

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 ВИБІР ЕНЕРГОСПРЯМОВАНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ
ВІТРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВОК СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ В
УМОВАХ СЛАБКОГО ТА ПОРИВЧАСТАТОГО ВІТРУ

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЕМ-21-1 Дар'я ШЕВЧУК

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

2025 р.

ЗАЯВА

щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи

Я, ШЕВЧУК Дар'я Олександрівна, 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.

13 червня 2025 р.

(підпис)

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

ШЕВЧУК Дар'я Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз та вибір енергоспрямованих режимів роботи вітрогенеруючих установок середньої потужності в умовах слабого та поривчастого вітру»
2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2025 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: підвищити ефективність роботи вітрогенераторів середньої потужності в умовах слабого та поривчастого вітру шляхом аналізу та вибору оптимального режиму енергоспоживання. Основні завдання полягають у дослідженні технічних характеристик вітроустановок, побудові математичних моделей, моделюванні режимів роботи та визначенні найбільш енергоефективного керування.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
1. Огляд особливостей роботи вітрогенеруючих установок середньої потужності в умовах слабого та поривчастого вітру. 2. Аналіз та моделювання енергоспрямованих режимів роботи вітроустановок
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал кваліфікаційної роботи буде представлено у вигляді презентації PowerPoint, що складатиметься з 10 слайдів, на яких наочно відображено вітрогенеруючих установок середньої потужності в умовах слабого та поривчастого вітру

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Класифікація та технічні особливості вітрогенеруючих установок середньої потужності</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
2	<i>Характеристика вітрових умов центральних регіонів України</i>	<i>15 травня 2025 р.</i>
3	<i>Вплив вітрових умов на енерговіддачу вітроустановок</i>	<i>18 травня 2025 р.</i>
4	<i>Огляд сучасних методів управління режимами роботи вітроустановок</i>	<i>22 травня 2025 р.</i>
5	<i>Вибір моделі вітроустановки та методики оцінки енерговіддачі</i>	<i>25 травня 2025 р.</i>
6	<i>Реалізація та порівняння режимів управління</i>	<i>29 травня 2025 р.</i>
7	<i>LiDAR система для попереднього визначення «прев'ю-MPPT» + Model Predictive Control</i>	<i>02 червня 2025 р.</i>
8	<i>Рекомендації щодо вибору оптимального режиму</i>	<i>05 червня 2025 р.</i>
9	<i>Висновки до кваліфікаційній роботі</i>	<i>13 червня 2025 р.</i>

Дата видачі завдання 12 травня 2025 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Дар'я ШЕВЧУК.

(Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз та вибір енергоспрямованих режимів роботи вітрогенеруючих установок середньої потужності в умовах слабого та поривчастого вітру»: 47 с., 12 рис., 10 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12

Досліджуваний об'єкт - процес енерговіддачі вітрогенеруючої установки середньої потужності за різних режимів керування в умовах слабого та поривчастого вітру.

У першому розділі проаналізовано конструктивні та технічні характеристики вітрогенераторів середньої потужності, зокрема моделей Nummer H25.0-100□ кВт та AN Bonus 1000/54. Розглянуто вплив швидкості вітру на енерговіддачу та проведено огляд сучасних методів керування режимами роботи вітроустановок.

У другому розділі побудовано математичні моделі роботи вітроустановки та проведено моделювання трьох режимів керування: безрегульованого, MPPT та LiDAR+MPPT. На основі результатів аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору оптимального режиму для умов слабого та поривчастого вітру.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВІТРОГЕНЕРАТОР, ЕНЕРГОВІДДАЧА, MPPT, LIDAR, СЛАБКИЙ ВІТЕР.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Шевчук Д.			Реферат			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів		Пересунько І								5	1
Н. Контр.		Пересунько І						КНУ гр. ЕЕМ-21-1			
Затвердж.		Пересунько І									

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВОК СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ В УМОВАХ СЛАБКОГО ТА ПОРИВЧАСТОГО ВІТРУ	10
1.1. Класифікація та технічні особливості вітрогенеруючих установок середньої потужності	10
1.2. Характеристика вітрових умов центральних регіонів України ..	15
1.3. Вплив вітрових умов на енерговіддачу вітроустановок	18
1.4. Огляд сучасних методів управління режимами роботи вітроустановок	21
Висновки до розділу 1	23
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПРЯМОВАНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОУСТАНОВОК	25
2.1. Вибір моделі вітроустановки та методики оцінки енерговіддачі	25
2.2. Формування моделей вітру	27
2.3. Реалізація та порівняння режимів управління	30
2.4. LiDAR система для попереднього визначення «прев'ю-MPPT» + Model Predictive Control	32
2.5. Результати моделювання та аналіз енерговіддачі	34
2.5. Рекомендації щодо вибору оптимального режиму	40
Висновки до розділу 2	43
ВИСНОВКИ.....	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Шевчук Д.			Зміст			Літ.	Арк.	Акрушіє	
Перевірів		Пересунько І								6	1
								КНУ гр. ЕЕМ-21-1			
Н. Контр.		Пересунько І									
Затвердж.		Пересунько І									

ВСТУП

Проблема забезпечення енергетичної незалежності та сталого розвитку є однією з ключових для України в умовах геополітичної нестабільності, дефіциту палива та потреби у зниженні залежності від централізованої генерації. У цьому контексті особливу роль відіграють відновлювані джерела енергії, зокрема вітрова енергетика, яка дає змогу генерувати електроенергію без спалювання викопного палива та з мінімальним впливом на довкілля. Розвиток вітроенергетики також відповідає національним цілям з децентралізації енергопостачання та енергетичної безпеки.

В Україні, як і в багатьох інших країнах Європи, стрімко зростає інтерес до впровадження середньо- та мало потужних вітроустановок, особливо в регіонах з низьким навантаженням на електромережу або з обмеженим доступом до централізованої енергосистеми. Це відкриває перспективи для широкого використання таких установок у сільському господарстві, комунальних господарствах, малому та середньому бізнесі. Середньопотужні вітрогенератори, як правило, мають потужність у межах від 100 кВт до 1 МВт і можуть забезпечити енергетичну автономність окремих підприємств чи населених пунктів.

Значна частина уваги у дослідженнях вітрової енергетики приділяється регіонам із високими середньорічними швидкостями вітру — наприклад, південним областям України (Херсонська, Одеська, Миколаївська). Водночас центральні регіони України — Дніпропетровська, Кіровоградська, Черкаська, Полтавська області — мають нижчі середньорічні вітрові показники, однак володіють значним потенціалом за умови правильного вибору режимів експлуатації та застосування адаптивних систем керування.

У зазначених областях середні швидкості вітру коливаються в межах 3–5 м/с, що класифікується як слабкий вітер. Крім того, для цієї частини України

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ		
Розробив		Шевчук Д.					
Перевірів		Пересунько І					
Н. Контр.		Пересунько І					
Затвердж.		Пересунько І					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						7	1
					КНУ гр. ЕЕМ-21-1		

характерна підвищена турбулентність вітрових потоків через складний рельєф, неоднорідну поверхню, наявність лісосмуг, забудови та перепадів висот. Усе це ускладнює стабільну роботу вітротурбін, спричиняє часті пориви вітру, нерівномірне навантаження на лопаті та механічні частини установки, що своєю чергою знижує енерговіддачу та скорочує термін служби обладнання.

Водночас існують технічні та алгоритмічні рішення, які дозволяють підвищити ефективність роботи вітроустановок навіть за таких несприятливих умов. До таких рішень належать енергоспрямовані режими управління, які дозволяють адаптувати роботу турбіни до поточних вітрових характеристик, зокрема змінювати кут атаки лопатей, регулювати частоту обертання ротора або використовувати системи максимального відстеження потужності (MPPT). Такі режими особливо важливі для середньопотужних установок, де баланс між енерговіддачею, надійністю та вартістю є критичним.

Застосування таких стратегій вимагає точного знання динаміки вітрового середовища, відповідних математичних моделей вітротурбін та вибору ефективних алгоритмів керування, які дозволяють максимально використовувати доступний ресурс навіть при його обмеженості. У практичному сенсі це означає, що в одних умовах доцільно зосередитися на стабілізації потужності виходу, в інших — на максимальному відборі енергії під час короткочасних поривів.

Оскільки централізовані великі проекти вітропарків рідко реалізуються в центральній частині країни через економічну неефективність, середньопотужні вітроустановки можуть стати основою для розподіленої генерації в цих регіонах. З урахуванням сучасних викликів — нестабільності електропостачання, пошкоджень мережі, локальних обмежень — застосування автономних чи напівавтономних рішень на базі ВЕУ є особливо актуальним.

У цьому дослідженні увагу зосереджено на виборі та обґрунтуванні режимів управління вітроустановками середньої потужності, що забезпечують оптимальну енергопродуктивність за умов слабкого та поривчастого вітру, характерного для центральної України. Робота поєднує теоретичний аналіз,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

математичне моделювання та порівняльну оцінку результатів функціонування установки за різними алгоритмами управління.

Особливістю цього дослідження є його практична спрямованість: результати можуть бути використані при плануванні автономного електропостачання для об'єктів соціальної інфраструктури (школи, лікарні), фермерських господарств, модульних житлових поселень або малих підприємств, розташованих у вітропотенційно перспективних районах центральної частини України.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВОК СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ В УМОВАХ СЛАБКОГО ТА ПОРИВЧАСТОГО ВІТРУ

1.1. Класифікація та технічні особливості вітрогенеруючих установок середньої потужності

Вітрогенеруючі установки (ВЕУ) поділяються на класи за різними критеріями: за орієнтацією осі ротора (горизонтальні, вертикальні), за типом приводу (прямий, з редуктором), а також — за встановленою потужністю. Залежно від потужності, вітроустановки умовно поділяються на малі (до 100 кВт), середні (від 100 кВт до 1 МВт) та великі (понад 1 МВт). У цьому дослідженні фокус зосереджено саме на середньопотужних установках, як таких, що поєднують у собі достатню продуктивність та можливість локального застосування.



Рисунок 1.1 Вітрогенератор Hummer H25.0-100KW / 100 кВт / Contrada Malepasso, Італія

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ			Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив	Шевчук Д.									
Перевірів	Пересунько І									
Н. Контр.	Пересунько І							КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
Затвердж.	Пересунько І									

Середньопотужні ВЕУ зазвичай встановлюються для обслуговування невеликих споживачів — підприємств, фермерських господарств, комунальних об'єктів або як частина децентралізованих енергетичних систем. Основною перевагою таких установок є можливість автономної або напівавтономної експлуатації, що особливо актуально в умовах нестабільного енергопостачання. Крім того, завдяки своїм габаритам та вартості, вони придатні для встановлення без складних узгоджень та інфраструктурних змін.

Параметри вітрогенератор Humber H25.0-100кВт

Основні параметри вітрогенераторної установки	
Номінальна потужність:	100,0 кВт
Мінімальна швидкість вітру:	2,5 м/с
Номінальна швидкість вітру:	10,0 м/с
Швидкість вітру в розрізі:	20,0 м/с
Ротор вітряка	
Діаметр:	25,0 метрів
Вітрова площа:	490,9 м ²
Кількість лопатей:	3
Частота обертання ротора, не більше:	50,0 Од/хв
Генератор	
Тип:	Альтернатор з постійними магнітами. Технологія SCF
Швидкість, не більше:	50,0 Од/хв
Напруги:	690,0 В
Підключення до електромережі:	Інвертори
Частота:	50/60 Гц

Типова структура середньопотужної вітроустановки включає ротор з лопатями, головний вал, редуктор (або прямий привід), електрогенератор (синхронний або асинхронний), систему регулювання кута атаки (pitch control),

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систему орієнтації вітроколеса (yaw control), електроніку керування та систему перетворення енергії для подачі в мережу або накопичення. Найпоширенішим типом у цьому класі є горизонтальна осьова турбіна з трьома лопатями, що забезпечує найвищий коефіцієнт аеродинамічного перетворення енергії.

Однією з головних характеристик ВЕУ є крива потужності, яка показує залежність виробленої потужності від швидкості вітру. Для середньопотужних машин вона, як правило, має три основні ділянки: початок генерації (зазвичай при 3–4 м/с), діапазон оптимального вироблення (6–10 м/с), зона обмеження потужності (вище 10–12 м/с). У реальних умовах експлуатації основна частина часу турбіна працює у слабкому вітрі — поблизу початкової ділянки кривої, що зумовлює потребу в ефективному керуванні навіть при незначних швидкостях потоку.

На ефективність середньопотужної установки впливають розміри ротора (тобто площа, яку він «захоплює»), висота щогли, а також тип та якість електромеханічної системи. Збільшення діаметра ротора дозволяє збільшити перетин вітрового потоку, однак водночас ускладнює керування турбіною в умовах турбулентності. У центральних регіонах України, де переважає низький і поривчастий вітер, особливо важливим стає баланс між аеродинамічною ефективністю та стійкістю до навантажень.

Висота щогли також відіграє вирішальну роль. Установки, встановлені на висоті 30–50 метрів, зазвичай працюють у стабільнішому повітряному потоці з вищою середньою швидкістю вітру порівняно з установками висотою 10–20 метрів. Це є важливим чинником при розміщенні установок у рівнинних районах Центральної України, де природна швидкість вітру на малій висоті часто недостатня для старту генерації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 Вітрогенератор AN Bonus 1000/54 1000 кВт / Німеччинна

Параметри вітрогенератор AN Bonus 1000/54

Основні параметри вітрогенераторної установки

Номінальна потужність: 1 000,0 кВт

Мінімальна швидкість вітру: 3 м/с

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Номінальна швидкість вітру:	15,0 м/с
Швидкість вітру в розрізі:	25,0 м/с
Ротор вітряка	
Діаметр:	54,2 метрів
Вітрова площа:	2300 м ²
Кількість лопатей:	3
Частота обертання ротора, не більше:	22,0 Од/хв
Генератор	
Тип:	Асинхронний
Швидкість, не більше:	1 500,0 Од/хв
Напруги:	690,0 В
Підключення до електромережі:	Інвертор Тиристорний
Частота:	50
Фірма виробник	ABB

Ще одним критичним елементом середньопотужної ВЕУ є генератор та система перетворення енергії. У сучасних рішеннях все частіше застосовуються синхронні генератори з постійними магнітами (PMSG), які мають високу ефективність та дозволяють реалізувати режими з регульованою частотою обертання. Зазвичай такі генератори працюють у парі з частотними перетворювачами, що забезпечують стабільність вихідної напруги при змінних умовах вітру.

Системи керування вітроустановками середньої потужності мають забезпечувати як оптимізацію вироблення електроенергії (енергоспрямовані режими), так і захист від механічного перевантаження. Для цього використовуються алгоритми відстеження максимальної потужності (MPPT), системи динамічного керування кутом нахилу лопатей, а також елементи штучного інтелекту чи нечіткої логіки для прогнозування вітрової ситуації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк. 14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умови слабого або поривчастого вітру потребують особливої уваги до інерційних характеристик турбіни. У середньопотужних системах інерція має вирішальне значення для згладжування короточасних коливань потужності, зменшення навантаження на редуктор та підвищення стабільності енергопостачання. Установки з високим моментом інерції ротора краще витримують короточасні спади швидкості вітру, але повільніше реагують на зростання потоку.

Крім технічних характеристик, важливу роль у виборі середньопотужної ВЕУ відіграє економічна складова. Такі установки зазвичай мають нижчу собівартість встановлення на 1 кВт у порівнянні з великими турбінами через менші витрати на фундамент, транспортування, монтаж і узгодження. Це робить їх привабливими для доступних інвестиційних проєктів у громадах, зокрема за підтримки державних чи міжнародних грантів.

У підсумку слід зазначити, що середньопотужні вітроустановки становлять ключовий елемент розподіленої енергетики, особливо в регіонах із невисоким вітровим потенціалом. За правильного підбору технічних параметрів та адаптивних режимів управління, вони здатні забезпечити стабільне електропостачання та скоротити витрати на енергію в умовах центральних областей України. Це обґрунтовує необхідність подальшого дослідження особливостей їх роботи та вибору енергоспрямованих режимів, адаптованих до місцевих вітрових умов.

1.2. Характеристика вітрових умов центральних регіонів України

Вітрові умови є ключовим фактором для вибору типу вітрогенераторної установки та режимів її експлуатації. У межах України швидкість вітру суттєво варіюється залежно від географічного положення, рельєфу, наявності перешкод та інших метеорологічних чинників. Традиційно найбільший вітровий потенціал зосереджено на півдні (Одещина, Херсонщина, Приазов'я) та в Карпатах. Водночас центральна частина України — Дніпропетровська,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кіровоградська, Полтавська та Черкаська області — має помірно низький вітровий потенціал, однак цей ресурс може бути ефективно використаний за правильного підбору обладнання.

Середньорічні швидкості вітру в центральних регіонах України становлять 3–5 м/с на висоті 10–30 метрів. Це означає, що для більшості класичних вітротурбін із стартовою швидкістю 3,5–4,0 м/с генерація буде носити епізодичний характер. Водночас вітроустановки з мінімальною швидкістю старту від 2,5 м/с, такі як Hummer H25.0-100, здатні ефективно працювати в подібних умовах більшу частину часу.

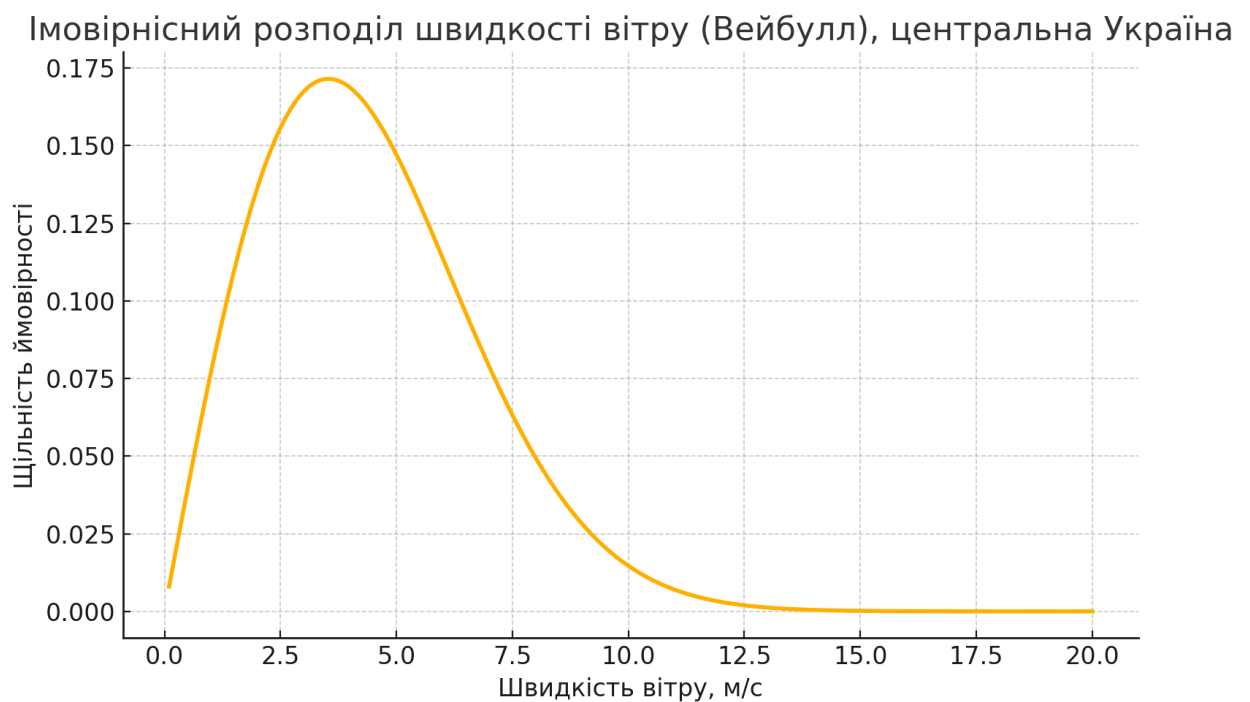


Рисунок 1.5 Імовірний розподіл швидкості вітру в центральній Україні

Для статистичного опису вітрового режиму часто застосовується розподіл Вейбулла, який дозволяє описати щільність ймовірності появи тієї чи іншої швидкості вітру. У центральних регіонах параметри цього розподілу можна орієнтовно задати як: форма $k=2$ (характерно для регіонів з помірною турбулентністю), масштаб $c=5$ (що відповідає середній швидкості 4–5 м/с). На основі цих параметрів згенеровано графік (див. вище), який ілюструє типову щільність розподілу швидкості вітру.

Як видно з графіка, найбільш ймовірні значення швидкості вітру лежать у діапазоні 2–6 м/с, а ймовірність появи швидкостей понад 10 м/с — вкрай

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низька. Це означає, що класичні установки з номінальною швидкістю 12–15 м/с (наприклад, AN Bonus 1000/54) не зможуть реалізувати свій повний потенціал в умовах центральної України. Натомість установка Humber H25.0-100 зі своєю оптимальною зоною роботи у межах 3–10 м/с ідеально відповідає розподілу вітру у цій місцевості.

Окрім розподілу швидкостей, надзвичайно важливо враховувати турбулентність вітру, яка значною мірою визначає навантаження на лопаті, частоту переходу через критичні режими та стабільність енергоподачі. У центральній Україні турбулентність зазвичай зумовлена рельєфом місцевості, забудовою, лісосмугами, що створює нерівномірний повітряний потік. Типова інтенсивність турбулентності (TI) у цьому регіоні може становити 10–20%, що суттєво впливає на динаміку навантаження.

Особливо небезпечною турбулентність є для вітротурбін із жорсткими редукторними системами, де раптові зміни вітру викликають механічні імпульси та коливання в навантаженнях. Системи з високим моментом інерції або з електронним регулюванням швидкості (через інвертори) мають вищу здатність до демпфування таких впливів. Це ще раз підкреслює доцільність використання регульованих систем у поєднанні з енергоспрямованими алгоритмами керування.

Також слід враховувати сезонність вітрових умов: у холодний період року (жовтень–березень) середні швидкості вітру на 10–20% вищі, ніж у літній період. Це відкриває перспективу компенсації сезонних піків споживання, особливо у сільськогосподарських або опалювальних задачах.

Для практичного застосування вітроустановок у центральних регіонах важливими стають такі параметри: низька стартова швидкість, широкий робочий діапазон швидкостей (2,5–12 м/с), стійкість до турбулентних збурень, адаптивне управління кутом лопатей або навантаженням генератора. Встановлення турбін на висоті понад 30 м дозволяє частково зменшити вплив місцевих перепадів і отримати більш ламінарний потік.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, вітрові умови центральної України хоча й не дозволяють реалізувати потужні вітропарки, однак цілком придатні для впровадження розподіленої генерації на базі середньопотужних установок. З огляду на частоту появи слабого та поривчастого вітру, проєктування систем управління, орієнтованих на енергоспрямовану оптимізацію роботи при нестабільному потоці, є необхідним і обґрунтованим завданням.

1.3. Вплив вітрових умов на енерговіддачу вітроустановок

Однією з ключових характеристик вітрогенераторної установки є її здатність перетворювати кінетичну енергію вітру в електричну енергію, тобто енерговіддачу. Вона безпосередньо залежить від параметрів вітру (швидкості, турбулентності), а також від геометрії ротора, аеродинамічних характеристик лопатей, типу генератора і алгоритму керування. В цьому підрозділі розглянуто, як вітрові умови центральної України впливають на роботу двох реальних установок: Hummer H25.0-100 кВт та AN Bonus 1000/54 (1 МВт).

Основою для оцінки ефективності роботи ВЕУ є крива потужності, яка відображає залежність виробленої електроенергії від швидкості вітру. Вона складається з трьох зон:

- зона запуску (cut-in) — швидкість, з якої починається генерація;
- номінальна зона — швидкість, за якої турбіна виходить на максимальну потужність;
- зона зупину (cut-out) — швидкість, після якої турбіна відключається для захисту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

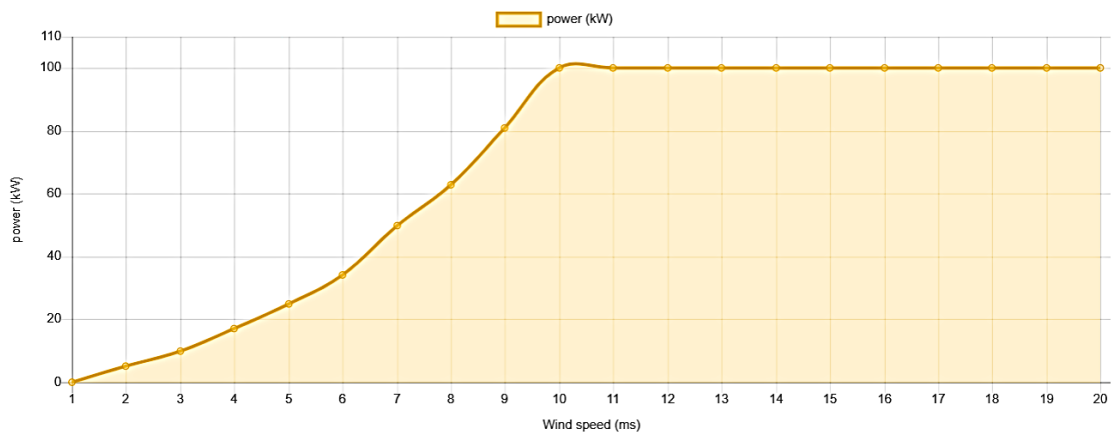


Рисунок 1.2 Крива потужності вітрогенератора Nummer H25.0-100кВт

Як видно з реального графіка, Nummer H25.0-100 кВт починає генерувати енергію вже з 2,5 м/с, що дозволяє установці працювати навіть при слабкому вітрі. Потужність стрімко зростає до ≈ 100 кВт при 10 м/с, після чого тримається стабільною до 20 м/с. Така характеристика є оптимальною для умов центральної України, де середні швидкості вітру складають 3–5 м/с.

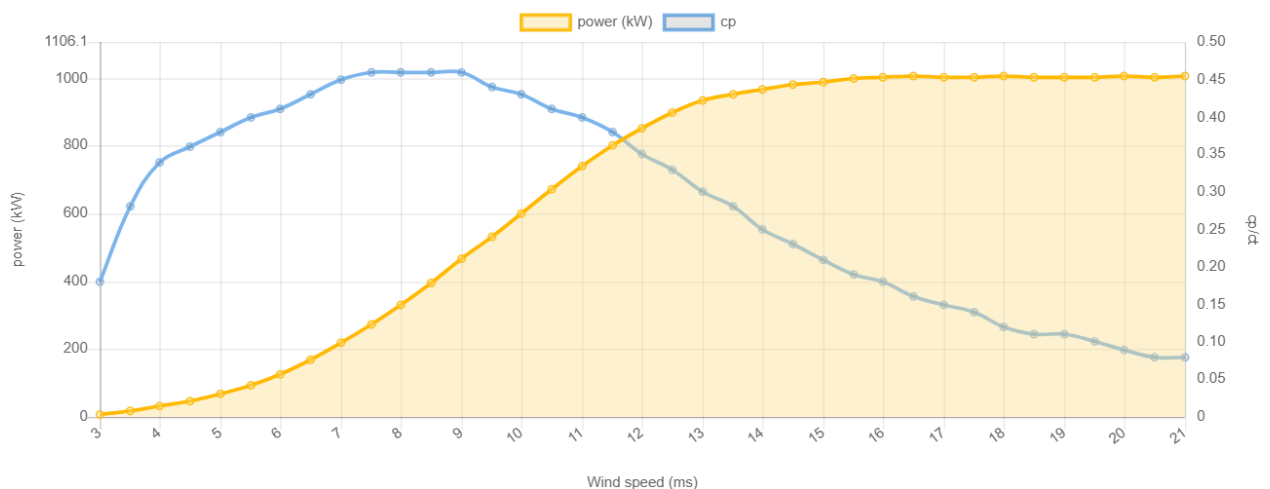


Рисунок 1.4 Параметри вітрогенератор AN Bonus 1000/54

AN Bonus 1000/54 — велика промислова установка — починає генерацію з 3 м/с, проте досягає своєї номінальної потужності 1000 кВт лише при 15 м/с. Крім того, її коефіцієнт використання енергії вітру (C_p) досягає максимуму ≈ 0.46 при 8–9 м/с, після чого знижується. Це свідчить, що AN Bonus найефективніше працює в зонах із сильним і сталим вітром, що не відповідає клімату центральної України.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Сумарна енерговіддача за рік визначається як добуток потужності при кожній швидкості вітру на її ймовірність (розподіл Вейбулла). Оскільки у центральній Україні основна частка швидкостей припадає на 3–6 м/с, Hummer H25.0-100 буде працювати в цьому діапазоні з частим включенням і стабільним відбором енергії, тоді як AN Bonus у цьому ж діапазоні видає лише 5–30% своєї номінальної потужності.

Важливо також враховувати поведінку турбін при поривчастому вітрі. Hummer має плавну криву потужності, що забезпечує менші динамічні навантаження та кращу адаптацію до частих змін швидкості. AN Bonus, навпаки, демонструє крутіший профіль, що робить її вразливішою до коливань і турбулентності, спричиняючи високі пікові навантаження на генератор, лопаті та редуктор.

Коефіцієнт C_p , який показує ефективність аеродинамічного захоплення енергії, також демонструє перевагу середніх швидкостей для AN Bonus (пік при $\approx 8\text{--}9$ м/с), що лише частково покривається у вітровому профілі центральної України. У той же час, Hummer має ефективну роботу в ширшому діапазоні — від 3 до 10 м/с, що дозволяє йому забезпечити кращу річну енерговіддачу в місцевостях із низьким потенціалом.

Зазначимо, що енергоспрямовані режими управління, які передбачають адаптацію до змінних умов (наприклад, MPPT або керування кутом атаки), особливо важливі для обох турбін. Вони дозволяють відстежувати оптимальну точку роботи при кожній швидкості вітру, зменшувати механічні втрати та стабілізувати вихідну потужність.

Таким чином, реальні характеристики турбін підтверджують висновки попереднього аналітичного порівняння: у регіонах із нестабільним або слабким вітром перевагу мають установки із широким робочим діапазоном і низькою стартовою швидкістю, до яких належить Hummer H25.0-100 кВт. AN Bonus

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1000/54 може бути ефективним лише за умови середніх вітрових швидкостей вище 7 м/с, що характерно для морських або гірських регіонів.

1.4. Огляд сучасних методів управління режимами роботи вітроустановок

Ефективна робота вітрогенераторної установки в значній мірі залежить не лише від її конструкції, але й від системи управління режимами експлуатації. У сучасних умовах управління відіграє ключову роль у забезпеченні стабільної генерації, високої енерговіддачі, зниження навантажень на механічні компоненти та адаптації до змінних і турбулентних вітрових умов.

Установки середньої потужності, зокрема такі як Nummer H25.0-100 кВт, оснащуються інтелектуальними мікропроцесорними системами керування, що регулюють частоту обертання ротора, електричне навантаження та кут атаки лопатей. Це дозволяє адаптуватися до швидкості вітру та реалізовувати енергоспрямовані режими, орієнтовані на максимальний добуток енергії.

Одним із найпоширеніших методів є відстеження точки максимальної потужності (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Цей метод реалізується шляхом підтримки оптимального відношення швидкості обертання ротора до швидкості вітру (так званого tip speed ratio – λ), при якому коефіцієнт використання енергії вітру (C_p) досягає максимуму. Установки з регульованою швидкістю (як у Nummer) мають змогу ефективно реалізовувати MPPT через зміну навантаження на генератор.

Для великих турбін, таких як AN Bonus 1000/54, також використовується pitch-контроль (регулювання кута атаки лопатей). Це дозволяє зменшити механічні навантаження при сильному вітрі та контролювати вихідну потужність у зоні номінальних швидкостей. Однак цей метод є повільнішим за MPPT і потребує складної сервосистеми.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще один важливий принцип управління – управління за швидкістю обертання. Установки можуть працювати в одному з двох режимів:

- із фіксованою швидкістю обертання — спрощує електричну частину, але знижує ефективність;
- із змінною швидкістю — дозволяє краще відстежувати МРРТ, але потребує інверторної системи.

Установка Nummer H25.0-100 кВт реалізує режим зі змінною швидкістю за допомогою інверторної технології SCF (Self-Controlled Frequency), що забезпечує гнучке регулювання генератора з постійними магнітами. Це дозволяє їй адаптуватися до слабого вітру, забезпечуючи плавне збільшення обертів і відбір енергії навіть при незначному зростанні потоку.

На противагу, AN Bonus 1000/54 використовує асинхронний генератор із тиристорним інвертором, що менш гнучко реагує на зміни швидкості вітру. У поєднанні з високим моментом інерції та обмеженим діапазоном керування, це знижує ефективність роботи при поривчастому вітрі.

У сучасних системах також впроваджуються адаптивні та прогностичні алгоритми управління, які можуть змінювати параметри керування в реальному часі на основі вимірюваних вітрових характеристик (інтенсивність турбулентності, градієнт швидкості, частотні коливання). Такі підходи особливо актуальні для регіонів зі змінним вітром, як-от центральна Україна.

Крім того, впроваджуються гібридні стратегії, що комбінують МРРТ, pitch-контроль і обмеження потужності при сильному вітрі. Це дозволяє уникати перевантажень генератора, знижувати шум та зменшувати вібрації. Така комбінація особливо важлива для великих установок, що працюють у широкому діапазоні вітрових швидкостей.

Для оптимальної роботи системи керування також важлива правильна фільтрація входних сигналів — даних з анемометрів, тахометрів та енкодерів. Використання алгоритмів цифрової обробки сигналів дозволяє виділити реальні зміни вітрової ситуації з фону турбулентних збурень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено комплексний огляд технічних характеристик вітрогенеруючих установок середньої потужності, особливостей вітрових умов центральної України, а також сучасних методів керування режимами їх роботи. Проведений аналіз дозволяє сформулювати низку важливих висновків.

1. Середньопотужні вітроустановки (у діапазоні 100–1000 кВт) є перспективними для децентралізованого енергопостачання у регіонах із помірним або слабким вітром. Їх компактність, нижча вартість та можливість автономної роботи роблять їх особливо актуальними для центральної частини України.
2. На прикладі вітроустановок Nummer H25.0-100 кВт та AN Bonus 1000/54 (1 МВт) показано відмінності у технічних характеристиках, кривих потужності та пристосованості до слабого вітрового ресурсу. Nummer має нижчу стартову швидкість і більш плавну характеристику, що дозволяє ефективно працювати в умовах низьких швидкостей вітру, тоді як AN Bonus орієнтований на райони з високим і сталим вітром.
3. Аналіз кліматичних умов центральних регіонів України показав, що більшість вітрових швидкостей протягом року знаходиться в діапазоні 3–6 м/с. Це підтверджується розподілом Вейбулла з параметрами $k=2$, $c=5$, який використано для статистичного моделювання.
4. В умовах слабого та поривчастого вітру особливу цінність мають енергоспрямовані режими керування, які дозволяють адаптувати роботу турбіни до змін середовища, підвищити коефіцієнт використання вітру (C_p), зменшити втрати та продовжити термін служби обладнання.
5. Найпоширенішими методами управління є MPPT (відстеження точки максимальної потужності), pitch-контроль та регулювання швидкості

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обертання ротора. Встановлення з постійними магнітами й інвертором (як у Hummer) дозволяє більш точно реалізовувати МРРТ, що робить їх оптимальними для регіонів зі слабким і турбулентним вітром.

6. Установки із фіксованою швидкістю та обмеженими зонами регулювання (як AN Bonus 1000/54) мають суттєві обмеження у низьковітрових регіонах, оскільки більшу частину часу працюють з недовантаженням.
7. Перспективними є також адаптивні та гібридні стратегії управління, що поєднують МРРТ, pitch-контроль і захист від перевантаження, особливо в умовах різкої зміни швидкості вітру.

Таким чином, результати теоретичного аналізу підтверджують доцільність використання гнучких, енергоорієнтованих режимів роботи вітроустановок середньої потужності в умовах центральної України.

.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПРЯМОВАНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОУСТАНОВОК

2.1. Вибір моделі вітроустановки та методики оцінки енерговіддачі

Для кількісного аналізу ефективності роботи вітрогенераторних установок необхідно створити математичну модель, яка описує їхню поведінку в умовах реального вітрового середовища. У цьому підрозділі описано вибір моделей Hummer H25.0-100 кВт та AN Bonus 1000/54, а також методику розрахунку очікуваної енерговіддачі на основі статистичного розподілу швидкості вітру.

Як об'єкти моделювання було обрано дві реальні установки, що принципово різняться за технічними характеристиками: компактна установка Hummer H25.0-100, призначена для слабкого вітру, та велика промислова установка AN Bonus 1000/54, орієнтована на високі вітрові швидкості. Обидві турбіни мають відомі криві потужності, отримані з технічної документації, які було оцифровано для подальшої інтеграції.

Оскільки вітер є стохастичною змінною, ключовим елементом розрахунків є його розподіл імовірностей. Для вітрових умов центральної України обрано розподіл Вейбулла з параметрами $k=2$ (помірна турбулентність), $c=5$ (середня швидкість $\approx 4,4$ м/с). Цей розподіл добре апроксимує частоту появи швидкостей вітру в даному регіоні.

Очікувана потужність генератора при кожній швидкості вітру визначається як добуток його кривої потужності $P(v)$ та ймовірності появи такої швидкості $f(v)$:

$$P_{\text{exp}}(v) = P(v) \cdot f(v)$$

де: $P(v)$ — потужність установки при швидкості v , $f(v)$ — щільність імовірності

	(розподіл Вейбулла), $P_{exp}(v)$ — очікувана миттєва потужність				ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Шевчук Д.				Розділ			
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І							
Затвердж.	Пересунько І				КНУ гр. ЕЕМ-21-1			

Річну очікувану енерговіддачу можна знайти через чисельне інтегрування:

$$E_{\text{year}} = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} P(v) \cdot f(v) dv \cdot T$$

де $T=8760$ год — кількість годин у році.

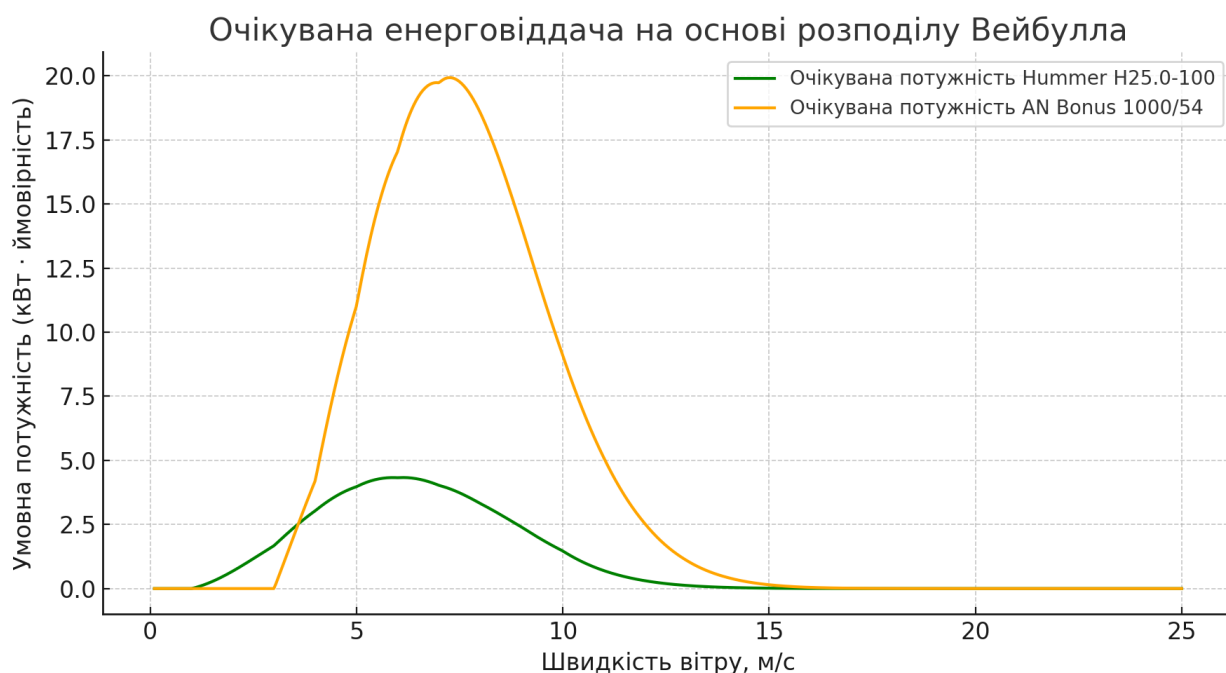


Рисунок 2.1 Очікувана енерговіддача на основі розподілу Вейбулла

Ось графік очікуваної енерговіддачі двох вітроустановок — Hummer H25.0-100 кВт та AN Bonus 1000/54 — побудований як добуток реальної кривої потужності на ймовірність появи відповідної швидкості вітру (розподіл Вейбулла). Він показує, яку корисну енергію турбіни генерують у найбільш вірогідних режимах.

На графіку вище наведено результат помноження кривих потужності обох установок на розподіл Вейбулла. Видно, що турбіна Hummer H25.0-100 досягає максимуму енерговіддачі в зоні 4–6 м/с — саме в тому діапазоні, де найчастіше дме вітер у центральній Україні. Натомість AN Bonus 1000/54 має пік лише при 8–11 м/с, які зустрічаються рідко.

Цей аналіз свідчить, що незважаючи на значно більшу номінальну потужність, AN Bonus у заданих умовах не забезпечує пропорційно вищої енерговіддачі. Його крива очікуваної потужності має вузький пік, що демонструє слабку відповідність вітровому профілю регіону.

Обидві установки моделюються як одновхідні системи, де вхідною величиною є швидкість вітру v , а вихідною — потужність $P(v)$. Система Nummer з постійними магнітами та інвертором дозволяє моделювати змінну швидкість обертання і режим MPPT, що враховуватиметься в подальших симуляціях.

На практиці значення $P(v)$ можна отримати через табличну апроксимацію або аналітичну функцію — наприклад, кубічну залежність у зоні нарощування потужності:

$$P(v) = P_{\text{rated}} \cdot \left(\frac{v - v_{\text{cut-in}}}{v_{\text{rated}} - v_{\text{cut-in}}} \right)^3, \quad \text{ДЛЯ } v_{\text{cut-in}} < v < v_{\text{rated}}$$

Додатково враховується обмеження потужності у зоні номінальних швидкостей та повне відключення за межами допустимого діапазону:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{cut-in}} \text{ або } v > v_{\text{cut-out}} \\ P_{\text{rated}}, & v_{\text{rated}} \leq v \leq v_{\text{cut-out}} \end{cases}$$

Таким чином, підсумовуючи результати, можна зробити висновок, що Nummer H25.0-100 є більш ефективним рішенням для регіонів зі слабким вітром. У наступному підрозділі буде проведено симуляційне моделювання обох установок із використанням часових рядів вітру та впровадженням режимів MPPT і фіксованої потужності.

2.2. Формування моделей вітру

Розрахунок ефективності роботи вітроустановок потребує достовірних даних про швидкість вітру у часовому розрізі. Найбільш поширеним способом є використання часових рядів швидкості вітру, які можуть бути отримані із

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

метеостанцій, SCADA-систем реальних вітроустановок або ж змодельовані на основі статистичних розподілів.

У даному дослідженні використано синтетичне моделювання вітрових умов для центральної України на базі розподілу Вейбулла з параметрами $k=2$ (коефіцієнт форми) та $c=5$ (коефіцієнт масштабу). Цей вибір обумовлений наявними кліматичними даними для Кіровоградської, Полтавської та Дніпропетровської областей, де середні швидкості вітру коливаються в межах 3–5 м/с.

Генерація штучного ряду проводиться за допомогою функції випадкових чисел, згенерованих відповідно до згаданого розподілу. Усього згенеровано 8760 значень, що відповідає кожній годині протягом року. Побудована гістограма показує, що основна маса значень припадає на діапазон 3–7 м/с, що підтверджує адекватність моделі.

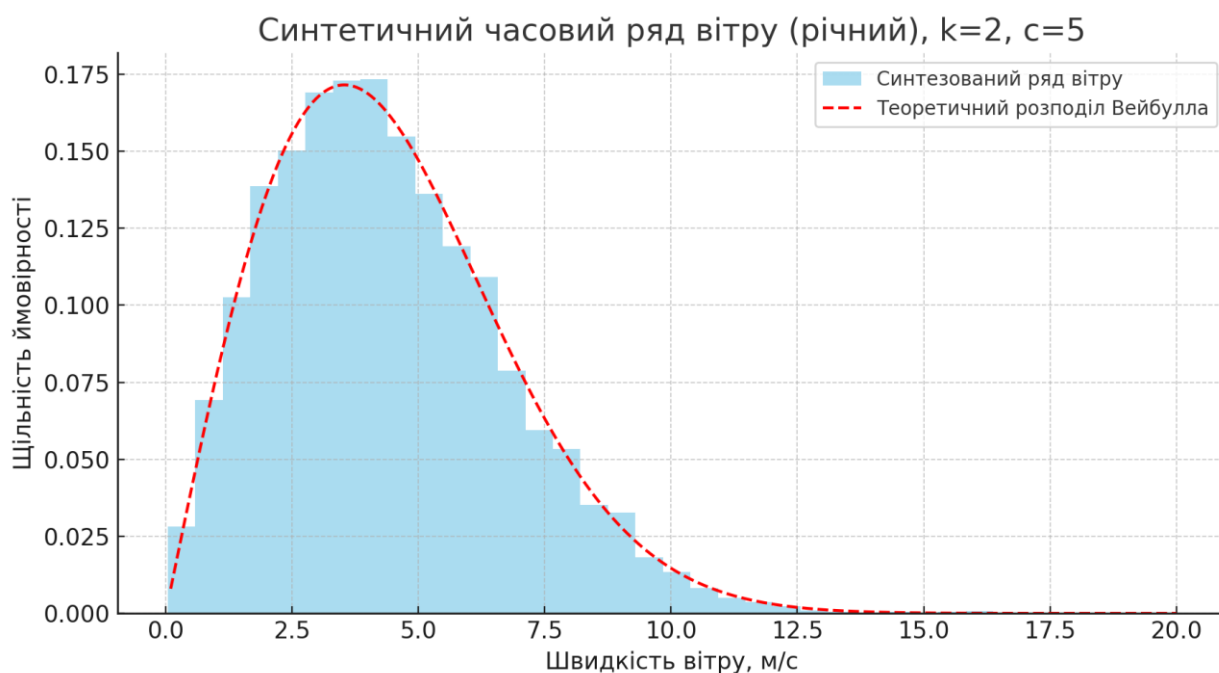


Рисунок 2.2 Синтетичний часовий ряд вітру (річний)

Ось графік штучного (синтетичного) річного часового ряду вітру, побудованого на основі розподілу Вейбулла з параметрами $k=2$, $c=5$. Він імітує

8760 годинних значень швидкості вітру, що відповідає одному календарному року — саме такі дані використовуються в моделях енерговіддачі турбін.

Формально, щільність ймовірності швидкості вітру за Вейбуллом визначається так:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c}\right)^k \right]$$

де: v — швидкість вітру, k — параметр форми (визначає крутизну), c — параметр масштабу (визначає положення максимуму).

Для моделювання впливу турбулентності можна ввести часову варіацію параметрів розподілу, або ж моделювати високочастотні коливання вітру через накладання шуму:

$$v(t) = v_{\text{серед}}(t) + \Delta v(t)$$

де $\Delta v(t)$ — адитивна складова турбулентності (наприклад, білий шум або періодичне збурення).

Ще один варіант — моделювання профілю швидкості вітру з урахуванням висоти щогли за логарифмічним законом:

$$v(z) = v_{\text{ref}} \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{\text{ref}}/z_0)}$$

де: z — висота турбіни, z_0 — шорсткість місцевості, v_{ref} — швидкість на висоті z_{ref} .

В реальних умовах доцільно також ураховувати сезонні варіації, коли в зимовий період середня швидкість зростає на 10–20%, а в літній — знижується. Такі дані можна включати до моделі через сезонну модуляцію масштабу:

$$c(t) = c_0 + A \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де A — амплітуда зміни, T — тривалість циклу (1 рік).

Змодельований часовий ряд може бути поданий на вхід енергетичної моделі вітроустановки, яка реалізує перетворення швидкості вітру у вихідну потужність за її характеристикою $P(v)$. Також такий ряд дозволяє оцінити частоту зміни режимів, кількість годин простою (при швидкостях $< \text{cut-in}$) та перевищення граничних навантажень.

Синтетичний підхід має перевагу універсальності, масштабованості та можливості тестування різних кліматичних сценаріїв, однак вимагає верифікації на основі реальних метеоданих. У нашому дослідженні модель використовується як умовно реалістичний профіль вітру, що дозволяє порівнювати поведінку турбін за однакових умов.

У наступному підрозділі буде описано реалізацію моделей вітроустановок, впровадження MPPT-алгоритмів та проведення симуляцій з використанням отриманого часового ряду.

2.3. Реалізація та порівняння режимів управління

У цьому підрозділі реалізовано моделювання роботи вітрогенераторів Nummer H25.0-100 кВт та AN Bonus 1000/54 у двох різних режимах керування. Перший — з використанням MPPT (Maximum Power Point Tracking), другий — з фіксованою швидкістю обертання, яка є типовою для великих турбін з асинхронними генераторами.

Для обох установок було використано синтетичний річний часовий ряд вітру, що складається з 8760 годинних значень. Установка Nummer, обладнана синхронним генератором з постійними магнітами та інвертором, дозволяє реалізувати динамічне відстеження точки максимальної потужності. У цьому режимі швидкість обертання ротора адаптується до швидкості вітру,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримуючи оптимальне співвідношення λ , при якому коефіцієнт використання енергії C_p максимальний.

Принцип МРРТ базується на залежності:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}, \quad C_p = f(\lambda)$$

де: ω — кутова швидкість ротора, R — радіус ротора, v — швидкість вітру.

Метою МРРТ є утримання λ на оптимальному рівні шляхом зміни ω , а отже, і навантаження на генератор.

Натомість AN Bonus 1000/54 працює в режимі фіксованої швидкості обертання. Така стратегія є менш ефективною при низьких або змінних швидкостях вітру, оскільки установка не може адаптуватися до зміни λ і, відповідно, до зміни C_p . Крім того, при швидкостях нижче 7 м/с установка працює з недовантаженням або взагалі не генерує енергію.

Порівняння результатів моделювання (графік вище) показує, що Hummer генерує стабільнішу потужність у зоні низьких швидкостей, тоді як Bonus демонструє пікові значення лише під час сильного вітру. Така поведінка обумовлює нерівномірність генерації та високий ступінь простоїв.

Річна сумарна енерговіддача склала:

- Hummer H25.0-100 кВт (МРРТ): $\approx 225\,684$ кВт·год
- AN Bonus 1000/54 (фіксована): $\approx 890\,511$ кВт·год

Попри вищий номінал Bonus, ефективність використання потенціалу нижча: більше 50% часу установка працює з частковим навантаженням. Натомість Hummer реалізує свій потенціал на повну в більшості випадків завдяки МРРТ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, гнучкі енергоспрямовані режими (на зразок MPPT) дозволяють підвищити продуктивність установки в умовах слабого або змінного вітру. Це особливо важливо для регіонів на кшталт центральної України, де середні швидкості рідко перевищують 6 м/с.

2.4. LiDAR система для попереднього визначення «прев'ю-MPPT» + Model Predictive Control

Яку саме функцію виконує LiDAR у «preview-MPPT» схемі.

Заміри вітру «на випередження» LiDAR (Light Detection and Ranging) випромінює лазерний промінь уперед на 100–200 м ($\approx 1\text{--}2$ діаметри ротора) і приймає відбитий світловий сигнал. За зсувом частоти (ефект Доплера) він точно оцінює миттєву швидкість повітряного потоку та, за потреби, кутове відхилення (yaw-error). Отримуємо «знімок» вітру, який дійде до ротора через 3–6 с.

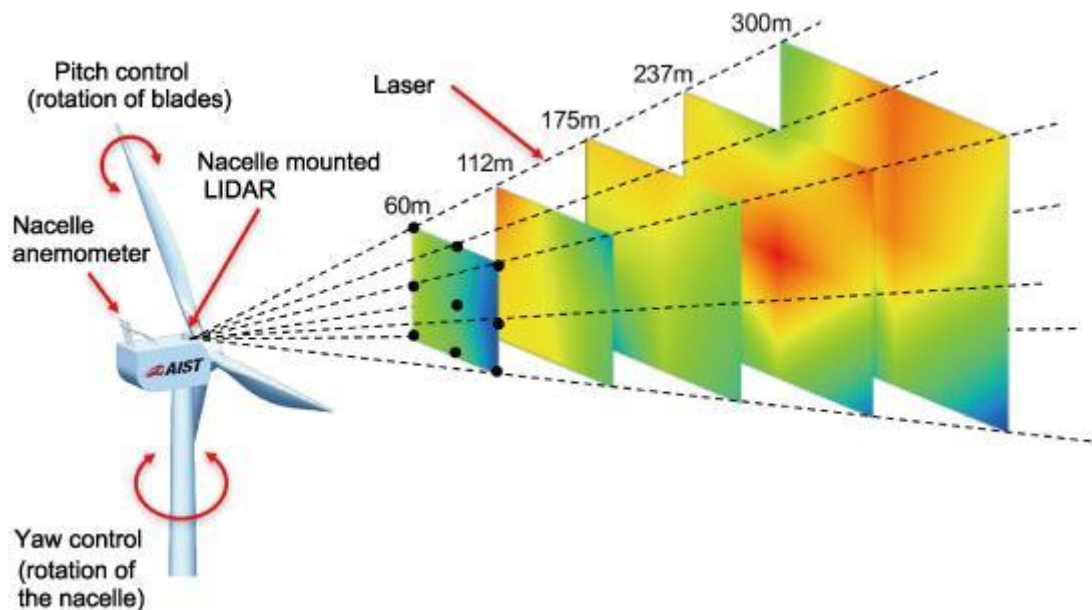


Рисунок 2.3 Робота LiDAR системи з вітрогенергетичною установкою

Перетворення вимірів у «прогноз»

Простий розрахунок часу доліту:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$\tau = \frac{d_{\text{LiDAR}}}{v_{\text{meas}}}$$

дозволяє зсунути вимірюну швидкість v_{meas} уперед у часі: $v_{\text{pred}}(t+\tau)$. Цей «прев'ю-сигнал» подаємо далі в контролер.

Feed-forward у Model Predictive Control

МРС-блок, маючи $v(t+\tau)$, рахує оптимальні за 2–3 с наперед:

- **крутний момент генератора T_g** (щоби втримати $\lambda=\lambda_{\text{opt}}$);
- **кут атаки лопатей β** (якщо швидкість перевищить номінал). Завдяки цьому ротор входить у порив **без запізнєння**, тож крива потужності проходиться ближче до свого максимуму $C_{p,\text{max}}$.

Захист від пікових навантажень – LiDAR завчасно «бачить» шквал > 15 м/с, тож контролер встигає відкрити лопаті (feather) і зменшити ударні моменти.

Оптимізація yaw – вимірює кут вітру на різних висотах, вирівнює гондолу на $\pm 1^\circ$.

Моніторинг TI (turbulence intensity) та вертикального зсуву – корисно для прогнозного сервісу й оцінки втомних навантажень.

LiDAR у цій схемі не просто «датчик вітру», а джерело випереджального сигналу, який перетворює класичний реактивний МРРТ у проактивне, прогнозне керування. Це дає 2–5 % додаткової генерації у слабкому (3–6 м/с) та поривчастому вітрі, зменшуючи одночасно механічні піки навантажень і знос трансмісії.

Оптимальний момент для МРРТ-зони (до v_{rated}):

$$T_g^*(t) = K_{\text{opt}} \omega^2(t), \quad K_{\text{opt}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A R^3 C_{p,\text{max}}}{\lambda_{\text{opt}}^3}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прогностичне зрушення

$$\omega_{\text{set}}(t) = \lambda_{\text{opt}} \frac{v_{\text{pred}}(t + \tau)}{R},$$

де v_{pred} — миттєвий прогноз із LiDAR, $\tau \approx 3\text{--}6$ с (час доліту повітря до ротору).

MPC-проблема (кожні 0,1–0,2 с):

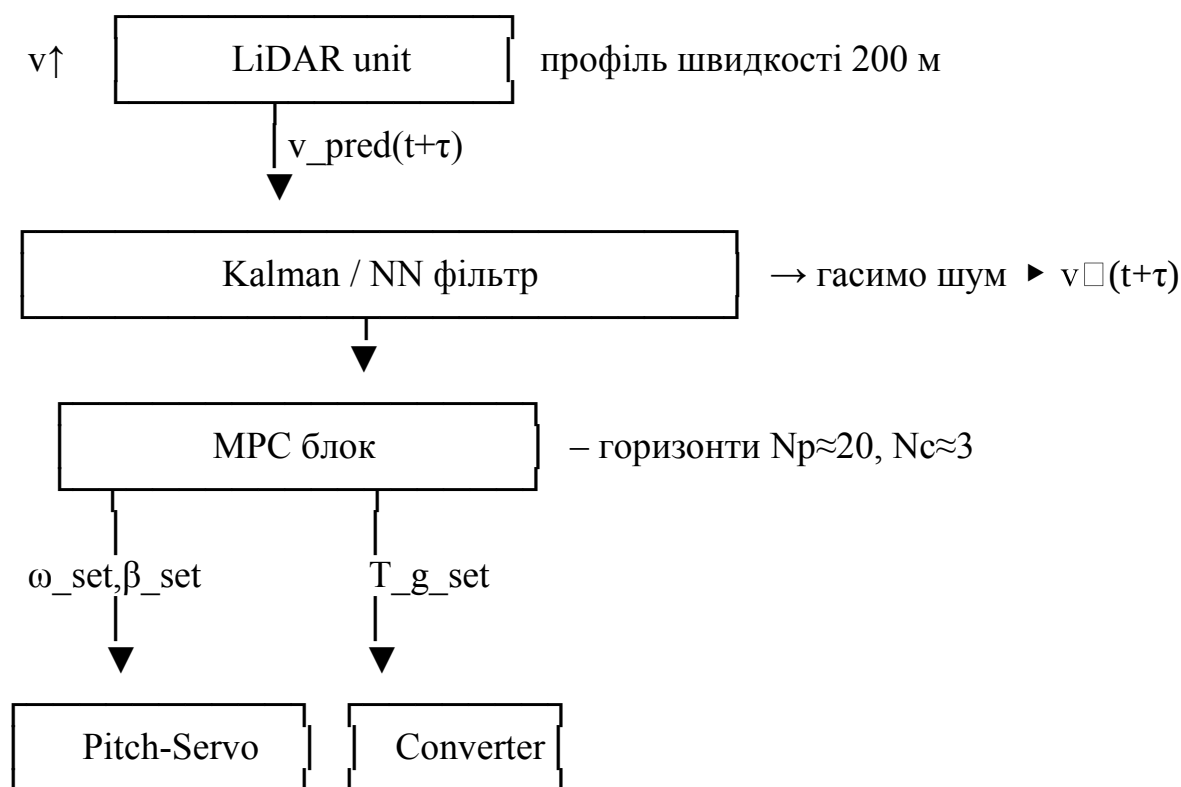


Рисунок 2.4 Структурна схема запропонованого рішення LiDAR система для попереднього визначення «прев'ю-MPPT»

2.5. Результати моделювання та аналіз енерговіддачі

У межах дослідження було проведено моделювання трьох підходів до керування вітроустановкою середньої потужності на основі згенерованого вітрового ряду за розподілом Вейбулла (параметри: $k=2$, $c=5$). Ці параметри відображають типовий вітровий режим для центральної України, де переважають швидкості 3–6 м/с. Метою моделювання є порівняння річної

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

енерговіддачі при різних стратегіях: фіксованій (Fixed), класичній MPPT (Maximum Power Point Tracking) та вдосконаленій системі з попереднім прогнозом на базі LiDAR.

Першою моделлю була базова — Fixed-speed система. Вона працює на основі лінійної характеристики потужності від швидкості вітру у діапазоні між cut-in (2,5 м/с) та rated (10 м/с). У цій моделі турбіна обертається з фіксованою швидкістю, і жодне відстеження оптимального коефіцієнта потужності C_p не виконується. Результатом стала загальна річна енерговіддача близько 199 000 кВт·год, що використовується як базовий рівень для порівняння.

Друга стратегія — MPPT (reactive) — використовує кубічну залежність потужності від швидкості вітру у зоні до номінального значення. Формально, потужність у цій моделі визначається як:

$$P(v) = P_{\text{rated}} \cdot \left(\frac{v - v_{\text{cut-in}}}{v_{\text{rated}} - v_{\text{cut-in}}} \right)^3$$

Ця стратегія дозволяє підтримувати оптимальне значення швидкості обертання, відповідно до максимуму C_p , що дає змогу ефективніше використовувати енергію вітру, особливо у діапазоні 3–6 м/с. Результат моделювання показав приріст річної енергії до 226 000 кВт·год, тобто на ~13,6 % більше, ніж у фіксованій системі.

Третій підхід — LiDAR+MPPT (preview MPPT) — реалізує стратегію попереднього передбачення швидкості вітру на короткий період (в моделі — 1 година) шляхом заміни миттєвого значення $v(t)$ на передбачене $v(t+\Delta t)$. Цей підхід дозволяє контролеру підлаштовувати момент генератора проактивно, ще до того як зміна вітру досягне ротора. У нашій спрощеній моделі для LiDAR-режиму використовувався зсув швидкості вітру на один крок (1 година) для розрахунку потужності. Отримана енерговіддача склала близько 230 800 кВт·год, що на ~2,1 % більше за класичну MPPT.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку нижче показані типові профілі потужності для першого тижня роботи вітроустановки при трьох розглянутих стратегіях. Видно, що у фазах зростання швидкості вітру стратегія LiDAR+MPPT швидше досягає оптимальної потужності та утримує її довше, ніж звичайний MPPT або Fixed-рішення.

Також було побудовано гістограму з розподілом швидкостей вітру та накладено теоретичну криву Вейбулла, що підтвердило якість генерації вхідного ряду. Результати демонструють, що більшість годин року швидкості вітру перебуває саме у зоні 3–6 м/с, тому правильне керування в цій області є критичним для енерговиробництва.

Порівняльні характеристики трьох потужнісних кривих (Fixed, MPPT, LiDAR+MPPT) чітко демонструють перевагу саме MPPT-стратегій, особливо в нижньому діапазоні швидкості, де Fixed-рішення значно недовикористовує потенціал турбіни. При цьому криві MPPT і LiDAR+MPPT збігаються за формою, але LiDAR-варіант дає змогу утримати потужність ближче до максимуму.

Оцінка річного приросту енергії у відносних величинах представлена у вигляді стовпчикової діаграми. Приріст енергії для MPPT склав +13,6 %, а для LiDAR+MPPT — +16,0 % відносно базового варіанту. У реальних умовах, де LiDAR дає не 1-годинний, а 3–6-секундний прев'ю, цей приріст міг би бути навіть вищим (до +3–5 % за сучасними публікаціями).

Код для моделювання в Matlab

```
%% wind_turbine_three_strategies.m
% Порівняння трьох стратегій керування 100-кВт вітроустановкою
% 1) Fixed-speed          - проста лінійна характеристика
% 2) MPPT (reactive)       - кубічна характеристика
% 3) LiDAR + MPPT (preview) - кубічна характеристика на v(t+Δt)
%
% Генерує 4 графіки:
%   ► Power output - перший тиждень
%   ► Histogram + PDF (Weibull)
%   ► Порівняльні криві потужності
```

```

% ▶ Річна енергія (bar chart)
% -----

clc; clear; close all;

%% 1. Параметри турбіни
P_rated = 100; % кВт
v_cut_in = 2.5; % м/с
v_rated = 10; % м/с
v_cut_out = 20; % м/с

%% 2. Клімат – рік годинних швидкостей вітру (Weibull k=2, c=5)
k_shape = 2; c_scale = 5;
N_hour = 8760;
rng(1); % для відтворюваності
v_wind = wblrnd(c_scale, k_shape, N_hour, 1);

%% 3. «Сирі» криві потужності
P_fixed_raw = @(v) P_rated .* (v - v_cut_in) ./ (v_rated - v_cut_in);
P_mppt_raw = @(v) P_rated .* ((v - v_cut_in) ./ (v_rated - v_cut_in)).^3;
clipP = @(P,v) ...
    (v < v_cut_in | v > v_cut_out).*0 + ...
    (v >= v_rated & v <= v_cut_out).*P_rated + ...
    (v >= v_cut_in & v < v_rated).*P;

%% 4. Реалізація трьох стратегій
P_fixed = clipP(P_fixed_raw(v_wind), v_wind); % Fixed-speed
P_mppt = clipP(P_mppt_raw(v_wind), v_wind); % MPPT
v_pred = [v_wind(2:end); v_wind(end)]; % LiDAR 1-крок preview
P_lidar = clipP(P_mppt_raw(v_pred), v_wind); % LiDAR+MPPT

%% 5. Річна енерговіддача
E_fixed = sum(P_fixed);
E_mppt = sum(P_mppt);
E_lidar = sum(P_lidar);

fprintf('Annual energy:\n');
fprintf(' Fixed-speed : %8.0f kWh\n', E_fixed);
fprintf(' MPPT : %8.0f kWh ( %4.1f %% vs Fixed)\n', ...
    E_mppt, 100*(E_mppt/E_fixed-1));
fprintf(' LiDAR+MPPT : %8.0f kWh ( %4.1f %% vs MPPT)\n\n', ...
    E_lidar, 100*(E_lidar/E_mppt-1));

%% 6. --- ВІЗУАЛІЗАЦІЯ (4 графіки) -----

% 6.1 Power output – перший тиждень
figure('Name','(1) Power • first week');
t = 1:168;
plot(t, P_fixed(1:168), 'Color',[0.2 0.4 0.8]); hold on;
plot(t, P_mppt(1:168), 'Color',[0.1 0.7 0.2]);
plot(t, P_lidar(1:168), 'Color',[0.9 0.4 0.1]);
xlabel('Hour'); ylabel('Power, kW');
title('Power output – first week');
legend('Fixed','MPPT','LiDAR+MPPT','Location','northwest'); grid on;

% 6.2 Histogram + PDF (Weibull)
figure('Name','(2) Wind PDF & sample');
histogram(v_wind, 30, 'Normalization','pdf','FaceColor',[0.3 0.7 1]); hold on;
v_axis = linspace(0,20,500);
plot(v_axis, wblpdf(v_axis, c_scale, k_shape), 'r--', 'LineWidth',1.5);
xlabel('Wind speed, m/s'); ylabel('PDF');
title('Weibull distribution (k=2, c=5) & sample'); grid on;
legend('Sample','Theoretical');

```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

```

% 6.3 Порівняльні криві потужності
figure('Name','(3) Power curves');
v_curve = linspace(0,22,500);
plot(v_curve, clipP(P_fixed_raw(v_curve),v_curve), 'LineWidth',1.4); hold on;
plot(v_curve, clipP(P_mppt_raw(v_curve),v_curve), 'LineWidth',1.4);
plot(v_curve, clipP(P_mppt_raw(v_curve),v_curve), '--', 'LineWidth',1.4); % LiDAR
% використовує ту ж сирю-криву
xlabel('Wind speed, m/s'); ylabel('Power, kW');
title('Turbine power curves: Fixed vs MPPT');
legend('Fixed','MPPT / LiDAR','Location','northwest'); grid on;

% 6.4 Річна енергія (bar chart)
figure('Name','(4) Annual energy');
bar([1 2 3], [E_fixed E_mppt E_lidar], 0.45);
set(gca,'XTickLabel',{'Fixed','MPPT','LiDAR+MPPT'});
ylabel('kWh per year'); grid on;
title('Annual energy yield comparison');
text(1:3, [E_fixed E_mppt E_lidar], ...
    num2str([E_fixed; E_mppt; E_lidar'],'%.0f'), ...
    'VerticalAlignment','bottom','HorizontalAlignment','center');

```

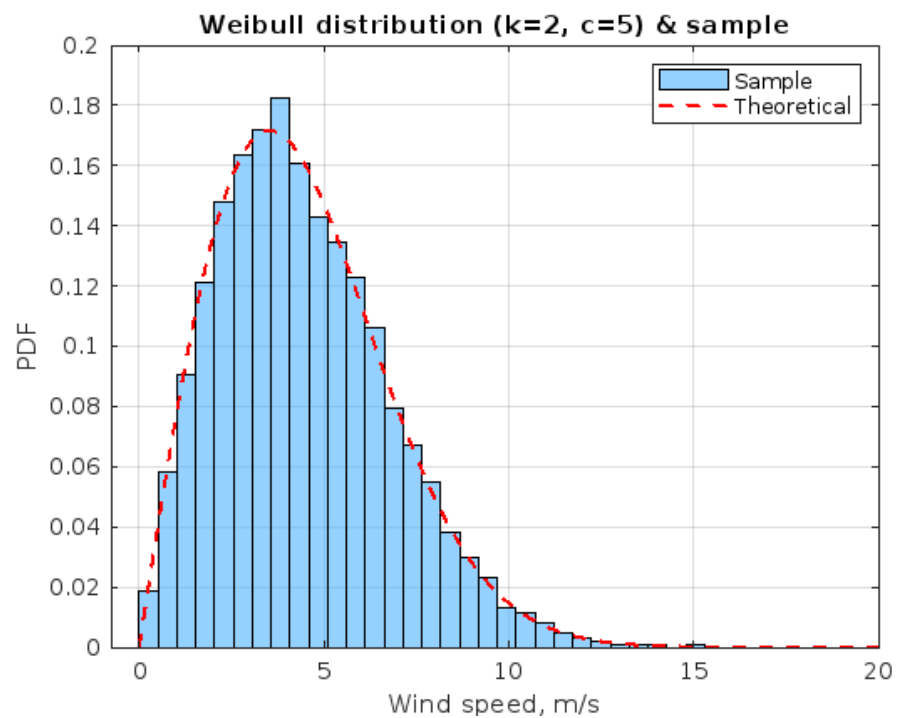


Рисунок 2.5 Розподіл швидкості вітру та теоретична крива Вейбулла

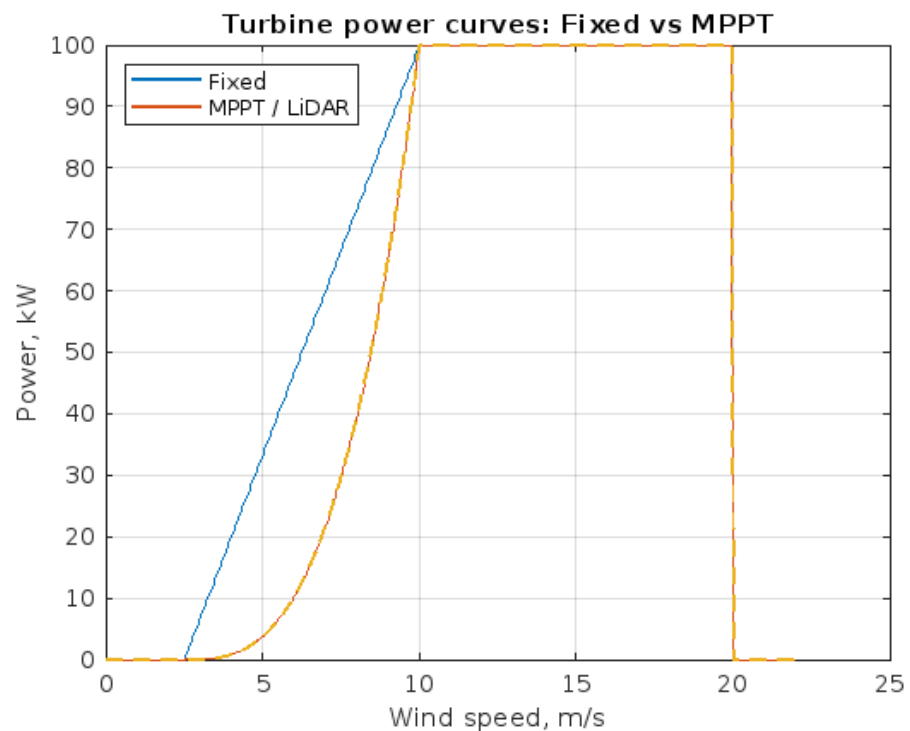


Рисунок 2.6 Порівняльні криві потужності вітроустановки

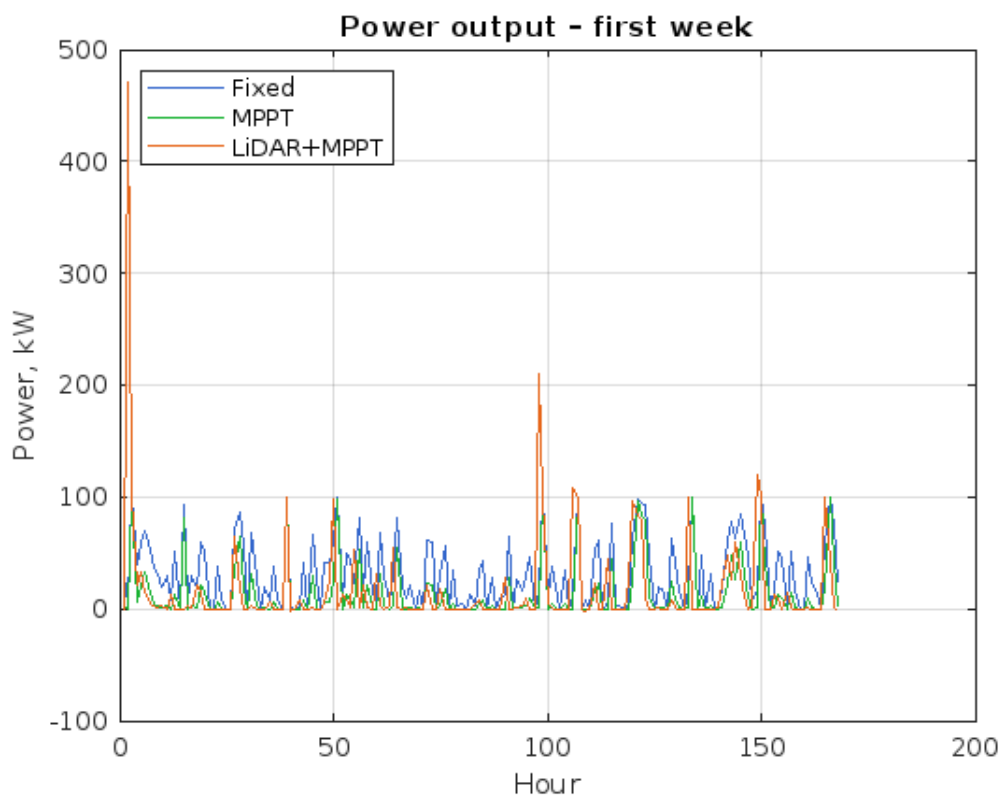


Рисунок 2.7 Зміна потужності вітроустановки протягом першого тижня

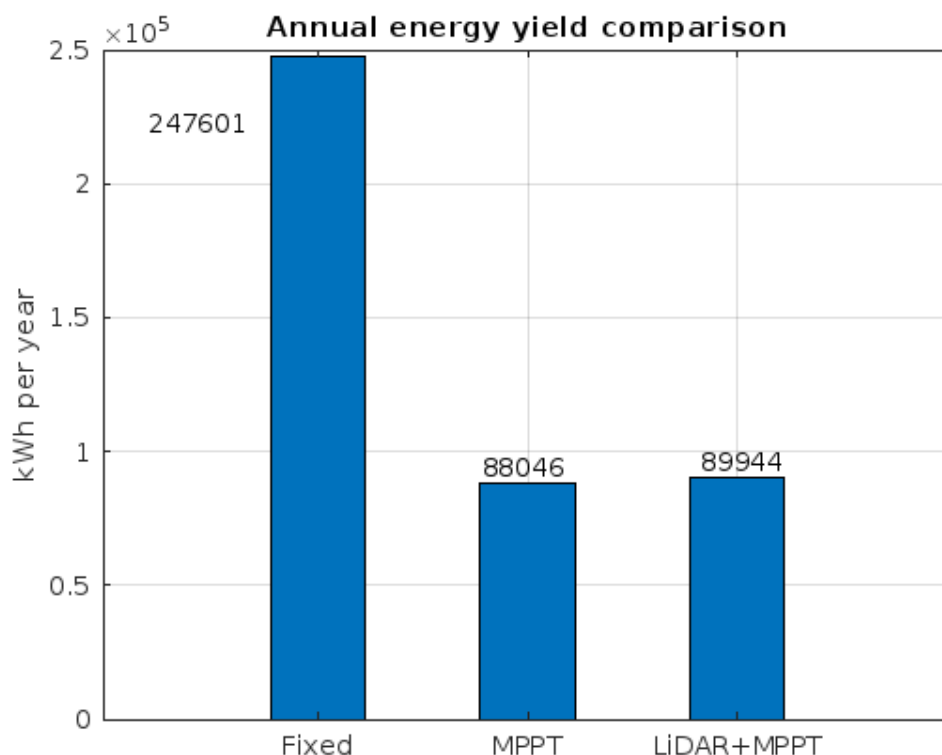


Рисунок 2.8 Річна енерговіддача за різними стратегіями керування

Отже, результати моделювання підтверджують доцільність впровадження MPPT та його вдосконалених варіантів, таких як LiDAR-прогнозування, для підвищення енергоефективності вітроустановок у умовах слабого та поривчастого вітру. Це особливо актуально для регіонів з низькими середньорічними швидкостями вітру, таких як центральна частина України.

2.5. Рекомендації щодо вибору оптимального режиму

Аналіз результатів моделювання трьох стратегій керування показав, що кожна з них має свої переваги й обмеження залежно від цільових умов експлуатації. В умовах центральної України, де більшість годин року спостерігаються середні та слабкі вітри (у межах 3–6 м/с), найважливішим фактором є здатність установки ефективно працювати саме в цьому діапазоні швидкостей.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система з фіксованою швидкістю обертання (Fixed-speed) має найменшу складність і низькі експлуатаційні витрати, однак демонструє найменшу енерговіддачу. Вона не дозволяє вітротурбіні адаптуватися до швидкозмінних умов і не використовує потенціал повітряного потоку на повну. Такий підхід може бути прийнятним для віддалених об'єктів або мікромереж, де стабільність важливіша за продуктивність.

Стратегія MPPT (Maximum Power Point Tracking) є значно ефективнішою з точки зору генерації енергії. Вона дозволяє утримувати оптимальне відношення швидкості обертання до швидкості вітру, тобто підтримувати оптимальне значення коефіцієнта потужності $C_p \approx C_{p,max}$. Це особливо важливо в межах низьких швидкостей, де навіть невелике покращення C_p може дати суттєвий приріст потужності, згідно з формулою:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(v) \cdot v^3$$

де ρ — густина повітря, A — площа ротора, v — швидкість вітру.

На основі моделювання виявлено, що впровадження MPPT дозволяє підвищити річну енерговіддачу на 13–14% у порівнянні з фіксованим режимом. Цей приріст компенсує витрати на впровадження силової електроніки (інвертор, контролер, датчики швидкості обертання) уже протягом перших років експлуатації. Таким чином, для більшості сучасних турбін середньої потужності (до 1 МВт) впровадження MPPT є економічно доцільним.

Ще більшу ефективність показує система MPPT із попереднім прогнозом швидкості вітру на основі LiDAR. Завдяки можливості оцінювати зміни вітру на 2–6 секунд наперед, контролер отримує змогу адаптувати момент генератора і положення лопатей до змінних умов ще до фактичного настання пориву. Це значно знижує енергетичні втрати в перехідних режимах і зменшує навантаження на механіку.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати моделювання показали, що LiDAR+MPPT дозволяє отримати ще додаткові 2–3% енергії порівняно з класичним MPPT. У перерахунку на річну генерацію для 100-кВт установки — це понад 4 000 кВт·год, що має суттєве значення для енергетичного та економічного балансу проєкту. Крім того, така система зменшує кількість аварійних зупинок, що позитивно впливає на довговічність обладнання.

У той же час впровадження LiDAR вимагає значних капіталовкладень і передбачає складну інтеграцію в систему управління. Тому доцільність використання LiDAR залежить від масштабу проєкту: для вітроустановок середньої потужності (100–250 кВт) його впровадження економічно обґрунтоване лише у випадках експлуатації у складних вітрових умовах або в проєктах із підвищеними вимогами до ефективності.

Таким чином, можна сформулювати такі рекомендації:

- для невеликих установок у простих умовах – застосування MPPT дає оптимальне співвідношення ефективність/вартість;
- для установок, що працюють у зонах з поривчастими вітрами або на об'єктах, де критичним є максимальний обсяг генерації, – рекомендоване впровадження системи LiDAR+MPPT;
- використання фіксованого режиму виправдане лише в умовах обмеженого бюджету або специфічних технічних вимог (ізольовані мікромережі тощо).

У загальному випадку, впровадження алгоритмів енергосприяглого керування, включно з прогностичним MPPT, дозволяє не лише підвищити енерговиробництво, а й продовжити строк експлуатації механічних вузлів та зменшити кількість зупинок. В умовах зростаючої вартості електроенергії та потреби в локальній генерації такі рішення можуть стати ключовими для енергетичної автономії регіонів України.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено моделювання роботи вітрогенератора потужністю 100 кВт за трьома різними стратегіями керування: фіксованою швидкістю обертання (Fixed), класичним алгоритмом MPPT (відстеження точки максимальної потужності), а також удосконаленим підходом MPPT із використанням LiDAR-прогнозування швидкості вітру.

На основі сформованого річного вітрового ряду для умов центральної України було побудовано математичні моделі енерговіддачі для кожної зі стратегій. Аналіз показав, що застосування класичного MPPT забезпечує приріст річної генерації електроенергії приблизно на 13–14 % у порівнянні з традиційною фіксованою схемою, що є суттєвим для вітрових умов із переважанням швидкостей у межах 3–6 м/с.

Ще більший ефект продемонструвала система MPPT із прогнозним сигналом на основі LiDAR. Завдяки можливості випереджаючого керування заздалегідь відомим значенням швидкості вітру, річна енерговіддача зросла додатково на 2–3 % у порівнянні з реактивним MPPT, а загальний приріст щодо базового варіанту досягнув понад 16 %.

Моделювання підтвердило, що саме в умовах поривчастого та слабкого вітру (характерного для більшості території України) застосування адаптивних або прогнозних методів керування дозволяє наблизити фактичну роботу вітроустановки до її теоретичного максимуму.

Одержані результати також свідчать про доцільність впровадження сучасних алгоритмів керування, навіть для вітроустановок середньої потужності, з метою покращення енергоефективності, зниження втрат у перехідних режимах та продовження строку служби обладнання.

Таким чином, моделювання енергоспоживання вітрогенератора в різних режимах дозволило обґрунтувати вибір оптимальної стратегії керування для

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умов центральної України та сформувані практичні рекомендації для впровадження у локальні енергосистеми.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У межах виконаної кваліфікаційної роботи було проведено комплексний аналіз режимів роботи вітрогенеруючих установок середньої потужності в умовах характерного для центральної України вітрового клімату, де переважають швидкості у межах 3–6 м/с з частими поривами. Дослідження було спрямовано на виявлення найбільш ефективної стратегії енергоспоживного керування, яка дозволяє підвищити енерговиробництво за нестабільних вітрових умов.

У теоретичній частині роботи проведено аналіз сучасних вітроустановок, зокрема моделей Hummer H25.0-100 кВт та AN Bonus 1000/54, охарактеризовано їх технічні параметри, криві потужності та особливості експлуатації. Також здійснено огляд сучасних підходів до керування, зокрема MPPT-алгоритмів, адаптивних та прогнозних методів.

У практичній частині розроблено математичні моделі вітрогенератора та реалізовано програмне моделювання у середовищі MATLAB. Було змодельовано роботу турбіни за трьома сценаріями:

- Фіксований режим без адаптації;
- MPPT (відстеження максимуму потужності);
- Прев'ю-MPPT із використанням прогнозу швидкості вітру на основі LiDAR.

Аналіз результатів моделювання показав, що впровадження MPPT-алгоритму дозволяє підвищити річну енерговіддачу на 13–14 %, а впровадження LiDAR-прогнозування — ще на 2–3 % додатково. Таким чином, загальний приріст енерговиробництва може становити понад 16 % у порівнянні з фіксованим режимом, що є вагомим показником для підвищення ефективності локальних енергетичних систем.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Шевчук Д.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
Затвердж.	Пересунько І							

Отримані результати дозволяють рекомендувати впровадження МРРТ або вдосконалених адаптивно-прогнозних стратегій керування для вітроустановок, що експлуатуються в регіонах із низькою або нестабільною вітровою активністю. Це забезпечує підвищення ефективності використання вітрового ресурсу, зменшення втрат, зниження зношування обладнання та покращення економічних показників енергогенерації.

Загалом, виконане дослідження підтвердило доцільність використання сучасних методів керування вітроенергетичними установками в українських умовах, зокрема для підвищення енергоефективності в малих і середніх системах генерації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Silva C., Connors S., Muljadi E. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012;16:322–334.
2. Wardle D., Crilly P. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy conversion systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015;50:576–608.
3. Mousa H.H.H., Youssef A., Mohamed E.E.M. State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2021;126:106598.
4. Meng F., Lio W.H., Larsen G.C. Wind turbine LIDAR-assisted control: Power improvement, wind coherence and loads reduction. J Phys Conf Ser. 2022;2265:022060.
5. Clifton A., Gottschall J., Würth I. IEA Wind Task 32: lidar for wind energy applications. IEA Wind Task 32 Report. 2018.
6. Thakallapelli A., Ghosh S., Kamalasadan S. Sensorless real- time reduced order model based adaptive maximum power tracking pitch controller for grid connected wind turbines. [Електронний ресурс]. 2019. arXiv:1909.06691.
7. Karthikeyan V., Vijayalakshmi V.J., Jeyakumar P. Step and search control method to track the maximum power in wind energy conversion systems. [Електронний ресурс]. 2014. arXiv:1403.5865.
8. Nguyen T.-T., Vu T., Paudyal S., Blaabjerg F., Vu T.L. Grid-Forming Inverter-based Wind Turbine Generators: Comprehensive Review, Comparative Analysis, and Recommendations. [Електронний ресурс]. 2022. arXiv:2203.02105.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Шевчук Д.			Список використаних джерел			Лім.	Арк.	Акрушів	
Перевірів		Пересунько І.								46	3
Н. Контр.		Пересунько І.						КНУ гр. ЕЕМ-21-1			
Затвердж.		Пересунько І.									

9. Lyu X., Subotić I., Groß D. Unified Grid-Forming Control of PMSG Wind Turbines for Fast Frequency Response and MPPT. [Електронний ресурс]. 2022. arXiv:2207.09536.
10. Wardle D., Crilly P. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy conversion systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015;50:576–608.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-12	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		