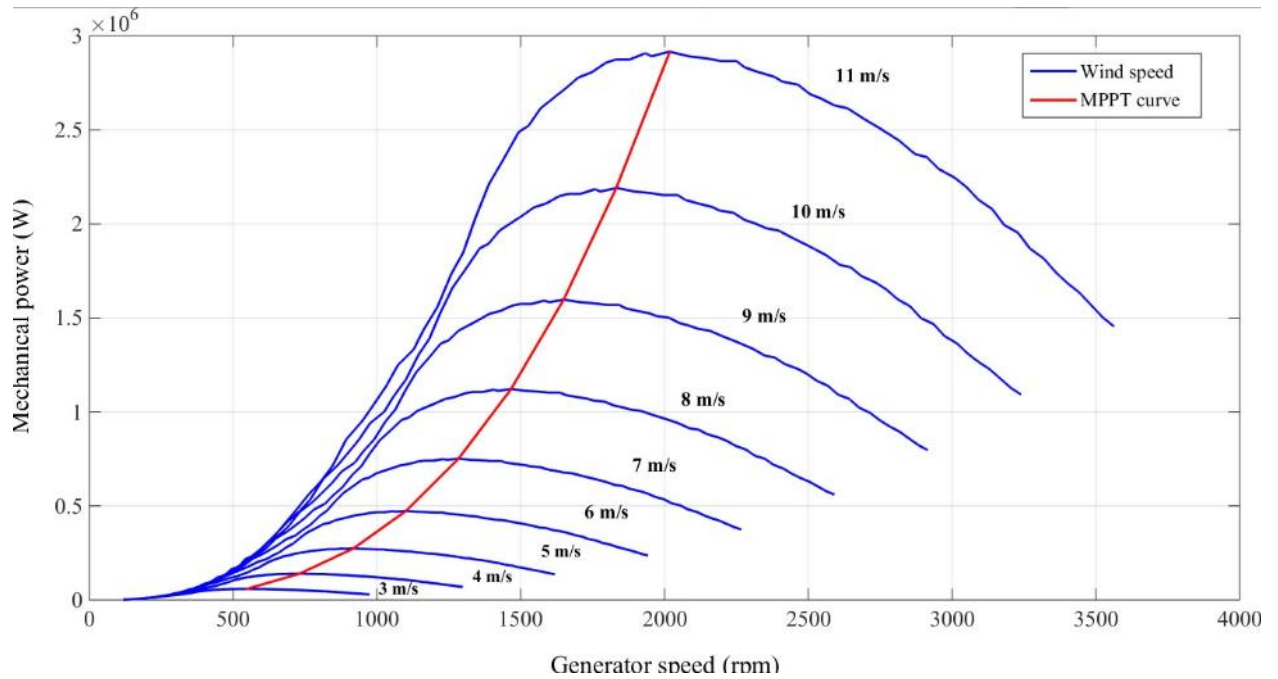


Рисунок 3.3 - Крива відстеження максимальної точки потужності

Для перевірки працездатності запропонованої стратегії був проведений імітаційний тест у середовищі MATLAB/SIMULINK з використанням вітрогенератора моделі потужністю 2 МВт. Параметри системи перераховані в таблиці 3.1. Тривалість випробування становила 10 секунд моделювання.

У першому етапі випробувань проводилося порівняльне дослідження між початковими параметрами та оптимальними параметрами для оцінки ефективності запропонованої конструкції з точки зору швидкості, точності та стабільності. В ході цього випробування аеромеханічна частина та блок видалялися з моделі. Також досліджувалися методи роз'єднання осей, використовуючи ступінчасті зміни еталонів потужності статора ( $P_s$  і  $Q_s$ ) у різний час.

У другому етапі розглядалася вся модель системи, застосовувалася ступінчаста зміна швидкості вітру від 5 до 10 м/с при  $t = 5$  секунд, що дозволяло переходити від підсистеми до надсинхронного режиму роботи. Мета цього тесту полягала у випробуванні динаміки системи за допомогою змінного профілю швидкості вітру.

Під час моделювання реактивна потужність статорної машини була зведена до нуля ( $Q = 0$ ), щоб отримати коефіцієнт потужності.

Нарешті, отримані відповіді на електричні та механічні величини аналізувалися для формування відповідних висновків.

Таблиця 3.1

Параметри віротурбіни із змінною швидкістю

Параметр	Символ	Значення / одиниця
Номінальна потужність	$P_n$	2 МВт
Радіус турбіни	$R$	45 м
Коефіцієнт передачі редуктора	$G$	90
Інерція системи	$J$	100 кг / м <sup>2</sup>
Щільність повітря	$\rho$	1,225 кг / м <sup>3</sup>
В'язке тертя	$F_v$	0,00673 Н.м.с / рад
кількість пар полюсів	$p$	2
напруга статора (від лінії до лінії)	$V_{s\_rms}$	690 В
Номінальний струм статора	$I_{srrms}$	1760 А
Частота сітки	$f$	50 Гц
Опір статора	$R_s$	29 мОм
Опір ротора	$R_r$	22 мОм
Індуктивність статора	$L_s$	2,6 мГн
Індуктивність ротора	$L_r$	2,6 мГн
Індуктивність намагнічування	$M$	2,5 мГн
Напруга постійного струму	$V_{dc}$	1300 В

На рисунку 3.4 показана діаграма потужності статора до та після оптимізації коефіцієнтів. У стаціонарному режимі силова відповідь досить точно налаштована на нульову статичну похибку, що не погіршує стабільність. Зміна ширини та пікового значення функцій впливає на поведінку машини, особливо через зміщення пікової точки помилок MSF навколо нуля та

настройку моменту зміни пікової точки MSF помилок на подальші нулі. Час встановлення розрахункової потужності статора значно зменшується з 170 до 20 мс з незначним перевищенням 0,8%. Тривимірна поверхня показує нелінійну поведінку оптимального контролера в околицях заданої точки. Стабільність також забезпечується при постійній похибці, рівній нулю.

У таблиці правил зміна правил у конкретних зонах (зона 1, 2 та 3) призводить до швидкого реагування на потужність. Час відгуку скорочується з 170 до 50 мс із переходом на 2,1%, при цьому статична похибка відсутня. Крім того, оптимізований контролер здатний забезпечувати стабільність системи навіть при раптовій зміні потужності.

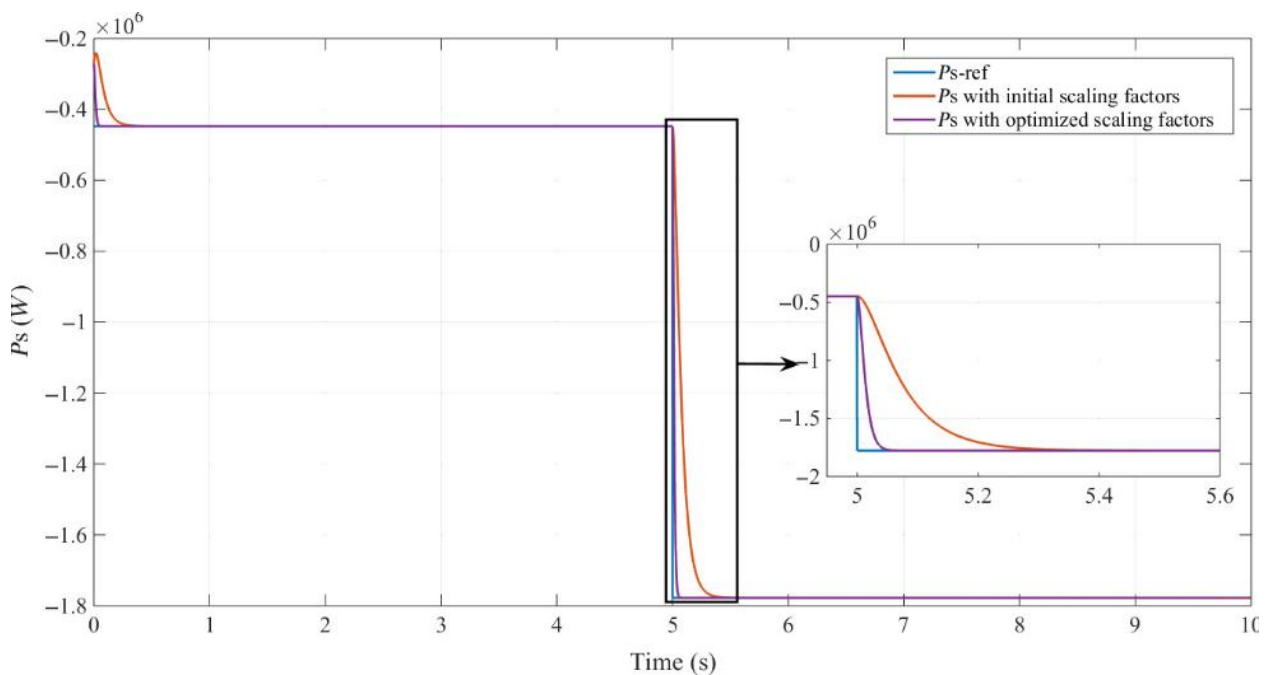


Рисунок 3.4 - Реакція потужності до і після оптимізації.

На рисунках 3.5 і 3.6 демонструється позитивний вплив методу розв'язання на стабільність системи. Нечіткі контролери забезпечують поступове регулювання потужності в різні моменти часу. При відокремленні осей вплив Ps на Qs та навпаки мінімізується. Виміряні величини показують незначне перекриття, що свідчить про їх ефективне приглушення. Однак без роз'єднання осей стабільність системи значно погіршується, відзначається значним перекриттям до досягнення референтного значення та великою статичною похибкою.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.03	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

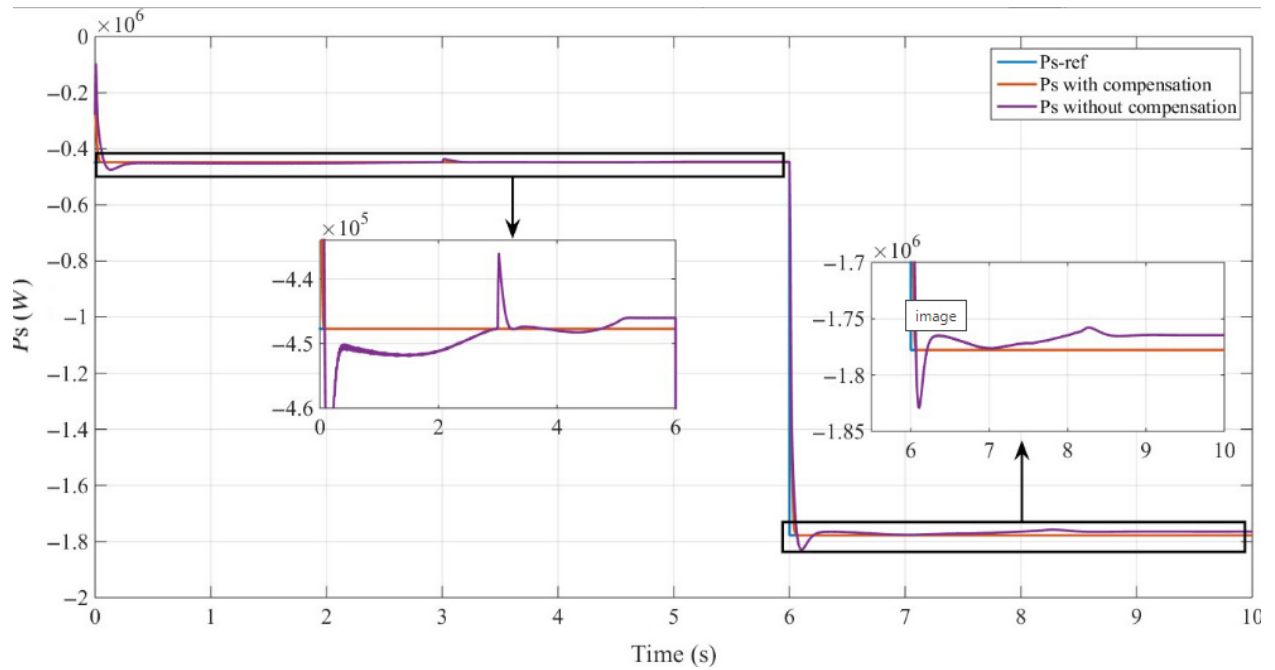


Рисунок 3.5 - Реальна потужність статора.

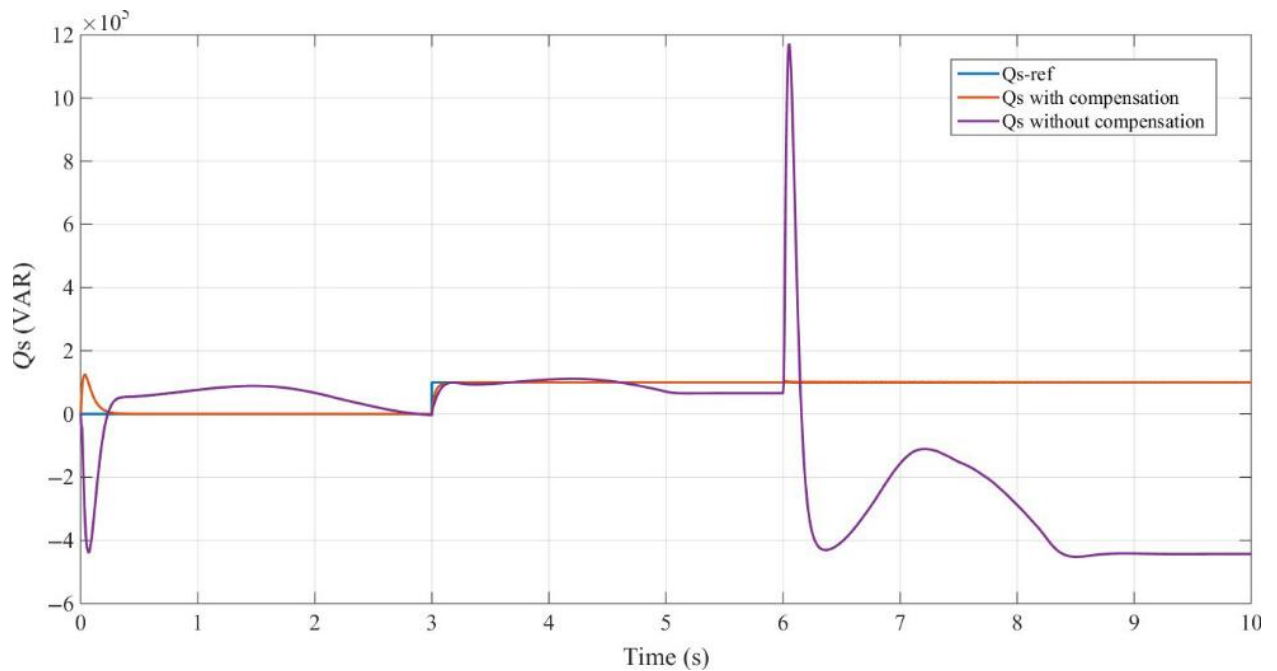


Рисунок 3.6 -. Реактивна потужність статора.

На рисунку 3.7 представлений профіль швидкості вітру, який був використаний у останньому тесті. На рисунку 3.8 можна побачити динаміку швидкості генератора. З цих графіків видно, що система має повільну динаміку через інерцію вітрогенераторів. Важливо відзначити, що цей параметр було зменшено для досягнення прийняттого часу моделювання.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

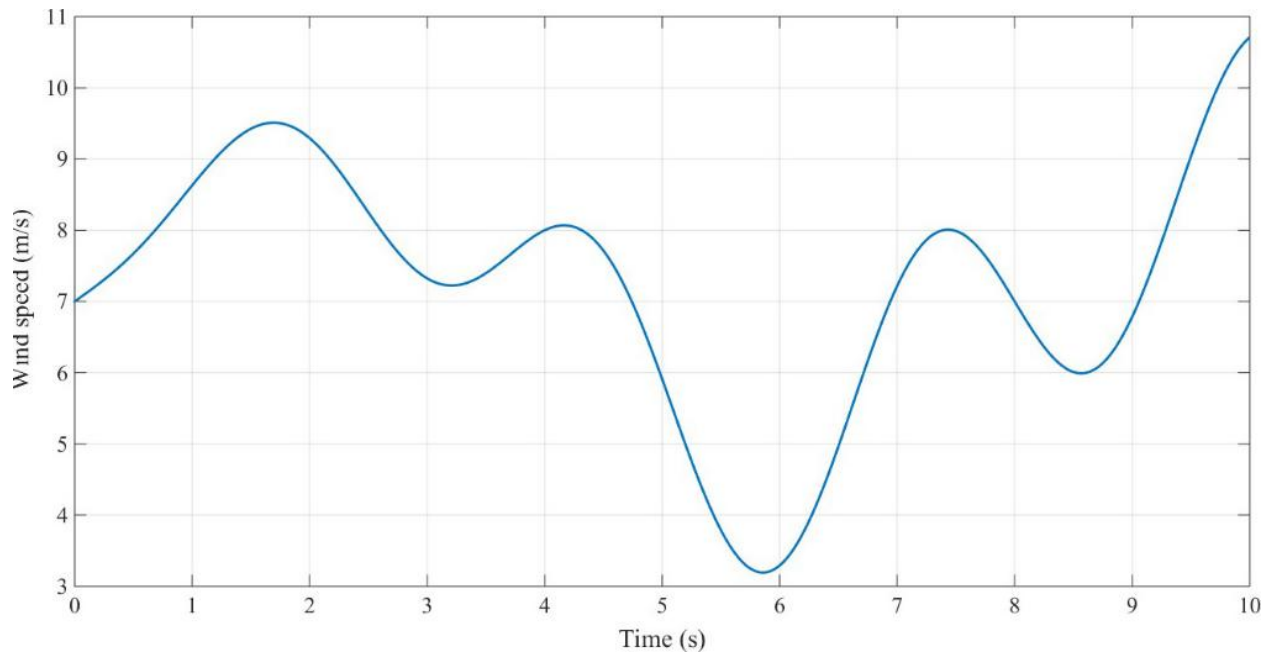


Рисунок 3.7 - Швидкості вітру

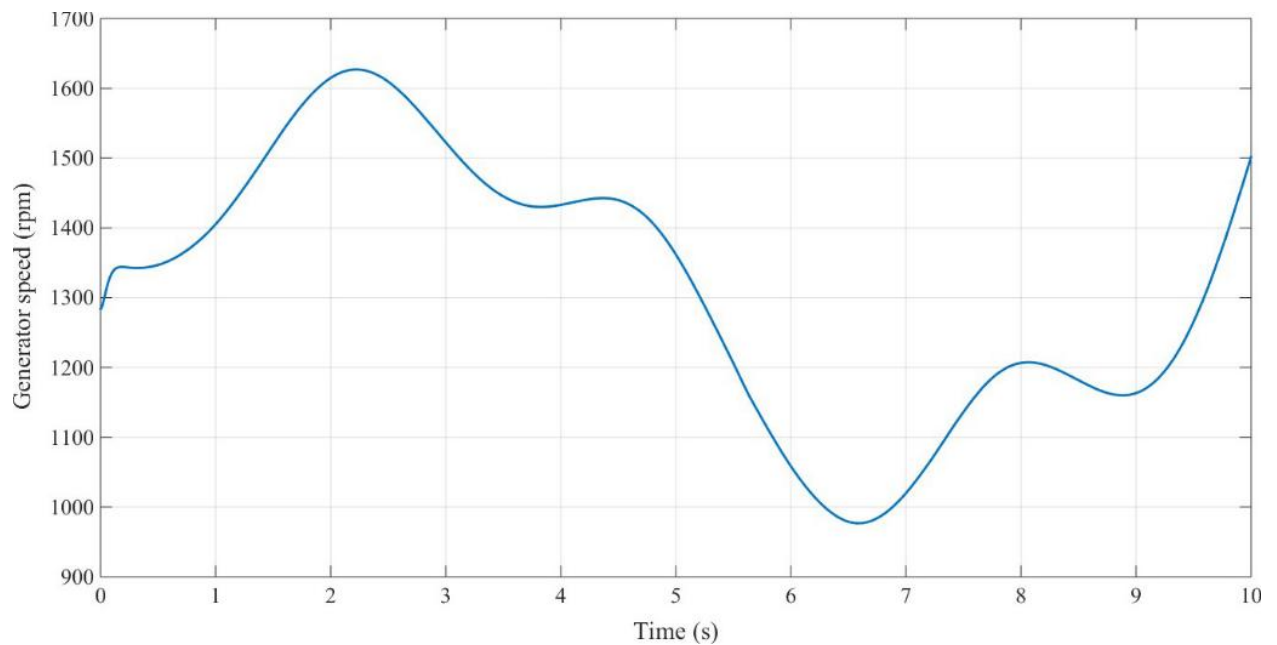


Рисунок 3.8 - Швидкість генератора

Зміна виробленої потужності впливає на зміну струму статора. На рисунку 3.9 показано, що струм статора може досягати 1,78 кА, що еквівалентно 1,26 із номінальним струмом статора в 1,76 кА. Крім того, струм статора зміщується на  $180^\circ$ , що свідчить про введення реальної потужності в мережу (з урахуванням коефіцієнта потужності).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

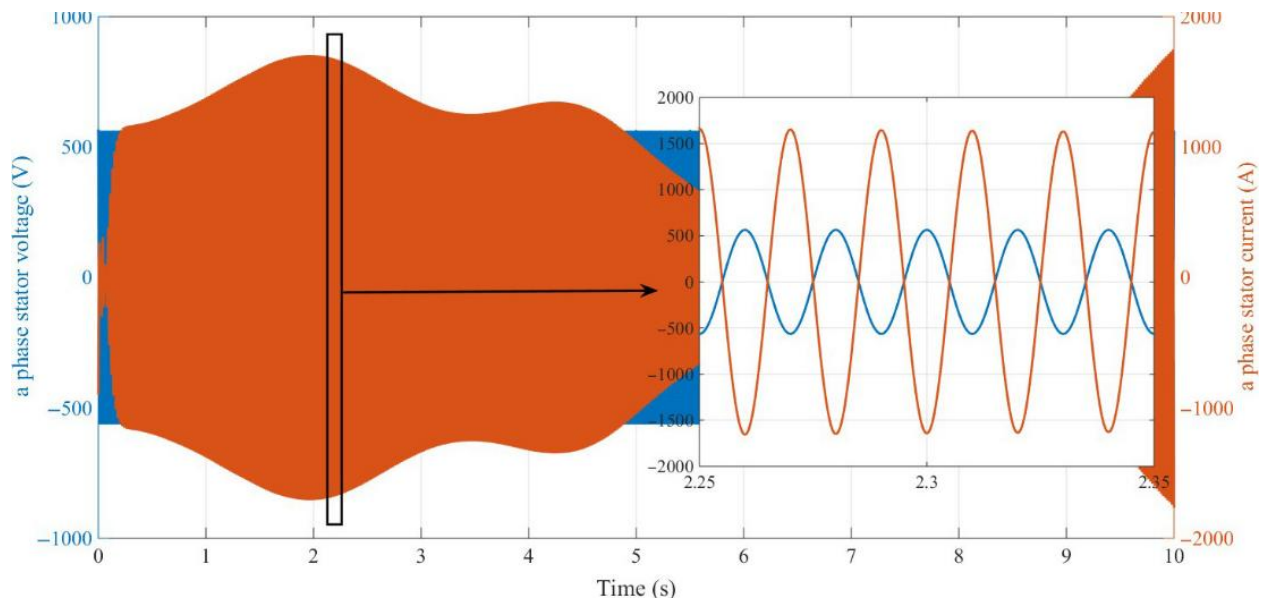


Рисунок 3.9 - Напряга статора фази А та струм статора

На рисунках 3.10 представлено спектральний аналіз струму статора. Загальне гармонійне спотворення складає 1,55%. Це підтверджує ефективність запропонованої конструкції з меншою кількістю пульсацій і меншими гармонічними складовими у вихідних параметрах.

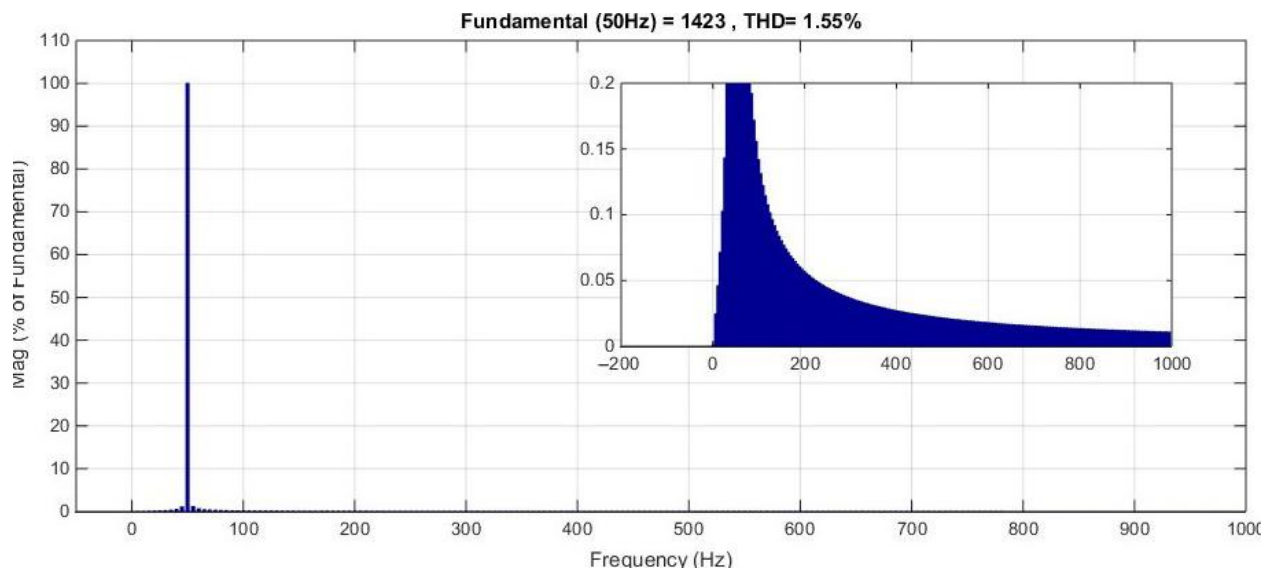


Рисунок 3.10 - Спектральний аналіз струму статора.

На рис. 3.11 показана напруга ротора, що генерується фазою. Командами порядку, прийнятими для дворівневого перетворювача є ШІМ (модуляція по ширині імпульсу) а частота комутації встановлюється на 10 кГц.



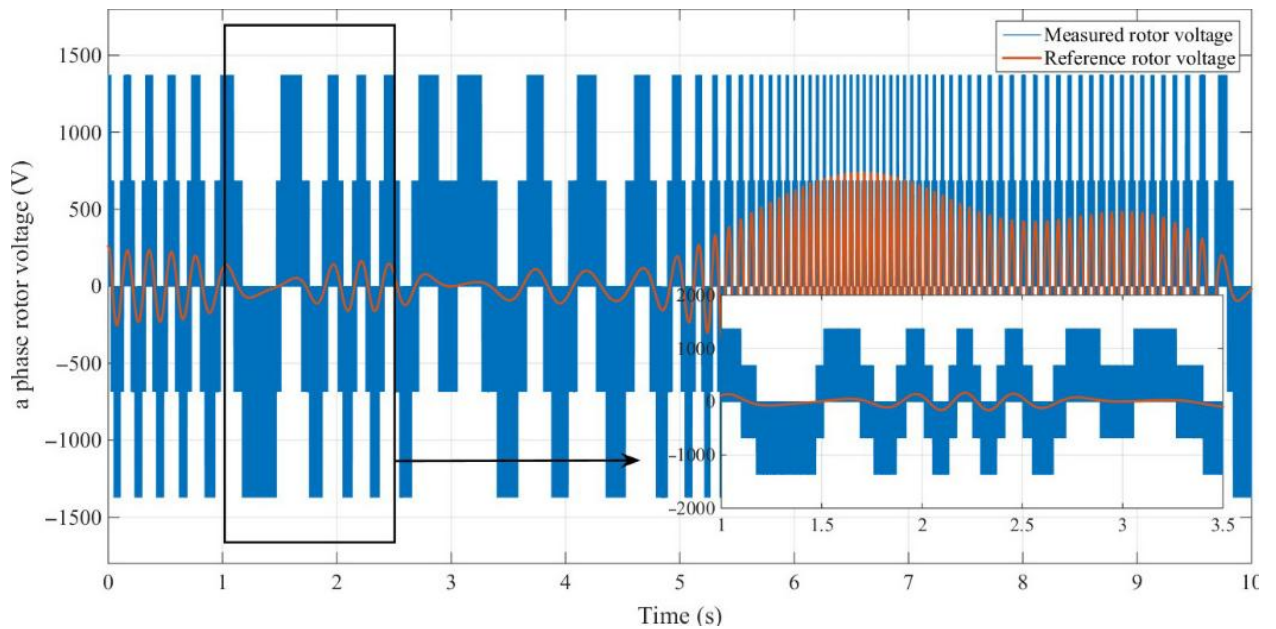


Рисунок 3.11 - Сигнали напруги фази А ротора

На рис. 3.12 і 3.13 зображено форми хвиль напруги ротора та струми роторів. Зрозуміло, що частота цих величин наближається до нуля навколо синхронної швидкості. Крім того, ми можемо очікувати зміни порядку фаз з "abc" на "acb" при переході між двома режимами роботи.

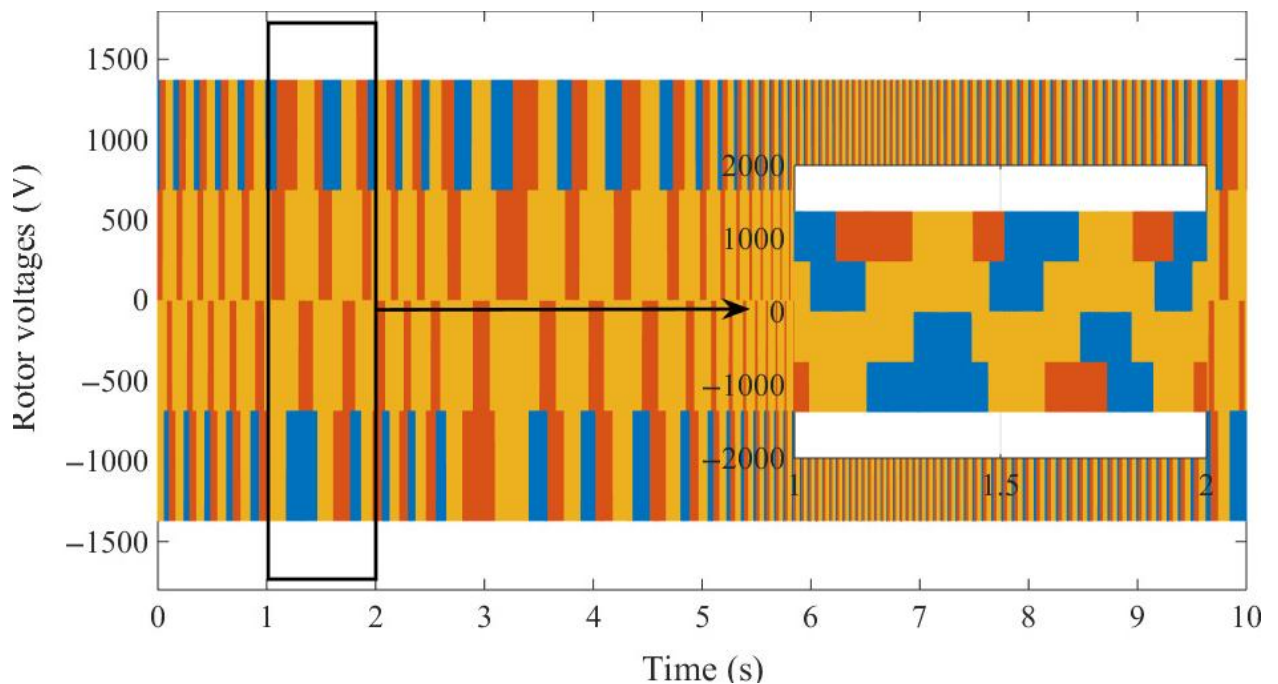


Рисунок 3.12 - Напруги ротора



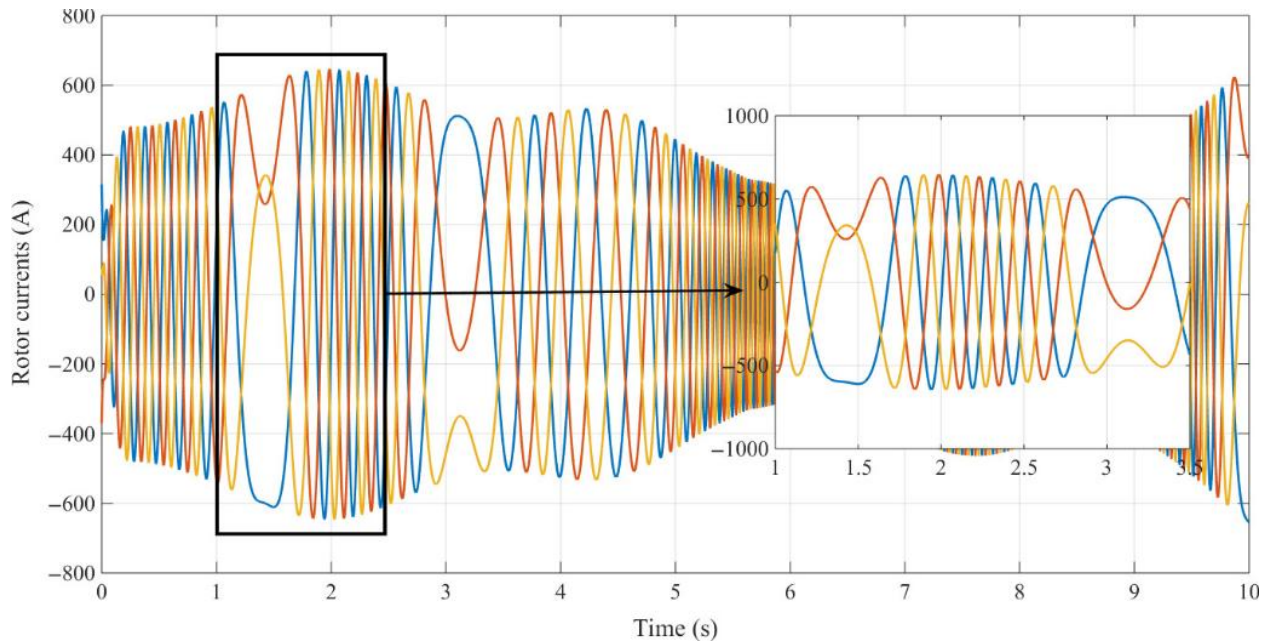


Рисунок 3.13 - Струми ротора

### ***Висновки до 3 розділу***

Результати моделювання режиму роботи вітрогенераторної установки (ВЕУ) з асинхронним генератором електромагнітного збудження (АСГ) у випадку провалу напруги на шинах ВЕУ до 30% від номінального значення показують наступне:

1. АСГ, у якого статор безпосередньо підключений до мережі живлення, піддається впливу початкової амплітуди струму короткого замикання. Це призводить до різкого стрибка струму в обмотках ротора через самоіндукцію генератора, що в свою чергу призводить до прискорення оборотів генератора та зниження активної потужності  $P_s$ .
2. Включення автоматичного генераторного піддону (АГП) в схему синхронного генератора електромагнітного збудження (СГЕЕ) дозволяє забезпечити безперерйну стійку роботу ВЕУ під час періоду провалу напруги. Оптимальне значення супротиву АГП та регулювання за допомогою  $igq$  забезпечують допустимий режим споживання реактивної потужності протягом усього часу роботи.

3. Високий рівень живучості АСГ при втраті збудження відсутність необхідності в системі резервного збудження.
4. Тривалість асинхронного режиму АСГ становить  $t_{Ar} = 0,16$  секунди.

Незважаючи на досягнуту стійку роботу ВЕУ у аварійному режимі з провалом напруги на шинах, складні динамічні обтрунення в енергосистемі (наприклад, близькі до коротких замикань) та строгі технічні вимоги до технічного підключення ВЕУ до мережі можуть вимагати вдосконалення схеми СГЕЕ на базі АСГ-АГП. З цією метою в роботі запропоновано використання додаткових засобів захисту в схемі СГЕЕ з використанням АСГ-АГП.

					КНУ.РБ.141.21.313с-03.03	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні. Звіт підготовлено в рамках проекту «Секретаріат та Експертний хаб з енергоефективності», що впроваджується Програмою розвитку ООН в Україні за підтримки Уряду Республіки Словачія та сприяння Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства в Україні. 2017 р.

3. Кудря С.О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / С.О. Кудря, Л.В. Яценко, Г.П. Душина та ін. // К: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2019 (Проект).

4. Будько В.И. Современное состояние и развитие возобновляемой энергетики / В.И. Будько, С.А. Кудря, А.В. Пепелов // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 4-6. – С. 216–218.

5. IRENA, REmap 2030 Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні, IRENA, Абу-Дабі (2015) [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://saee.gov.ua/sites/default/files/UKR%20IRENA%20REMAP%20\\_%202015.pdf](http://saee.gov.ua/sites/default/files/UKR%20IRENA%20REMAP%20_%202015.pdf)

6. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020: редакція від 01.10.2014. / Кабінету Міністрів України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>

7. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>

8. Закон про електроенергетику: редакція від 01.01.2019. / Верховної Ради України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-07			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Коваленко І.			Список використаних джерел	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.І					41	3
Н. Контр.		Пересунько І.І			КНУ гр. ЕЕМ-20			
Затвердж.		Пересунько І.І						

9. Дячук О. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелєв, Р. Подолець та ін. // К: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. – 88 с.

10. Кармазін О.О. Проблеми вписування ВЕС в загальний баланс ОЕС України / О.О. Кармазін // Відновлювана енергетика. – 2014. – № 3. – С. 70–76.

11. Кармазин А.А. Анализ мирового опыта работы ветроэлектрических станций в едином режиме с энергосистемой / А.А. Кармазин, С.А. Кудря // Альтернативная энергетика и экология. – 2012, №7. С. 41-47.

12. Milligan M. The Impact of Balancing Area Size and Ramping Requirements on Wind Integration / M. Milligan, B. Kirby // Wind Engineering. V. 32, № 4, 2008, p. 379–398.

13. Кузнецов М.П. Імовірнісні аспекти використання відновлюваних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС / М.П. Кузнецов, С.О. Ужейко // Відновлювана енергетика. – 2016. – № 3. – С. 6-12.

14. Лежнюк П.Д. Підвищення надійності електричних мереж з використанням відновлюваних джерел енергії / П. Д. Лежнюк, С.В. Кравчук, І.В. Котилко // Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті. Матеріали ХХ міжнародної науково-практичної конференції, 15 – 16 травня 2019 р.: тези доповідей. – м. Київ, 2019. – С. 107-112.

15. Лежнюк П.Д. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 136 с.

16. Modelling and analysis of variable speed wind turbines with induction generator during grid fault. Bolik S. PhD Thesis. Aalborg University, Denmark. 2004.

					КНУ.РБ.141.21.313С-03.Л	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Reactive power generation by DFIG based wind farms with AC grid connection. Erlich I., Wilch M., Feltes C Proc. 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg, Denmark. 2007. C 1-10.

18. Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance. Seman S., Niiranen J., Arkkio A. IEEE Transaction on Power Systems-. 2006. Vol.21. No. 4. C 1782-1789.

19. Alternative models of the doubly-fed induction machine of powersystem dynamic analysis. Koch F., Shewarega F., Erlich I. Proc. International Conference on New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development. Evora, Portugal. 2004.

20. Contribution of Wind Farms to Ancillary Services Bousseau P., Belhomme R., Monnot E., Laverdure N., Boeda D., Roye D., Bacha S. CIGRE. 2006.

21. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines— potential and applications. Ullah N. R., Thiringer T., Karlsson D. IEEE Transactions on Power Systems. 2008. 23(2). c 601-612.

22. Frequency control and wind turbine technologies. Lallor G., Mullane A., O'Malley M. IEEE Transactions Power Systems. 2005. 20(4). c 190

					КНУ.РБ.141.21.313С-03.Л	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		