

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроенергетики

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ С.М. Лебедка

"__" _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістра

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання» на тему: Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій

Здобувача групи ЕТ.м-31 Михно Ярослава Романовича

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

Михно Ярослав

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник

к.т.н., доцент Петро ВАСИЛЕГА

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Суми – 2024

Сумський державний університет
 Факультет електроніки та інформаційних технологій
 Кафедра електроенергетики
 Спеціальність: 141– Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електроенергетики

_____ С.М. Лебедка
 “ ___ ” _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську роботу

Михно Ярослава Романовича

1 Тема роботи: "Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій" Затверджено наказом по університету № _____ від _____

2 Термін здачі студентом закінченої роботи: 06.12.2024 р.

3 Вихідні дані до роботи: погодні данні, принципова схема ВЕУ, дані про потужність ВЕУ.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно вирішити):

Вступ.

1. Розрахункова частина.

2. Науково-дослідна частина..

3. Охорона праці.

4. Економічна частина.

5. Графічна частина

Висновки.

Додатки

Список використаної літератури

Розділ	Керівник	Завдання видав	Завдання прийняв
Розрахунок економічної частини	Маценко О.М.		

					MP3.8.141.613 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Михно Я.Р.			Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	Лист.	Арк.	Листів
Перевір.		Василега					2	76
Реценз.						СумДУ, гр. ЕТ.м-31		
Н. Контр.		Василега П.О.						
Затверд.		Лебедка С.М.						

Календарний план

№ п/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розрахункова частина	13.08.24 – 13.09.24	
2	Науково-дослідна частина	14.09.24 – 14.10.24	
3	Охорона праці	01.11.24 – 15.11.24	
4	Економічна частина	16.11.24 – 30.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	01.12.24 – 05.12.24	
6	Здача роботи на перевірку	06.12.24	

Студент гр ЕТ.м-31 _____

Я.Р. Михно

Керівник роботи _____

П.О. Василега

Реферат

с. 73, рис. 5, 1 таблиця, 4 додатки, 23 джерела,

Бібліографічний опис: “ Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій

” [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра; спеціальність 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”; Освітня програма “Електротехнічні системи електроспоживання”/ Я.Р. Михно; керівник П.О. Василега. - Суми: СумДУ, 2024. - 73 с.

Ключові слова: вітряна електроустановка, вітряна електростанція, енергія, валовий потенціал, вітер, екологія, місцевість, швидкість.

WPP (wind power plant), energy, gross potential, wind, ecology, terrain, speed.

Короткий огляд – У рамках цієї роботи досліджуються характеристики вітрового потоку, технічні параметри вітротурбін, а також їх взаємодія з електричною мережею. Основний акцент робиться на розробці математичних моделей для прогнозування продуктивності ВЕС залежно від змін погодних умов, таких як швидкість і напрямок вітру.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВЕС – Вітряна електростанція

ВЕУ- Вітряна електроустановка

СЕС – Сонячна електростанція

ЛЕП – лінія електро передавання

МФО – Міжнародні фінансові організації

NPV - Net Present Value

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
----	------	----------	--------	------

Зміст

Вступ	8
Розділ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА ВИБІР ВІТРОЕГЕРЕТОРА	9
1.1 Режими роботи вітроелектроустановок	9
1.2 Опис рішення	11
1.3 Вибір вітрогенератора та його розрахунок	12
Розділ 2. Науково-дослідна частина	19
1. Номінальний режим роботи	19
2. Режим зниженого навантаження	20
3. Режим перевантаження або аварійний режим	21
Вхідні дані	21
Розрахунок	22
Результати розрахунків	22
2.2 Огляд та аналіз даних	23
Розділ 3. Охорона праці. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів та ідентифікація факторів ризику	27
3.1. Електромагнітне випромінювання	27
3.2. Ризик травмування при обслуговуванні обладнання	27
3.3. Аварійні ситуації: Падіння лопатей, короткі замикання та інші ризики	28
Розробка інструкцій з техніки безпеки	29
3.4 Блисквозахист	30
1. Визначення рівня блискавкозахисту (LPL)	31
2. Розрахунок зони захисту	31
Приклад розрахунку блискавкозахисту для однієї вітротурбіни	32
1. Визначення радіусу зони захисту громовідводу	33
2. Перевірка повного покриття турбіни	33
3. Розрахунок частоти ударів блискавок у турбіну	33
4. Вибір заземлення	34
5. Додатковий захист	34
Висновок	35
3.5 Розрахунок системи заземлення об'єкту	35
Для вертикальних заземлювачів:	36
Для горизонтальних заземлювачів:	36
Приклад розрахунку	37

Висновки:	38
Розділ 4. Економічна частина	39
4.1. Вступ	39
4.2. Аналіз економічних трендів у сфері ВЕС.....	39
Зниження вартості обладнання (турбін, генераторів).....	44
Розвиток технологій, що підвищують ефективність.....	48
Розрахунок вигоди:	54
4.3. Фінансування проєктів ВЕС	54
Джерела фінансування для розвитку вітроелектростанцій (ВЕС) із поясненням та прикладним розрахунком:	55
Етапи фінансування проєктів вітроелектростанцій (ВЕС):	57
Приклади моделей фінансування успішних проєктів вітроелектростанцій (ВЕС)	59
Висновок	61
4.4. Економічна вигода від реалізації ВЕС	62
Розрахунок NPV (Net Present Value).....	62
Економія на традиційних джерелах енергії завдяки ВЕС	64
Висновок:	66
Список джерел:	67

Вступ

Вітрова енергетика стає все більш важливим елементом світового енергетичного сектору, особливо у розвинених країнах, таких як держави Європи. Її зростаюче значення пояснюється не лише необхідністю боротьби зі зміною клімату, але й прагненням забезпечити енергетичну безпеку та стабільність у світі, де ціни на викопне паливо залишаються непередбачуваними. Ситуація ускладнюється значною залежністю багатьох країн від імпорту вуглеводнів із політично нестабільних регіонів, що створює ризики для економік і може призвести до значних фінансових втрат.

Однією з головних переваг вітрової енергетики є її екологічність. Вона не забруднює навколишнє середовище та не генерує шкідливих викидів, що робить її ідеальним рішенням для заміщення традиційних джерел енергії. Крім того, вітер як джерело енергії є майже всюдисущим: його ресурси присутні практично в будь-якому куточку світу, що дозволяє задовольняти зростаючий попит на електроенергію. Протягом останніх двох десятиліть технології у сфері вітрової енергетики значно вдосконалилися, і сучасні вітропарки стали здатні конкурувати з традиційними електростанціями, які використовують вугілля або газ. Уже зараз вітрові електростанції часто демонструють конкурентоспроможність із новими установками на викопному паливі.

З огляду на глобальні екологічні та економічні виклики, використання традиційних джерел енергії стає все менш доцільним. Зміна клімату, забруднення атмосфери та вичерпання природних ресурсів змушують країни шукати нові, сталий джерела енергії.

					MP3.8.141.613 ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	<i>Лист.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Листів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Михно Я.Р.</i>						8	73
<i>Перевір.</i>	<i>Василега</i>							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	<i>Василега П.О.</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Лебелка С.М.</i>					<i>СумДУ, гр. ЕТ.м-31</i>		

Розділ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ТА ВИБІР ВІТРОЕГЕРЕТОРА

1.1 Режими роботи вітроелектроустановок

Генеруючі установки традиційних електричних станцій зазвичай поділяються на три основні категорії:

1. Для покриття основного навантаження – забезпечують безперервне вироблення електроенергії, наприклад, великі теплові електростанції або атомні електростанції, які працюють стабільно протягом тривалого часу.
2. Для покриття проміжного навантаження – функціонують циклічно, задовольняючи змінну частину графіка навантаження, як-от газотурбінні електростанції або окремі гідроелектростанції.
3. Для покриття пікових навантажень – використовуються для короткострокового створення енергетичного резерву, наприклад, акумулюючі гідроелектростанції або швидкодіючі газові станції.

У цьому контексті вітроелектроустановки (ВЕУ) можуть бути використані в трьох основних режимах електропостачання: автономному, вибіркового і паралельному. [1]

Автономний режим

Автономне використання ВЕУ передбачає забезпечення повного і безперервного постачання електроенергії споживачам протягом всього терміну експлуатації. [1] Наприклад, вітроелектростанції в ізольованих районах, як-от на Фарерських островах, забезпечують електроенергію невеликим громадам, часто у поєднанні з

					MP3.8.141.613 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Михно Я.Р.			Аналіз та моделювання режимів роботи вітряних електростанцій	Лит.	Арк.	Листів
Перевір.		Василега					9	76
Реценз.								
Н. Контр.		Василега П.О.						
Затверд.		Лебелка С.М.						
						СумДУ, гр. ЕТ.м-31		

системами накопичення енергії, такими як акумулятори Tesla Powerpack.

Вибірковий режим

У цьому режимі навантаження розподіляється між енергосистемою і ВЕУ. В разі надлишку виробленої потужності, її передають до енергосистеми, а дефіцит компенсують з інших джерел. [1] Наприклад, вітровий парк Horns Rev у Данії працює у вибіркового режимі, забезпечуючи інтеграцію виробленої електроенергії в загальну мережу, тоді як недостатню потужність покривають традиційні електростанції.

Паралельний режим

У паралельному режимі ВЕУ функціонують як частина енергосистеми, сприяючи збільшенню сумарного вироблення електроенергії або частковому покриттю загального графіка навантаження. [1] Наприклад, вітропарк London Array у Великобританії, один із найбільших у світі, працює в паралельному режимі, постачаючи електроенергію безпосередньо до національної мережі, знижуючи споживання викопного палива.

Проблеми інтеграції та резервування

Коливання швидкості вітру призводять до нестабільності виробництва електроенергії. [1-2] У регіонах із високим вітровим потенціалом, як-от Техас (США), це компенсується завдяки використанню акумуляторних систем (наприклад, проект Big Battery у Техасі) або резервування потужності від традиційних електростанцій.

Залежно від типу резервування ВЕУ поділяють на:

- ВЕУ з резервуванням від енергосистеми – наприклад, багато вітрових станцій у Німеччині працюють таким чином, компенсуючи коливання за рахунок енергії з вугільних або газових станцій.
- ВЕУ з накопиченням енергії – наприклад, вітропарк Taiba N'Diaye у Сенегалі оснащений системами накопичення енергії для забезпечення стабільного постачання електрики.

1.2 Опис рішення

У першому випадку повна утилізація енергії вітрового потоку вимагає, щоб енергосистема приймала електроенергію, вироблену ВЕУ, у будь-який час і в будь-якому обсязі. [1-2] Традиційні електростанції, окрім атомних, повинні компенсувати випадкові коливання потужності, що виробляється ВЕУ, адаптуючи генерацію до сумарного графіка навантаження енергосистеми. Це створює потребу в резервних енергетичних установках, які постійно готові до роботи.

У другому випадку, коли вироблена ВЕУ потужність перевищує потреби енергосистеми, надлишок направляється до накопичувачів енергії. За умови великої кількості ВЕУ та систем накопичення, створених з урахуванням вітрового режиму, можливо забезпечити стабільну подачу електроенергії. Такий підхід дозволяє зменшити залежність від сезонності вітрового потоку та забезпечувати постійне виробництво електроенергії протягом усього року. [1-2]

Режим роботи вітрогенератора визначає спосіб перетворення енергії вітрового потоку на електричну. За структурою перетворювальної електричної частини, ВЕУ поділяють на дві категорії: із безпосереднім перетворенням та з проміжним частотним перетворенням. До першої групи належать синхронні та асинхронні ВЕУ, а до другої – ВЕУ з каскадним включенням електричних машин, таких як генератори, випрямлячі, інвертори та перетворювачі.

Широкомасштабне використання ВЕУ у паралельному режимі з енергосистемою вимагає створення розгалуженої електричної мережі потужних ВЕУ, яка інтегрується в існуючу енергосистему. Для забезпечення стабільної роботи необхідно використовувати режим фіксованої кутової швидкості обертання вітрогенератора. [1-2]

У такому режимі частота обертання валу вітрогенератора разом із передатним відношенням мультиплікатора повинна відповідати частоті енергосистеми, враховуючи число пар полюсів генератора. Потужність, що передається від синхронних ВЕУ до енергосистеми, визначається за формулою:

$$P_e = 3U * I * \cos\varphi - \Delta P_{\Sigma} \quad (1.1)$$

де ΔP_{Σ} - сумарні втрати в генераторі, що представляють собою механічні втрати та втрати в сталі й міді статора; U – напруга у фазі статора; I – струм у фазі статора; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності, визначається параметрами енергосистеми, в яку синхронна ВЕУ віддає електричну потужність.

1.3 Вибір вітрогенератора та його розрахунок

Випадок для приватного будинку

Для встановлення вітрогенератора біля приватного будинку необхідно врахувати, що мешканці споживають не більше 550 кВт·год електроенергії щомісяця. Рівень витрат електроенергії є відносно невисоким, оскільки вітрогенератор потрібен виключно для забезпечення роботи побутових приладів.

Оскільки електроенергія від вітрогенератора використовується тільки для живлення побутових приладів, у години мінімального навантаження їх можна вимикати. Основне споживання припадає на ранкові та вечірні години, коли до мережі підключаються прилади із сумарною потужністю до 5,5 кВт.

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

Для повного забезпечення 550 кВт·год електроенергії на місяць із урахуванням пікових навантажень до 5,5 кВт важливо визначити, з якою швидкістю мають заряджатися акумулятори, щоб забезпечити стабільну роботу системи.

$$W = \Delta W / n / T \quad (1.2)$$

де ΔW – витрата електроенергії на місяць, (кВт); n – кількість днів в місяці; T – кількість годин за добу, (год)

$$W = 550 / 30 / 24 = 0.76 \text{ (кВт/год)}$$

Таким чином, швидкість заряду акумуляторних батарей від генератора має становити щонайменше 760 Вт·год. В умовах центральної України, з урахуванням вітрового потенціалу, середньорічна швидкість вітру може бути низькою, проте відкритий простір та розташування об'єкта на підвищенні забезпечать роботу вітрогенератора на рівні 30-40% від його номінальної потужності. Для отримання більш точних даних рекомендується провести заміри швидкості вітру безпосередньо в місці встановлення генератора.

Щоб забезпечити заряд акумуляторних батарей зі швидкістю 760 Вт·год за таких умов, слід обрати генератор із номінальною потужністю щонайменше втричі більшою за необхідну. Це пояснюється тим, що генератор працюватиме лише на 30-35% від своєї номінальної потужності. Таким чином, оптимальна номінальна потужність генератора становитиме приблизно 2280 Вт·год.

Для цих потреб підходить генератор WindKing 3000W з номінальною потужністю 3 кВт.

Вибір акумуляторів Оскільки основне споживання припадає на години пік, а в нічний час і 8-9 годин вдень споживання зведено до мінімум, то основне споживання відбувається вранці і ввечері. Між цими основними піками існує інтервал у 8-9 годин. При середньому рівні заряду акумуляторних батарей 760 Вт/год за інтервал 8-9 годин вітровий генератор зможе виробити близько 6500 Вт.

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

У вітряні дні цей показник може збільшитися як мінімум в два рази, тому за той же період часу може бути вироблено 13000 Вт електроенергії. Для запасу 13000 Вт електроенергії необхідно 28 акумуляторних батарей напругою 4,8 В з ємністю 50 А. Генератор WindKing 3000W має напругу 48 В, тому йому необхідно 28 акумуляторів з напругою 4,8 В. Одна акумуляторна батарея такої напруги здатна зберегти до 0,48 кВт електроенергії. Десять таких батарей можуть зберегти до 13440 кВт.



3High * Quality

Рисунок 1.1 – Ілюстрація приладу

Вибір інвертора Для максимального споживання електроенергії в пікові моменти до 5,5 кВт, можна встановити інвертор 7,5 кВА. Він зможе забезпечити

постійне навантаження 5,5 кВт і пускові струми до 8,25 кВт (150% навантаження).

Додаткове обладнання

У цьому випадку АВР не потрібен, оскільки основна мережа відсутня. Для перемикачів на дизельний (або інший паливний) генератор можна використовувати перекидний рубильник. Дизельний генератор потужністю 7,5 кВт стане корисним резервним джерелом живлення на випадок повної відсутності вітру.

Випадок готелю при дорозі

Для забезпечення енергетичних потреб невеликого готелю на 12 номерів разом із рестораном, розташованих на трасі у відкритому полі, необхідно встановити вітрогенератор. Попередні вимірювання середньорічної швидкості вітру на місці установки показали стабільне значення 9,5 м/с. Витрати електроенергії на побутові прилади та освітлення становлять 85 кВт на один номер щомісяця, а для ресторану—близько 3500 кВт на місяць.

Для опалення, кондиціонування та забезпечення гарячої води в готелі й ресторані використовується трифазний геотермальний теплонасос інверторного типу потужністю 21 кВт. Електроспоживання теплонасоса становить 5,2 кВт/год, а його пускові струми обмежені до 4,2 кВт, що відповідає сучасним стандартам енергоефективності. Для освітлення приміщень застосовуються енергозберігаючі LED-лампи з тривалим терміном експлуатації та низьким споживанням енергії.

Максимальне пікове навантаження при роботі електроприладів та освітлення готелю й ресторану становить приблизно 11 кВт, не враховуючи споживання теплонасоса (5,2 кВт). Хоча об'єкт підключений до громадської електромережі, потужність виділеної лінії становить лише 6 кВт, що недостатньо для покриття потреб у пікові періоди. Місцева підстанція не має можливості збільшити потужність виділеної лінії через технічні обмеження.

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

Виходячи з цих даних, для об'єкта необхідно організувати повне автономне енергозабезпечення, використовуючи вітрогенератор із додатковими акумуляторами для зберігання енергії. У системі передбачається можливість резервного живлення від основної мережі, яка буде використовуватися у разі тривалої безвітряної погоди або для обслуговування системи. Додатково розглядається можливість встановлення дизельного генератора потужністю 8–10 кВт для підтримки критично важливих систем у разі непередбачуваних ситуацій.

Автономна система дозволить готелю й ресторану функціонувати незалежно від нестабільності громадської мережі, водночас забезпечуючи економію витрат на енергію в довгостроковій перспективі.

Для забезпечення енергетичних потреб готелю на 12 номерів і ресторану, розташованих на трасі у відкритому полі, оптимальним рішенням буде використання вітрогенератора разом із системою зберігання енергії. На основі попередніх розрахунків середньорічна швидкість вітру в цьому регіоні становить 9,5 м/с, що дозволяє забезпечити ефективну роботу генератора.

Щомісячне споживання електроенергії

На утримання номерів витрачається 720 кВт (по 60 кВт на кожен із 12 номерів). Загальна витрата електроенергії на утримання готелю та ресторану, без урахування опалення, становить 4400 кВт на місяць.

Середнє щогодинне споживання електроенергії без урахування теплонасоса розраховується як:

$$W=440030 \cdot 24=6,11 \text{ кВт/год.} \quad (1.3)$$

З урахуванням теплонасоса, який споживає 5,2 кВт/год, середнє щогодинне навантаження збільшується до:

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

$W_{\text{загальне}}=6,11+5,2=11,31$ кВт/год. (1.4)

Для забезпечення цієї потреби необхідно встановити вітрогенератор із номінальною потужністю не менше ніж 28,3 кВт, оскільки при середній швидкості вітру 9,5 м/с його ККД становитиме близько 40%.

Вибір вітрогенератора

Обираємо модель вітрогенератора RX-HV30K, номінальна потужність якого становить 30 кВт. Цей генератор забезпечує ефективну роботу навіть при змінних швидкостях вітру, що відповідає вимогам даного регіону.

Вибір акумуляторів

Для стабілізації та буферизації напруги обираємо 16 акумуляторів LiFePO₄ 48 В, 100 А·год. Кожен акумулятор здатний зберігати до 4,8 кВт·год енергії, а загальна ємність системи становитиме 76,8 кВт·год. Цього обсягу достатньо для забезпечення об'єкта електроенергією протягом приблизно 6,8 годин при середньому навантаженні 11,31 кВт/год.

Вибір інверторів

- Для роботи електроприладів і освітлення обираємо однофазний інвертор потужністю 12 кВА, який забезпечує безперебійне живлення навантаження до 10 кВт і може витримувати пускові струми до 15 кВт.
- Для теплонасоса встановлюємо трифазний інвертор потужністю 7 кВА, що забезпечує стабільну роботу теплонасоса з напругою 380 В.

Додаткове обладнання

- АВР (автоматичне введення резерву) дозволить автоматично перемикатися між вітрогенератором і громадською мережею під час тривалих безвітряних періодів.
- Дизельний або паливний генератор потужністю 5,5-6 кВт забезпечить резервне живлення теплонасоса та інших критичних систем у разі несприятливих умов для роботи вітрогенератора.

Рішення для енергозабезпечення об'єкта:

- Один вітрогенератор RX-HV30K.
- 16 акумуляторів LiFePO4 48 В, 100 А·год.
- Однофазний інвертор 12 кВА.
- Трифазний інвертор 7 кВА.
- АВР.
- Дизельний генератор 5,5-6 кВт.

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

Розділ 2. Науково-дослідна частина

2.1. Моделювання режимів роботи ВЕС

Щоб провести моделювання трьох різних режимів роботи вітряної електростанції (ВЕС), потрібно розглянути основні можливі сценарії та умови роботи. Я пропоную такі режими:

1. **Номінальний режим роботи (оптимальний)** – стабільна робота ВЕС при швидкості вітру в діапазоні, де турбіни працюють на повну потужність.
2. **Режим зниженого навантаження** – робота ВЕС при низькій швидкості вітру, коли вироблення електроенергії обмежене через недостатню силу вітру.
3. **Режим перевантаження або аварійний режим** – ситуація при надмірно високій швидкості вітру, коли система відключає генерацію для запобігання пошкодженням.

1. Номінальний режим роботи

Умови:

- Швидкість вітру: V_n (в межах 10–15 м/с залежно від характеристик турбіни).
- Потужність ВЕС: максимальна номінальна потужність P_n .

Модель:

1. Потужність P визначається за формулою:

$$P=0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3 \quad (2.1)$$

					МРЗ.8.141.613 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Михно Я.Р.			Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	Лит.	Арк.	Листів
Перевір.		Василега					19	73
Реценз.								
Н. Контр.		Василега П.О.						
Затверд.		Лебедка С.М.						
						СумДУ, гр. ЕТ.м-31		

де:

ρ – густина повітря (кг/м³),

A – площа обертання лопатей (м²),

C_p – коефіцієнт потужності (ефективність),

V – швидкість вітру (м/с).

2. Якщо $V=V_H$, то $P=P_H$.

3. Час роботи та енергія:

$$W=P_H \cdot t, \quad (2.2)$$

де W – вироблена енергія за час t .

2. Режим зниженого навантаження

Умови:

- Швидкість вітру: V_{\min} до $V_{\text{cut-in}}$ (3–10 м/с).

Модель:

1. Потужність P залежить від кубічної залежності:

$$P=0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3 (\text{при малих } V). \quad (2.3)$$

2. Якщо $V < V_{\text{cut-in}}$ (поріг запуску), потужність $P=0$.

3. Середня енергія вироблення розраховується як:

$$W_{\text{зн}} = \int_0^T P(v) dt \quad (2.4)$$

де T – тривалість зниженого навантаження.

3. Режим перевантаження або аварійний режим

Умови:

- Швидкість вітру: $V > V_{\text{cut-out}}$ (понад 25 м/с).

Модель:

1. При швидкості $V > V_{\text{cut-out}}$, автоматика зупиняє турбіну (потужність $P=0$) для уникнення пошкоджень.
2. Період простою може бути змодельований як втрата потужності за час T

$$W_{\text{втрати}} = P_H \cdot T_{\text{п}} \quad (2.5)$$

Давайте проведемо числове моделювання трьох режимів роботи ВЕС, використовуючи узагальнені технічні параметри та реалістичні вхідні дані.

Вхідні дані

1. Параметри повітря:
 - Густина повітря $\rho = 1.225$ кг/м³ (за стандартних умов).
2. Технічні параметри турбіни:
 - Діаметр ротора $D = 100$ м (велика вітрова турбіна).
 - Площа обертання лопатей:

$$A = \pi \cdot (D/2)^2 = \pi \cdot (50)^2 \approx 7854 \quad (2.6)$$

- Коефіцієнт потужності $C_p = 0.4$ (максимальне значення для сучасних турбін).
 - Номінальна потужність $P_H = 3 \text{ МВт} = 3000$.
3. Характеристики вітру:
 - Режим 1 (Номінальний): $V = 12$ м/с (оптимальна швидкість).

- Режим 2 (Знижене навантаження): $V=6$ м/с (низька швидкість вітру).
- Режим 3 (Перевантаження): $V=26$ м/с (швидкість понад граничну $V_{cut-out}=25$ м/с).

Розрахунок

1. Потужність турбіни для трьох режимів:

Використовуємо формулу 2.1 для встановлення потужностей

$$P=0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3$$

2. Енергія, вироблена за 1 годину:

$$W=P \cdot t$$

де $t=1$ год.

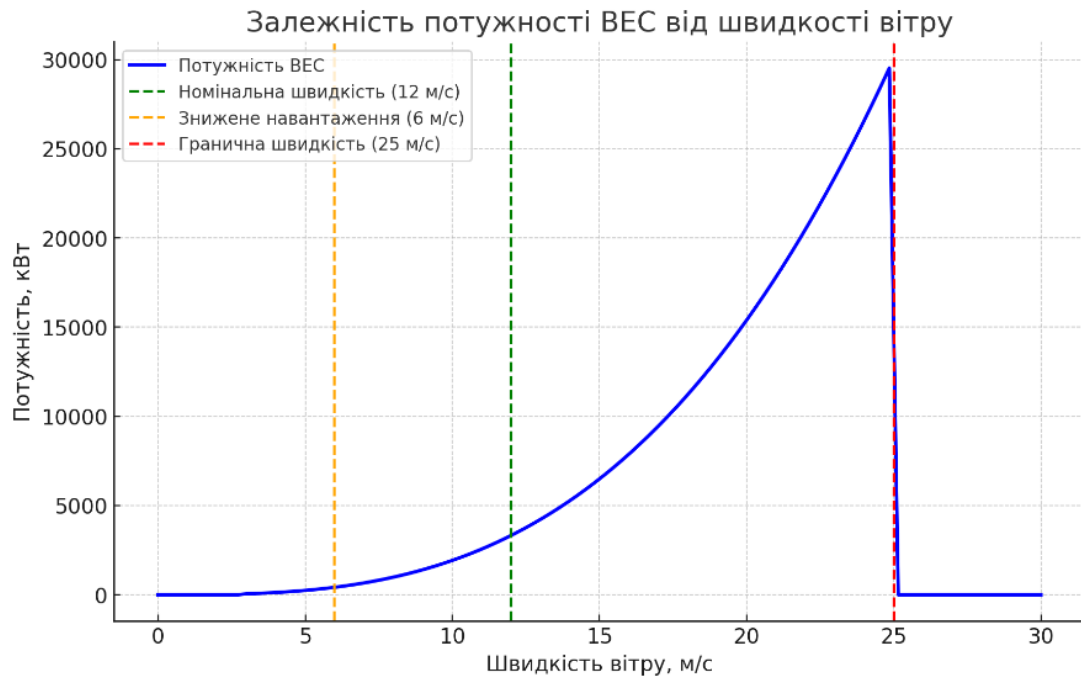
Результати розрахунків

1. Номінальний режим ($V = 12$ м/с):
 - Потужність: 3325.06 кВт (~3.3 МВт).
 - Енергія за 1 годину: 3325.06 кВт·год.
2. Режим зниженого навантаження ($V = 6$ м/с):
 - Потужність: 415.63 кВт (~0.42 МВт).
 - Енергія за 1 годину: 415.63 кВт·год.
3. Режим перевантаження ($V = 26$ м/с):
 - Потужність: 0 кВт (аварійне відключення).
 - Енергія за 1 годину: 0 кВт·год.

Ці результати демонструють ефективність роботи ВЕС залежно від швидкості вітру. Як бачимо:

- При оптимальних умовах (12 м/с) ВЕС працює на номінальній потужності.
- При низькому вітрі потужність значно знижується через кубічну залежність від швидкості.
- При надмірно сильному вітрі система відключається для захисту обладнання.

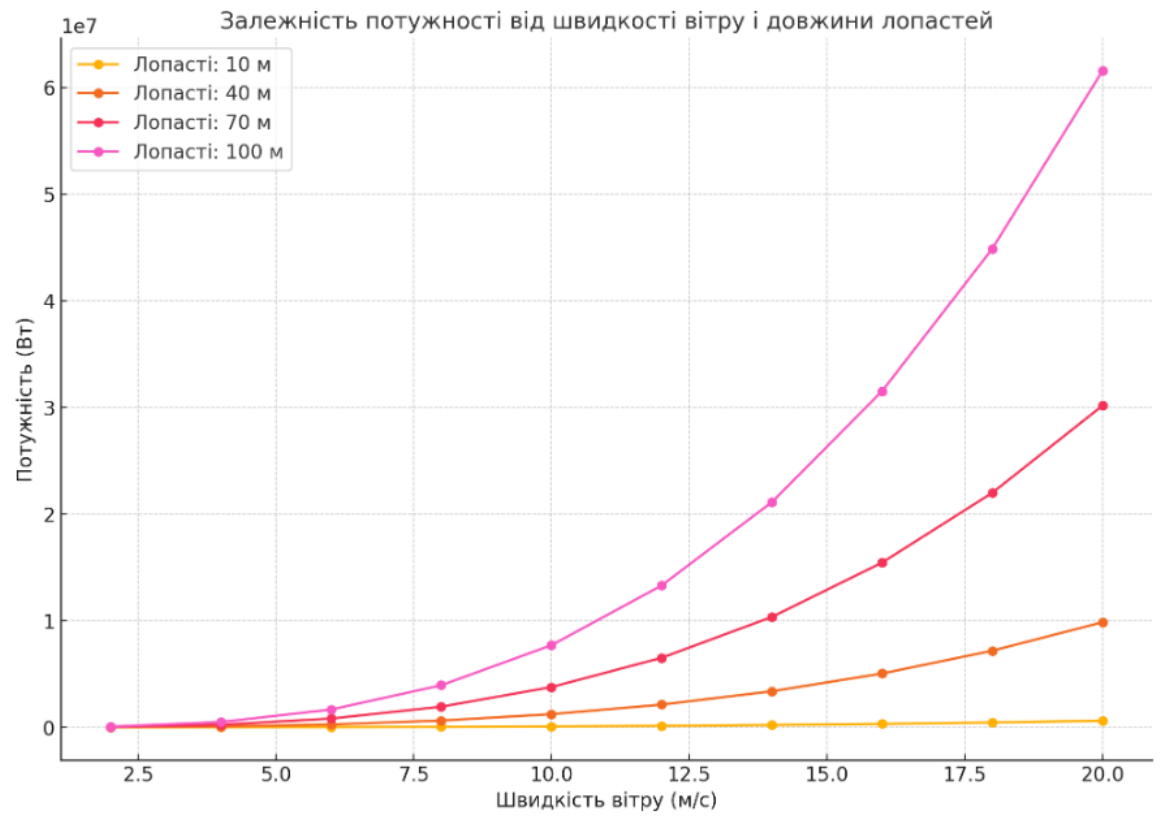
2.2 Огляд та аналіз даних



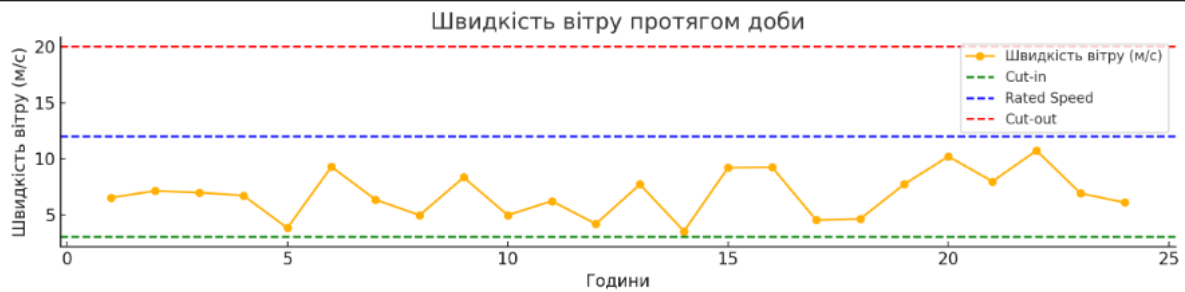
Графік 2.1 – Залежність потужності ВЕС від швидкості вітру

На графіку видно, як змінюється потужність ВЕС залежно від швидкості вітру:

1. До 3 м/с – мінімальна швидкість запуску, потужність дорівнює нулю.
2. 3–12 м/с – потужність зростає кубічно зі збільшенням швидкості вітру.
3. 12 м/с – досягається номінальна потужність (~3.3 МВт).
4. 12–25 м/с – потужність стабільно залишається на максимумі.
5. Понад 25 м/с – ВЕС вимикається для захисту, і потужність падає до нуля.



Графік 2.2 – Залежність потужності від швидкості вітру і довжини лопастей



Графік 2.3 – Швидкість вітру протягом доби



Графік 2.4 – Вихідна потужність турбіни протягом доби

Таблиця 2.1 - Залежність потужності від швидкості вітру і довжини лопастей

Довжина лопастей (м)	2 м/с	4 м/с	8 м/с	12 м/с	16 м/с	18 м/с	20 м/с
10	615.75	4926.02	39408.14	133002.49	315265.10	448883.28	615752.16
20	2463.01	19704.07	157632.57	532009.97	1261060.41	1795533.12	2463009.23
30	5541.77	44334.16	354673.25	1197022.45	2837385.59	4039950.34	5541769.44
40	9852.03	78816.28	630530.24	2128038.92	5044241.65	7182133.17	9852034.56
50	15393.80	123150.43	985203.50	3325062.33	7881628.00	11222084.99	15393804.00
60	22167.08	177336.62	1418693.10	4788089.79	11349539.81	16159801.35	22167077.64
70	30171.86	241374.85	1930998.64	6517120.71	15447985.83	21995275.88	30171855.85
80	39408.14	315265.11	2522120.97	8512158.77	20176968.92	28728526.34	39408138.25
90	49875.92	399007.40	3192059.36	10773204.08	25536468.79	36359551.91	49875924.97
100	61575.22	492601.73	3940813.83	13300249.32	31526510.02	44888327.97	61575216.01

У таблиці 2.1 наведено залежність потужності (Вт) від швидкості вітру (м/с) та довжини лопастей вітряка (м). Довжина лопастей варіюється від 10 до 100 метрів, а швидкість вітру — від 2 до 20 метрів за секунду. Потужність розраховується за формулою, яка враховує густину повітря, площу лопастей (пропорційно квадрату їхньої довжини), швидкість вітру (в третьому ступені) та коефіцієнт ефективності вітряка. Потужність зростає експоненційно зі збільшенням швидкості вітру та розмірів лопастей. Цей ріст пов'язаний із тим, що більші лопасті охоплюють більший обсяг вітру, а висока швидкість забезпечує більше енергії через кубічну залежність

У цьому прикладі ми використали **аналітичне моделювання** роботи вітроелектростанції (ВЕС) із застосуванням емпіричних формул та математичних моделей. Ось деталі підходу:

1. Модель кривої потужності вітротурбіни:

- Ми використали спрощену модель кривої потужності турбіни, яка описує залежність потужності від швидкості вітру.
- Крива складається з трьох зон:
 - **До cut-in:** турбіна не працює.
 - **Між cut-in і rated speed:** потужність зростає лінійно.
 - **Між rated speed і cut-out:** потужність фіксована на номінальному рівні.
 - **Після cut-out:** турбіна відключається.

2. Моделювання швидкості вітру:

- Використано генерацію випадкових значень швидкості вітру на основі нормального розподілу. Це умовний підхід для демонстрації, але в реальних умовах часто використовують розподіл Вейбулла.

3. Втрати системи:

- Додано врахування постійного коефіцієнта втрат (10%) через механічні та електричні втрати.

Розділ 3. Охорона праці. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів та ідентифікація факторів ризику

3.1. Електромагнітне випромінювання

Електромагнітне випромінювання (ЕМВ) є потенційно небезпечним виробничим фактором при роботі на вітроелектростанціях (ВЕС), де основними джерелами є електротехнічне обладнання, зокрема генератори, перетворювачі частоти, трансформатори та кабельні системи. Короткочасний вплив може викликати запаморочення, головний біль і втомлюваність, а довготривалий вплив — порушення в роботі нервової та серцево-судинної систем, а також потенційний розвиток онкологічних захворювань.

Місцями з найбільшим рівнем ЕМВ є обладнання високовольтних розподільчих пристроїв, зони навколо перетворювачів частоти та приміщення з електротехнічними шафами. Для мінімізації впливу ЕМВ слід використовувати засоби індивідуального захисту, обмежувати час перебування працівників у зонах з високим рівнем випромінювання, використовувати екрануючі матеріали при проектуванні обладнання та регулярно контролювати технічний стан систем. Також важливо проводити вимірювання рівня ЕМВ і вести журнал обліку результатів замірів.

3.2. Ризик травмування при обслуговуванні обладнання

Обслуговування обладнання вітроелектростанцій (ВЕС) пов'язане з високими ризиками травмування, зокрема під час робіт на висоті, взаємодії з обертовими частинами, електротехнічним обладнанням та технічного обслуговування механізмів.

					MP3.8.141.613 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	Лист.	Арк.	Листів
Розроб.		Михно Я.Р.						
Перевір.		Василега					27	73
Реценз.						СумДУ, гр. ЕТ.м-31		
Н. Контр.		Василега П.О.						
Затверд.		Лебелка С.М.						

Механічні ризики включають удари об обертові частини та затягування частин одягу в рухомі механізми. Електротехнічні ризики виникають при обслуговуванні генераторів чи трансформаторів, зокрема через ураження електричним струмом. Висотні роботи пов'язані з падінням з вежі або недостатнім захистом засобів для роботи на висоті. Також є ризики травмування через неправильне користування інструментами та несправності систем аварійного вимкнення обладнання.

Для зниження ризиків важливо проводити регулярні інструктажі з охорони праці, навчати персонал безпечним методам роботи з обладнанням, а також організовувати робочі місця з урахуванням безпеки. Працівникам необхідно надавати сертифіковані засоби індивідуального захисту, встановлювати бар'єри і захисні кожухи на рухомих частинах, регулярно перевіряти інструменти та обладнання на технічну справність. Також важливо проводити тестування аварійних систем та постійно моніторити умови праці на робочих місцях.

3.3. Аварійні ситуації: Падіння лопатей, короткі замикання та інші ризики

Аварійні ситуації на вітроелектростанціях виникають через технічні несправності, екстремальні погодні умови, порушення правил експлуатації або проєктні помилки. Найнебезпечніші сценарії включають падіння лопатей, короткі замикання в електросистемах, несправності гальмівної системи та пожежі.

Падіння лопатей може статися через руйнування матеріалу, перевищення допустимих навантажень або несправності кріплень, що призводить до пошкодження обладнання, травмування персоналу чи забруднення навколишнього середовища. Для запобігання проводиться регулярне техобслуговування, контроль зносу матеріалів та встановлення датчиків.

Короткі замикання виникають через пошкодження ізоляції, перенапруги або несправність захисту, що може призвести до пожеж чи перебоїв у роботі. Заходи безпеки включають блискавкозахист, автоматичні вимикачі та перевірку обладнання.

Несправності гальмівної системи спричиняють неконтрольоване обертання ротора та ризик руйнування конструкції. Для цього перевіряють гальмівні механізми, моніторять їхній стан і проводять заміну.

Пожежі можливі через перегрів трансформаторів або витік мастила. Їх запобігають установкою систем пожежогасіння та регулярним очищенням обладнання.

У разі аварії обладнання оперативно відключається, персонал евакуується за розробленим планом, інформуються відповідальні особи, а після усунення наслідків проводиться розслідування та впроваджуються запобіжні заходи.

Розробка інструкцій з техніки безпеки є одним із ключових організаційних заходів, спрямованих на запобігання травмам і аваріям під час експлуатації та обслуговування вітроелектростанцій (ВЕС). Інструкції визначають порядок дій персоналу для забезпечення безпечних умов праці, а також містять правила поведінки з обладнанням та реагування на надзвичайні ситуації.

1. **ДСТУ ГОСТ 12.0.004-2015** — "Організація навчання безпеки праці. Загальні положення". Регламентує порядок підготовки та навчання працівників з питань охорони праці.
2. **ДСТУ ГОСТ 12.0.230-2007** — "Система стандартів безпеки праці. Керівництво з розробки інструкцій з охорони праці". Визначає методіку складання інструкцій, їх структуру та зміст.

3. **Закон України "Про охорону праці"** — зобов'язує роботодавців забезпечити працівників інструкціями з охорони праці для виконання роботи в безпечних умовах.
4. **Кодекс законів про працю України (КЗпП України)** — передбачає обов'язок роботодавця створювати умови для виконання робіт, які відповідають вимогам безпеки та гігієни праці.

Етапи розробки інструкцій з техніки безпеки

1. Аналіз виробничих процесів

Ідентифікуються ризики, характерні для роботи на ВЕС, з урахуванням рекомендацій нормативних документів, таких як ДСТУ EN 50308:2019.

2. Визначення основних положень інструкцій

Формулюються вимоги до працівників, перелік засобів індивідуального захисту, правила використання обладнання та дії у разі аварій.

3. Розробка інструкції

Структурована інструкція включає загальні положення, вимоги безпеки до, під час і після роботи, а також алгоритми дій у разі аварій.

4. погодження та затвердження

Інструкції узгоджуються з інженером з охорони праці, затверджуються керівництвом і наказом по підприємству.

5. Впровадження та навчання персоналу

Проводяться інструктажі, тестування знань працівників і включення інструкцій у систему документації.

3.4 Блисквозахист

Розрахунок блискавкозахисту для вітроенергетичної станції (ВЕС) передбачає врахування кількох важливих аспектів, таких як висота турбін, їхня

кількість, розташування, рівень ризику блискавкових ударів, а також вимоги стандартів (наприклад, IEC 62305). Розглянемо основні кроки розрахунку.

1. Визначення рівня блискавкозахисту (LPL)

Вибір рівня блискавкозахисту залежить від важливості об'єкта та його ризиків. В стандарті IEC 62305 є 4 рівні блискавкозахисту:

- LPL I: Максимально суворі вимоги.
- LPL II–IV: Менш суворі залежно від ризиків.

Для ВЕС зазвичай обирають LPL I або II через високу ймовірність удару блискавки.

2. Розрахунок зони захисту

Для захисту використовуються методи розрахунку:

- **Метод кутового захисту** (особливо для високих споруд).
- **Метод катеноїдальної поверхні** для груп об'єктів.
- **Метод сітки.**

Для кожної вітротурбіни визначається висота, радіус і форма зони захисту від блискавковідводів (громовідводів).

Формули (метод кутового захисту):

- Радіус захисної зони R:

$$R = \sqrt{2hR_{strike} - h^2} \quad (3.1)$$

де:

- h — висота громовідводу,
- R_{strike} — радіус небезпечної сфери (залежить від LPL).

Для LPL I радіус сфери $R_{\text{strike}}=20$ м

для LPL II $R_{\text{strike}}=30$ м.

- **Розташування громовідводів**

Громовідводи мають бути трохи вищими за турбіни, а їх відстань забезпечує перекриття зон захисту. Для груп турбін може знадобитися кілька громовідводів.

- **Заземлення**

Забезпечується низький опір ($<10 \Omega$) через контурні заземлювачі, об'єднані в єдину мережу.

- **Оцінка ризиків**

Проводиться за методикою ІЕС 62305-2 з урахуванням частоти ударів блискавок, ймовірності пошкоджень і можливих наслідків.

- **Додаткові заходи**

Передбачено встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг та захист комунікаційних і енергетичних ліній.

Приклад розрахунку блискавкозахисту для однієї вітротурбіни

Вхідні дані:

1. **Висота турбіни (H):** 120 м (включаючи лопасті у вертикальному положенні).
2. **Рівень блискавкозахисту (LPL):** I (максимальний рівень захисту).
3. **Радіус сфери перехоплення (R_{strike}):** 20 м (згідно з LPL I).
4. **Висота громовідводу (h):** 125 м (громовідвід на 5 м вище верхньої точки турбіни).

5. **Місцевість:** Плоска рівнина з помірною щільністю ударів блискавок ($N_g=4$ удари/км²/рік).

1. Визначення радіусу зони захисту громовідводу

Застосовуємо **метод кутового захисту** для громовідводу. За допомогою формули

3.1 знаходимо радіус зони захисту:

$$R = \sqrt{2hR_{strike} - h^2}$$

Підставляємо значення:

- $h=125$ м,
- $R_{strike}=20$ м.

Обчислимо:

$$R = \sqrt{2 * 125 * 20 - 125^2} = 20 \text{ м} \quad (3.2)$$

Таким чином, зона захисту громовідводу має радіус 25 м біля основи.

2. Перевірка повного покриття турбіни

Радіус захисної зони RRR має перекривати всі важливі елементи турбіни (лопасті, генератор тощо).

- Максимальний горизонтальний виступ лопасті від основи турбіни: 60 м.
- Висота турбіни менша за висоту громовідводу h , тому турбіна повністю потрапляє в зону захисту.

3. Розрахунок частоти ударів блискавок у турбіну

Розрахунок частоти ударів блискавок у турбіну N :

$$N=A_e \cdot N_g \quad (3.3)$$

Де:

- A_e — ефективна площа захоплення блискавок (з урахуванням висоти).

$$A_e = \pi * (H + 0.5 + L)^2 \quad (3.4)$$

де $L=3 \cdot H$ — приблизна довжина лінії перехоплення блискавок.

Підставимо:

$$A_e = \pi * (120 + 0.5 + 360)^2 = 282743 \text{ м}^2$$

Обчислимо N :

$$N=A_e/10^6 \cdot N_g=282743/10^6 \cdot 4=1.13 \text{ удари/рік}$$

Ймовірність удару в турбіну становить приблизно 1 удар на рік.

4. Вибір заземлення

Для заземлення використовуємо контурний заземлювач, що забезпечує опір

$$R_{\text{заземлення}} < 10 \Omega$$

Рекомендації:

- Використання мідного провідника з перерізом $\geq 50 \text{ мм}^2$.
- Глибина закладення контуру: 0.8–1.0 м.
- Контур має форму квадрата зі стороною 20 м.

5. Додатковий захист

- Встановлення **SPD** для захисту від імпульсних перенапруг на енергетичних та сигнальних лініях.

- Інтеграція з грозозахистом всієї станції.

Висновок

Громовідвід висотою 125 м забезпечує повний захист турбіни (включаючи лопасті) з радіусом зони захисту 25 м. Турбіна має високу ймовірність удару блискавки (близько 1 разу на рік), тому необхідний ефективний заземлювач і пристрої захисту від перенапруг.

3.5 Розрахунок системи заземлення об'єкту

1. Визначення вимог до системи заземлення:

- Категорія вітряної електростанції (ВЕС) та потужність;
- Номінальна напруга обладнання;
- Наявність блискавкозахисту;
- Захист від коротких замикань та перенапруг.

2. Розрахунок струму замикання на землю: Для початку визначимо можливий струм замикання на землю в мережі ВЕС. Це залежить від типу підключення (нейтраль ізольована чи заземлена):

- Ізольована нейтраль: струм буде невеликим, формується ємнісним струмом;
- Заземлена нейтраль: струм буде залежати від опору заземлення та параметрів ліній.

Формула струму замикання на землю у разі заземленої нейтралі:

$$I_{\text{заз}} = U_{\text{ф}} / R_{\text{з}} \quad (3.5)$$

де:

- $I_{\text{заз}}$ — струм замикання на землю, А;

- U_{ϕ} — фазна напруга мережі, В;
- R_3 — опір заземлення, Ом.

3. Розрахунок опору заземлювального пристрою:

Опір заземлювача можна визначити за формулою для горизонтальних або вертикальних заземлювачів залежно від ґрунту:

Для вертикальних заземлювачів:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot L} * \ln\left(\frac{4 \cdot L}{d}\right) \quad (3.6)$$

де:

- ρ — питомий опір ґрунту, Ом·м;
- L — довжина заземлювача, м;
- d — діаметр заземлювача, м.

Для горизонтальних заземлювачів:

$$R = \frac{\rho}{L} * \left(\frac{1}{\pi} * \ln\left(\frac{2L}{h}\right) + 1\right) \quad (3.7)$$

де:

- h — глибина прокладання заземлювача, м.

4. Урахування питомого опору ґрунту: Питомий опір залежить від вологості та складу ґрунту. Орієнтовні значення:

- Волога земля: 30 Ом\м;
- Глина: 20–50 Ом\м;
- Пісок: 100–1000 Ом\м.

5. Перевірка системи заземлення за умовами безпеки: Для системи заземлення необхідно забезпечити безпечний потенціал дотику та відповідність вимогам до опору:

$$R_{з} \leq 50 / I_{зз}$$

де 50 В — припустима напруга дотику.

Приклад розрахунку

Вхідні дані:

- Фазна напруга $U_{ф} = 230$ В
- Опір заземлення $R_{з} = 4$ Ом
- Питомий опір ґрунту $\rho = 50$ Ом\м
- Вертикальний заземлювач $L = 3$ м $d = 0.05$ м

Розрахунок:

1. Струм замикання на землю:

$$I_{зз} = 230 / 4 = 57.5 \text{ А}$$

2. Опір вертикального заземлювача:

$$R = \frac{50}{2 \cdot 3} * \ln \left(\frac{4 \cdot 3}{0.05} \right) = 3.1$$

Підставивши значення, отримаємо $R = 3.1$ Ом.

3. Перевірка умов безпеки:

$$R_{з} \leq 50 / 57.5 \approx 0.87 \text{ Ом.}$$

За цих умов необхідно зменшити опір заземлення (наприклад, збільшивши кількість вертикальних електродів).

Висновки:

1. Необхідно оптимізувати конфігурацію заземлювачів для досягнення опору менше 1 Ом;
2. Для ВЕС критично враховувати блискавкозахист;
3. Проведення моделювання дозволить оцінити динамічні режими системи заземлення при аварія

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розділ 4. Економічна частина

4.1. Вступ

Економічний аналіз відіграє ключову роль у розвитку вітрових електростанцій (ВЕС), оскільки дозволяє оцінити рентабельність, доцільність і перспективність інвестицій у цей сектор. Зростання популярності відновлюваних джерел енергії супроводжується потребою в глибокому аналізі економічних аспектів, таких як початкові капіталовкладення, операційні витрати, фінансові моделі та очікувана вигода. Цей аналіз допомагає виявити сильні та слабкі сторони проєктів, визначити їх вплив на енергетичну систему та економіку загалом, а також знайти способи зниження витрат і підвищення ефективності.

Метою цього розділу є висвітлення сучасних економічних трендів у сфері вітрової енергетики, дослідження основних аспектів фінансування проєктів ВЕС та аналіз економічної вигоди від їх впровадження. Це дозволить сформулювати комплексне уявлення про економічну складову роботи ВЕС і підкреслити важливість цієї галузі для сталого розвитку енергетики.

4.2. Аналіз економічних трендів у сфері ВЕС

4.2.1 Глобальні тенденції розвитку відновлюваної енергетики

Відновлювана енергетика є одним із ключових драйверів сталого розвитку у світі, оскільки вона відіграє центральну роль у вирішенні проблем зміни клімату, забезпеченні енергетичної безпеки та стимулюванні економічного зростання.

					MP3.8.141.613 ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	<i>Лист.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Листів</i>
<i>Розроб.</i>		Михно Я.Р.						
<i>Перевір.</i>		Василега					39	73
<i>Реценз.</i>		Маценко				СумДУ, гр. ЕТ.м-31		
<i>Н. Контр.</i>		Василега П.О.						
<i>Затверд.</i>		Лебедка С.М.						

За останні десятиліття глобальні тенденції у цій галузі демонструють вражаюче зростання, що пояснюється як технологічними інноваціями, так і політичними та економічними зрушеннями. [10]

1. Технологічний прогрес

Однією з головних рушійних сил розвитку відновлюваної енергетики є стрімкий прогрес у технологіях. Новітні розробки дозволяють значно підвищувати ефективність перетворення енергії з природних джерел, таких як сонце, вітер, вода та геотермальні ресурси.[10] Наприклад, сучасні сонячні панелі демонструють вищий рівень продуктивності, знижуючи собівартість виробництва енергії, а розвиток акумуляторних технологій сприяє більшому проникненню відновлюваних джерел у глобальну енергосистему.[8]

2. Зниження вартості відновлюваної енергетики

Вартість виробництва енергії з відновлюваних джерел суттєво знизилася завдяки масштабному впровадженню цих технологій і вдосконаленню виробничих процесів. Наприклад, за даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), за останнє десятиліття вартість сонячної та вітрової енергії зменшилася на понад 70%, що зробило їх конкурентоспроможними порівняно з традиційними джерелами, такими як вугілля та природний газ.[13]

3. Політична підтримка та міжнародні ініціативи

Уряди багатьох країн активно впроваджують політики, спрямовані на розвиток відновлюваної енергетики. Серед найважливіших механізмів підтримки — субсидії, податкові пільги та "зелені" тарифи. Крім того, міжнародні ініціативи, такі як Паризька кліматична угода, ставлять амбітні цілі зі зниження викидів парникових газів, що стимулює країни інвестувати у відновлювану енергетику.

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

4. Диверсифікація джерел енергії

Глобальна енергетична система переживає значні зміни у структурі джерел енергії. Традиційні викопні джерела поступово витісняються відновлюваними, що сприяє створенню більш стійкої енергосистеми. Одночасно спостерігається розвиток гібридних рішень, які поєднують різні види відновлюваної енергетики, забезпечуючи більш стабільне енергопостачання.

5. Інтеграція відновлюваних джерел у глобальну енергомережу

Розвиток "розумних" мереж (smart grids) дозволяє краще інтегрувати відновлювані джерела енергії у глобальну енергетичну інфраструктуру. Це включає використання цифрових технологій для управління потоками енергії, що значно знижує втрати та забезпечує стабільність енергопостачання навіть у періоди пікових навантажень.

6. Економічні та соціальні переваги

Відновлювана енергетика стала значним джерелом створення робочих місць. За даними IRENA, лише у 2023 році в цьому секторі було створено понад 12 мільйонів робочих місць. Крім того, розвиток відновлюваної енергетики сприяє покращенню якості життя, особливо у віддалених регіонах, які завдяки локальним відновлюваним джерелам отримують доступ до стабільного енергопостачання.

7. Розвиток приватного сектору та інвестицій

Приватні інвестори відіграють важливу роль у фінансуванні проєктів у галузі відновлюваної енергетики. Зростання попиту на "зелені" облігації та інші фінансові інструменти відображає збільшення інтересу до цього сектору, оскільки інвестори шукають екологічно стійкі та фінансово вигідні проєкти.

Ці глобальні тенденції демонструють, що відновлювана енергетика є не лише технологічною чи екологічною, але й економічною трансформацією, яка змінює фундаментальні підходи до виробництва, споживання та розподілу енергії у світі.

4.2.2. Стан ринку ВЕС в Україні та світі:

Зростання інвестицій у вітрову енергетику

Вітрова енергетика є одним із найбільш привабливих секторів для інвесторів у сфері відновлюваної енергетики. Її розвиток обумовлений стрімким зниженням вартості технологій, високою рентабельністю проєктів і глобальним переходом до екологічно чистих джерел енергії.[12] У 2023 році загальний обсяг інвестицій у вітрову енергетику досяг рекордних показників, перевищивши \$160 мільярдів, що свідчить про стабільну довіру до цього сектору з боку державних і приватних інвесторів.

1. Приватні інвестори

Великі корпорації, що спеціалізуються на енергетиці, активно інвестують у проєкти ВЕС:

- **Orsted (Данія)** – одна з найбільших компаній у світі, що займається розвитком офшорних вітрових електростанцій. У 2023 році Orsted інвестувала понад \$10 мільярдів у проєкти офшорних ВЕС, включаючи масштабні установки у Північному морі.
- **Iberdrola (Іспанія)** – компанія, яка планує витратити \$47 мільярдів до 2030 року на проєкти відновлюваної енергетики, значна частина з яких припадає на вітрову енергетику. Її ключовими проєктами є офшорна станція East Anglia ONE у Великій Британії та наземні установки в Латинській Америці.

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

2. Фінансові установи та інвестиційні фонди

Банки та інвестиційні фонди відіграють важливу роль у фінансуванні великих проєктів у сфері вітрової енергетики:

- **BlackRock** – найбільший у світі інвестиційний фонд, який активно підтримує проєкти ВЕС через свою програму BlackRock Renewable Power. У 2022 році фонд інвестував у кілька великих проєктів у Європі та Азії.[18]
- **Goldman Sachs** – фінансова група, яка оголосила про плани виділити \$750 мільярдів на "зелені" ініціативи до 2030 року, включаючи проєкти з розвитку вітрової енергетики.[24]

3. Міжнародні фінансові організації

Такі організації, як Світовий банк та Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР), також підтримують розвиток вітрової енергетики у країнах, що розвиваються:

- **Світовий банк** – фінансує вітрові проєкти в Африці та Південній Азії. Наприклад, програма Scaling Solar допомагає країнам запускати гібридні установки з використанням вітрових і сонячних ресурсів.
- **ЄБРР** – активно інвестує в розвиток вітрової енергетики у Східній Європі та Центральній Азії. У 2023 році банк профінансував будівництво декількох вітропарків у Казахстані та Туреччині.

4. Національні уряди та державні програми

Уряди багатьох країн створюють спеціальні фонди та програми для залучення інвестицій у ВЕС:

- У Китаї урядова програма "Made in China 2025" стимулює розвиток відновлюваної енергетики, включаючи вітрову, через надання субсидій і пільгового кредитування.[23]
- У США через ініціативу Inflation Reduction Act (IRA) передбачено мільярдні податкові пільги для інвесторів, які підтримують розвиток вітрових електростанцій.[24]

5. Приклади успішних інвестиційних проєктів

- **Hornsea Project (Великобританія)** – офшорний вітропарк, який став найбільшим у світі після завершення другої фази будівництва у 2023 році. Проєкт був реалізований за підтримки Orsted і залучив понад \$10 мільярдів інвестицій.[18]
- **Gansu Wind Farm (Китай)** – один із найбільших вітропарків у світі, що фінансується урядом Китаю і приватними інвесторами. Потужність комплексу вже перевищує 8 ГВт, а загальні інвестиції сягають \$20 мільярдів.

Зростання інвестицій у вітрову енергетику є результатом синергії між приватним бізнесом, державними ініціативами та міжнародними організаціями. Це забезпечує галузь фінансовою стабільністю та створює основу для подальшого розвитку, сприяючи глобальному переходу до чистої енергетики.[24]

Зниження вартості обладнання (турбін, генераторів)

Однією з основних причин зростання популярності вітрової енергетики є стрімке зниження вартості обладнання, зокрема вітрових турбін і генераторів. Ця тенденція забезпечила доступність вітрових електростанцій (ВЕС) як для великих енергетичних корпорацій, так і для локальних проєктів, зробивши їх конкурентоспроможними у порівнянні з традиційними джерелами енергії.

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1. Зниження середньої вартості турбін

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), середня вартість виготовлення та встановлення вітрових турбін зменшилася приблизно на 40% за останні 10 років. У 2010 році середня ціна на наземну вітрову турбіну становила близько \$1,6 мільйона за мегават (МВт) потужності, тоді як у 2023 році ця цифра знизилася до \$0,9–1,0 мільйона за МВт.

Для офшорних турбін зниження ще більш виразне: у 2010 році середня вартість встановлення офшорної турбіни складала понад \$5 мільйонів за МВт, тоді як у 2023 році ця цифра впала до \$3 мільйонів за МВт. Наприклад, нові проекти вітропарків у Північному морі зараз реалізуються із середньою вартістю, на 35% нижчою, ніж у 2015 році.

2. Технологічний прогрес

Однією з ключових причин зниження вартості є розвиток технологій:

- **Збільшення розміру турбін.** Сучасні турбіни стали більш потужними завдяки збільшенню діаметра ротора та висоти башти. Наприклад, у 2010 році стандартною була турбіна з діаметром ротора 100 метрів і потужністю 2 МВт, а у 2023 році сучасні моделі, як Vestas V236-15.0 MW, мають діаметр ротора 236 метрів і потужність 15 МВт. Це дозволяє значно знижувати вартість енергії, виробленої кожною турбіною.[9]

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата



Рисунок 4.1 - Vestas V236-15.0 MW

- **Масштабне виробництво.** Завдяки збільшенню попиту на вітрову енергетику виробники перейшли до масштабного серійного виробництва, що дозволило зменшити собівартість обладнання.

3. Матеріали та оптимізація

- **Нові матеріали.** Сучасні вітрові лопаті виготовляються з удосконалених композитних матеріалів, які є легшими, але міцнішими, що знижує витрати на транспортування та монтаж.[24]
- **Оптимізація конструкцій.** Сучасні конструкції дозволяють зменшувати витрати на обслуговування. Наприклад, турбіни останнього покоління мають вдосконалені системи контролю навантажень, які знижують знос основних компонентів.[24]

4. Порівняння з іншими джерелами енергії

Вартість виробництва електроенергії (LCOE) з вітрових турбін у 2023 році впала до \$40–50 за мегават-годину (МВт·год) для наземних турбін і \$70–80 за МВт·год для офшорних турбін. Для порівняння:[23]

- У 2010 році ці показники становили \$70–90 за МВт·год для наземних і \$140–160 для офшорних турбін.[1]
- Для порівняння, виробництво електроенергії з вугілля залишається на рівні \$60–110 за МВт·год залежно від регіону, що робить вітрову енергетику більш конкурентною.[1]

5. Регіональні успіхи

- У Китаї, найбільшому виробнику вітрових турбін, завдяки внутрішньому ринку та субсидіям вартість обладнання є однією з найнижчих у світі. У 2023 році китайські виробники, такі як Goldwind, постачали турбіни за ціною близько \$0,85 мільйона за МВт.[24]
- У Європі зниження вартості офшорних турбін стало можливим завдяки проектам, таким як Hornsea Project у Великобританії, де використання гігантських турбін нового покоління зменшило витрати на встановлення на 30% порівняно з 2017 роком.

6. Перспективи подальшого зниження

Експерти прогнозують, що до 2030 року вартість обладнання для вітрової енергетики продовжить знижуватись завдяки впровадженню нових технологій, таких як модульні конструкції та автоматизація виробничих процесів. Наприклад, очікується, що масове використання 3D-друку для виробництва компонентів дозволить скоротити витрати ще на 10–15%.[24]

Зниження вартості обладнання є важливим фактором, який стимулює глобальний розвиток вітрової енергетики, роблячи її більш доступною та конкурентною у порівнянні з іншими джерелами енергії.

Розвиток технологій, що підвищують ефективність

Вітрова енергетика демонструє стрімкий технологічний розвиток, який суттєво підвищує ефективність роботи вітрових електростанцій (ВЕС). Інновації охоплюють різні аспекти — від дизайну турбін до систем управління, зберігання енергії та оптимізації роботи вітропарків. Удосконалення технологій дозволяє генерувати більше енергії за менших витрат, підвищуючи економічну вигідність цього джерела енергії.

1. Збільшення розміру турбін

Сучасні турбіни стають дедалі більшими, що дозволяє збільшувати обсяг енергії, яку вони можуть генерувати:

- **Турбіни нового покоління.** Наприклад, турбіна **GE Haliade-X** (США) має потужність 14–18 МВт і ротор діаметром 220 метрів, що дозволяє одній такій турбіні забезпечувати електроенергією до 16 000 домогосподарств.
- **Переваги збільшення розміру.** Чим більший діаметр ротора, тим більше енергії можна отримати навіть за слабого вітру, що особливо важливо для регіонів із середніми швидкостями вітру.

2. Інноваційні матеріали для лопатей турбін

Вітрові лопаті тепер виготовляються із сучасних композитних матеріалів, які є легшими, міцнішими та більш стійкими до зношення:

- **Розробка нових матеріалів.** Наприклад, компанія **Siemens Gamesa** впровадила лопаті з композитів, що легко переробляються, знижуючи вплив на навколишнє середовище.
- **Довші лопаті.** Завдяки новим матеріалам зростає довжина лопатей, що збільшує площу захоплення вітру. Турбіни з довгими лопатями ефективніше працюють у різних кліматичних умовах.

3. Системи управління та прогнозування

Цифрові технології відіграють важливу роль у підвищенні ефективності роботи ВЕС:

- **"Розумні" сенсори.** Сучасні турбіни оснащуються сенсорами, які в режимі реального часу моніторять погодні умови, вібрації та стан обладнання. Це дозволяє запобігати аваріям і знижувати витрати на технічне обслуговування.[24]
- **Системи прогнозування.** Використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування швидкості вітру дозволяє точніше планувати роботу турбін, підвищуючи ефективність виробництва енергії.[24]

4. Інтеграція акумуляторних систем

Для підвищення стабільності енергопостачання впроваджуються системи зберігання енергії:

- **Літій-іонні батареї.** Наприклад, проєкт Hornsdale Power Reserve в Австралії, оснащений батареями Tesla, дозволяє накопичувати енергію, вироблену вітропарком, для її використання у пікові періоди.

- **Гібридні рішення.** У багатьох проєктах поєднують вітрову енергію з сонячною та системами накопичення, що забезпечує стабільну роботу в умовах змінної погоди.[24]

5. Оптимізація розташування вітропарків

- **Комп'ютерне моделювання.** Перед будівництвом використовується програмне забезпечення, яке моделює потоки вітру, допомагаючи визначити оптимальне розташування турбін для максимального захоплення енергії.[19]
- **Морські вітропарки.** Офшорні установки демонструють вищу ефективність завдяки постійно високим швидкостям вітру. Наприклад, офшорний проєкт Dogger Bank у Великій Британії після завершення стане найбільшим у світі, з прогнозованою потужністю 3,6 ГВт.[23]

6. Системи прямого приводу (Direct Drive)

У багатьох сучасних турбінах замість традиційних редукторів використовується система прямого приводу, що зменшує кількість механічних деталей і підвищує ефективність:

- Наприклад, турбіни компанії **Enercon** працюють за цією технологією, демонструючи високу надійність і менші витрати на обслуговування.

7. Аеродинамічні вдосконалення

Сучасні турбіни розробляються з урахуванням кращої аеродинаміки, що знижує турбулентність і підвищує ефективність захоплення енергії. Наприклад, технологія "**активних лопатей**", впроваджена компанією **Vestas**, дозволяє змінювати форму лопатей залежно від швидкості вітру.

8. Приклади ефективних технологій у сучасних проєктах

- **Triton Knoll (Великобританія):** Використовує турбіни Siemens Gamesa з потужністю 9,5 МВт кожна, що оснащені інтелектуальними системами моніторингу.
- **Lake Turkana Wind Power (Кенія):** Найбільший наземний вітропарк в Африці, який використовує інноваційне обладнання, адаптоване до високих швидкостей вітру в регіоні.

Політичні та економічні фактори, що впливають на галузь:

Субсидії, "зелені" тарифи

Субсидії та "зелені" тарифи є ключовими інструментами, які уряди та міжнародні організації використовують для стимулювання розвитку вітрової енергетики. Ці механізми спрямовані на зниження фінансових ризиків, підтримку інвесторів та підвищення економічної привабливості проєктів у галузі відновлюваної енергетики.[18]

Субсидії у вітровій енергетиці можуть мати різні форми, зокрема прямі фінансові виплати, податкові пільги або компенсації за частину витрат на будівництво та експлуатацію вітрових електростанцій (ВЕС). Наприклад, у Європейському Союзі діють програми підтримки, які покривають до 30% капітальних витрат на проєкти ВЕС у деяких країнах. Податкові кредити у США, такі як Production Tax Credit (PTC), дозволяють знизити податкове навантаження на інвесторів за кожен мегават-годину виробленої електроенергії з вітрових турбін.

"Зелені" тарифи – це гарантована ціна, яку держава зобов'язується виплачувати виробникам енергії з відновлюваних джерел, включаючи вітрову енергетику, за кожен вироблену одиницю енергії. Ця ціна зазвичай встановлюється

вище ринкової вартості електроенергії, щоб компенсувати початкові витрати на створення інфраструктури та стимулювати інвестиції. Наприклад, у Німеччині "зелений" тариф для наземних ВЕС у рамках закону EEG (Energieeinspeisungsgesetz) протягом багатьох років забезпечував стабільний дохід інвесторам, що стало важливим чинником розвитку галузі.

Крім того, у багатьох країнах запроваджуються аукціони на продаж електроенергії з відновлюваних джерел, що дозволяють зменшити розмір державних субсидій за рахунок конкурентних ставок. Наприклад, в Індії завдяки аукціонам вартість електроенергії з ВЕС знизилася майже на 50% за останнє десятиліття.

Законодавчі ініціативи в галузі вітроенергетики (ВЕС) без "зелених тарифів" спрямовані на стимулювання розвитку галузі без прямої фінансової підтримки держави через фіксовану високу ціну на електроенергію з відновлюваних джерел. Замість цього вони включають інші механізми, які сприяють розвитку інфраструктури, створюють сприятливі умови для інвестицій і підтримують інтеграцію ВЕС в енергосистему. Ось кілька прикладів таких ініціатив:

Система аукціонів

Суть: Інвестори пропонують свої проекти на відкритих аукціонах, і право на реалізацію отримують ті, хто пропонує найнижчу ціну за кіловат-годину електроенергії.

Приклад: В Україні у 2020 році впроваджено систему "зелених аукціонів". Цей механізм замінив "зелений тариф" для нових проектів відновлюваної енергетики. Учасники аукціонів змагаються за можливість побудувати електростанцію, а держава гарантує довгостроковий контракт на закупівлю електроенергії.[24]

Стимулювання через податкові пільги

Суть: Запровадження податкових пільг для компаній, які інвестують у будівництво ВЕС або виробництво обладнання для вітроенергетики.

Приклад: У Німеччині надають податкові знижки для проектів, що відповідають вимогам сталого розвитку, включаючи відновлювану енергетику.[23]

Підтримка через контракти на різницю цін (Contracts for Difference, CfD)

Суть: Держава гарантує, що якщо ринкова ціна електроенергії впаде нижче за узгоджену базову ціну, то різниця буде компенсована. Якщо ж ціна перевищить базову, виробник повертає різницю державі.

Приклад: У Великій Британії система CfD підтримує розвиток великих ВЕС, таких як морські вітропарки.

Інвестиції у мережі та інфраструктуру

Суть: Фінансування будівництва мереж для приєднання ВЕС, що знижує витрати для приватних інвесторів.

Приклад: У Данії держава фінансує будівництво офшорних електричних підстанцій для інтеграції морських вітропарків в національну енергосистему.

Ринок гарантій походження електроенергії

Суть: Виробникам ВЕС видаються сертифікати, які підтверджують "зелене" походження електроенергії. Ці сертифікати можна продавати окремо на ринку.

Приклад: У ЄС гарантії походження використовуються для підтвердження використання "чистої" електроенергії великими корпораціями.

Енергетична незалежність вітроелектростанцій (ВЕС) з економічної точки зору полягає у зниженні витрат на імпорт енергоресурсів, стабілізації цін на електроенергію та створенні нових економічних можливостей. Виробництво

електроенергії за допомогою ВЕС дозволяє уникнути витрат на закупівлю викопного палива, ціни на яке часто коливаються через глобальні ринки та геополітичні фактори. Це особливо важливо для країн, які імпортують значну частину енергоносіїв, наприклад газ чи вугілля.

Розрахунок вигоди:

Припустимо, країна імпортує 10 мільярдів кубометрів природного газу щорічно за середньою ціною \$500 за тисячу кубометрів. Це становить \$5 мільярдів на рік. Встановлення ВЕС потужністю 5 ГВт (з урахуванням коефіцієнта використання встановленої потужності 35%) виробляє близько 15,3 ТВт·год електроенергії щорічно. Якщо 1 ТВт·год електроенергії замінює 0,1 мільярда кубометрів газу, то ВЕС зменшать потребу в імпорті на 1,53 мільярда кубометрів газу, що еквівалентно економії \$765 мільйонів щороку.

Окрім цього, розвиток ВЕС створює нові робочі місця у сфері виробництва обладнання, будівництва, експлуатації та обслуговування станцій. Наприклад, будівництво одного ГВт ВЕС може створити близько 10 тисяч робочих місць протягом будівництва та 500 постійних робочих місць для їх обслуговування. Ці економічні вигоди сприяють зміцненню національної економіки та зменшують її вразливість до зовнішніх шоків.

4.3. Фінансування проєктів ВЕС

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

Джерела фінансування для розвитку вітроелектростанцій (ВЕС) із поясненням та прикладним розрахунком:

1. Державні програми та гранти

Державні програми надають фінансову підтримку для розвитку відновлюваної енергетики. Ця підтримка може включати прямі субсидії, гранти, податкові пільги або пільгове кредитування. Держава зацікавлена у таких програмах, оскільки ВЕС сприяють енергетичній незалежності, створенню робочих місць і зниженню викидів CO₂.

Розрахунок:

Уявімо, що держава виділяє грантовий фонд у розмірі \$1 мільярд на підтримку ВЕС. Якщо частка державного фінансування становить 20% від загальної вартості проектів, то це дозволяє залучити додаткові \$4 мільярди приватних інвестицій, забезпечивши будівництво ВЕС потужністю 2 ГВт (з вартістю \$2,5 мільйона за 1 МВт).

- **Вигода:** Держава отримує довгострокові податкові надходження з реалізованих проектів і зменшує витрати на імпорт енергоресурсів.

2. Приватні інвестиції та інвестиційні фонди

Приватні компанії або фонди часто інвестують у ВЕС, отримуючи прибуток від продажу електроенергії. Для залучення таких інвесторів важливим є стабільне законодавче середовище.

Приклад: Якщо фонд інвестує \$2 мільярди у ВЕС з очікуваною рентабельністю 8% на рік, то при виробництві 6,14 ТВт·год електроенергії щороку (для ВЕС потужністю 2 ГВт), середній дохід становитиме \$0,08 за кВт·год. Відповідно, річний дохід — \$491,2 мільйона.

3. Міжнародні фінансові організації (МФО)

Багато міжнародних організацій, таких як Світовий банк, Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) або Міжнародна фінансова корпорація (IFC), надають пільгові кредити або гранти для проектів у сфері відновлюваної енергетики.

Розрахунок: МФО надає кредит на \$500 мільйонів із пільговою ставкою 2% річних (у порівнянні зі звичайними ринковими 7%). Для проекту тривалістю 15 років економія на відсотках становить близько \$187 мільйонів, що дозволяє знизити кінцеву вартість проекту та прискорити окупність.

4. Зелений банкінг та облігації

"Зелені" облігації — це боргові інструменти, що випускаються для фінансування екологічних проектів. Банки також пропонують кредити з нижчими ставками для таких проектів.

Розрахунок: Якщо компанія випускає "зелені" облігації на \$1 мільярд під 3% річних для будівництва 500 МВт ВЕС, то щорічна виплата за облігаціями становитиме \$30 мільйонів. При цьому прибуток від продажу електроенергії за ціною \$0,08 за кВт·год становитиме \$122,6 мільйона на рік (для 1,75 ТВт·год виробленої електроенергії). Це забезпечує стабільний дохід для погашення боргу та отримання прибутку.

5. Фінансування через механізми аукціонів

Державні аукціони на будівництво ВЕС дозволяють інвесторам отримувати гарантований дохід, що стимулює їх до участі.

Приклад: Держава проводить аукціон, гарантує купівлю електроенергії за \$0,07/кВт·год. Проект ВЕС потужністю 300 МВт при виробництві 0,9 ТВт·год забезпечить дохід \$63 мільйони щороку.

6. Лізинг та енергосервісні контракти (ESCO)

Лізинг дозволяє підприємствам використовувати обладнання для ВЕС без значних початкових витрат, сплачуючи лише за його використання.

Приклад: Для проекту вартістю \$100 мільйонів лізингова компанія надає фінансування з виплатою \$8 мільйонів щорічно протягом 15 років.

Етапи фінансування проектів вітроелектростанцій (ВЕС):

1. Початкові витрати на планування і проєктування

Цей етап включає витрати, пов'язані з оцінкою доцільності проєкту, підготовкою документації та отриманням необхідних дозволів. Сюди входять:

- Проведення досліджень вітрового потенціалу регіону (анемометричні вимірювання);
- Екологічна оцінка впливу проєкту на навколишнє середовище;
- Розробка техніко-економічного обґрунтування;
- Інженерні розробки та створення проєктної документації;
- Оформлення юридичних документів і дозволів для будівництва;
- Узгодження з місцевими органами влади та операторами електромереж.

Цей етап критично важливий, оскільки визначає доцільність проєкту та його довгострокову економічну ефективність.

2. Капіталовкладення в будівництво

Основна частина витрат припадає на будівництво ВЕС. Сюди входять:

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

- Придбання та транспортування вітрогенераторів, турбін, башт і лопатей;
- Будівництво фундаментів і встановлення віротурбін;
- Інфраструктурні роботи, включаючи будівництво під'їзних шляхів і електричних підстанцій;
- Підключення до енергомережі, включаючи монтаж кабельних систем;
- Витрати на технічний нагляд і управління проектом.

Цей етап вимагає значних фінансових ресурсів, тому часто залучаються кредити, інвестиції або державна підтримка.

3. Операційні витрати (обслуговування)

Після запуску ВЕС витрати зменшуються, але підтримка роботи станції вимагає постійного фінансування. Операційні витрати включають:

- Технічне обслуговування вітрогенераторів (перевірка та ремонт механізмів, заміна деталей);
- Контроль роботи систем управління та моніторингу;
- Витрати на страхування обладнання та об'єктів;
- Оплата праці технічного персоналу;
- Адміністративні витрати, включаючи управління станцією;
- Плата за оренду землі, якщо територія не є власністю компанії.

Операційні витрати мають стабільний характер і зазвичай складають невелику частку від загальної вартості проекту, але потребують довгострокового планування для забезпечення ефективної роботи ВЕС.

Ці три етапи фінансування разом формують комплексний підхід до забезпечення життєздатності проекту вітроелектростанції на всіх його стадіях.

Приклади моделей фінансування успішних проєктів вітроелектростанцій (ВЕС)

1. Модель з участю держави та міжнародних фінансових організацій

Приклад: Проєкт вітропарку "Сиваш" в Україні [25]

Потужність: 250 МВт

Загальна вартість: \$369 мільйонів

Структура фінансування:

- **Міжнародні фінансові організації:** Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) і Міжнародна фінансова корпорація (IFC) надали кредити на загальну суму \$262 мільйони.[24]
- **Державна підтримка:** Надання гарантій та забезпечення стабільності інвестиційного клімату через "зелені" аукціони.
- **Приватні інвестори:** Партнери профінансували \$107 мільйонів через акціонерний капітал.

Результати:

1. Виробництво понад 850 ГВт·год електроенергії на рік, що забезпечує енергією понад 100 тисяч домогосподарств.
2. Економія імпорту енергоресурсів на \$50 мільйонів щорічно.
3. Зниження викидів CO₂ на 460 тисяч тонн на рік.

2. Модель концесії з залученням приватного капіталу

Приклад: Морський вітропарк "Horns Rev 3" у Данії [25]

Потужність: 407 МВт

Загальна вартість: \$1,2 мільярда

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

Структура фінансування:

- **Державний аукціон:** Данська держава провела аукціон, де учасники змагалися за право будівництва вітропарку. Компанія Vattenfall виграла з пропозицією найнижчого тарифу.
- **Приватне фінансування:** Усі інвестиції покриті приватний інвестор.
- **Податкова підтримка:** Держава надала податкові пільги для початкових років експлуатації.

Результати:

1. Виробництво 1,7 ТВт·год на рік, що покриває потреби в електроенергії понад 425 тисяч домогосподарств.
2. Ефективне залучення приватних коштів без прямої державної фінансової участі.
3. Стабільний прибуток інвестора через довгострокові контракти на закупівлю електроенергії.

3. Модель державно-приватного партнерства (ДПП)

Приклад: Проєкт "Lake Turkana Wind Power" у Кенії [25]

Потужність: 310 МВт

Загальна вартість: \$680 мільйонів

Структура фінансування:

- **Державний компонент:** Уряд Кенії профінансував будівництво інфраструктури (лінії передачі на 428 км).
- **Приватні інвестори:** Консорціум інвесторів (Vestas, Aldwych International) покрити основну частину капіталовкладень.

- **Міжнародна підтримка:** Африканський банк розвитку надав пільгові кредити на суму \$200 мільйонів.

Результати:

1. Виробництво 1,3 ТВт·год щорічно, що покриває 15% енергоспоживання Кенії.
2. Економія на закупівлі палива для теплових станцій у розмірі \$120 мільйонів щороку.
3. Створення понад 2 тисяч робочих місць на етапі будівництва і 200 постійних на етапі експлуатації.

Розрахунок вигоди для інвестора (умовний):

Розглянемо інвестора в проєкті потужністю 100 МВт, з вартістю \$2,5 мільйони за МВт (загальна вартість \$250 мільйонів).[25]

- **Виробництво електроенергії:** 350 ГВт·год/рік.
- **Ціна реалізації електроенергії:** \$0,08 за кВт·год.
- **Річний дохід:** \$28 мільйонів.
- **Експлуатаційні витрати:** \$5 мільйонів.
- **Чистий річний прибуток:** \$23 мільйони.
- **Окупність:** 10,9 років без урахування дисконтування.

Висновок

Успішні моделі фінансування ВЕС базуються на поєднанні державної підтримки, приватних інвестицій і міжнародних кредитів. Ефективна структура дозволяє оптимізувати ризики, забезпечувати довгостроковий прибуток і сприяти розвитку відновлюваної енергетики. [25]

4.4. Економічна вигода від реалізації ВЕС

Реалізація вітроелектростанцій (ВЕС) забезпечує суттєві економічні вигоди завдяки зменшенню витрат на імпорт енергоресурсів, стабільним доходам від продажу електроенергії, створенню робочих місць і скороченню викидів парникових газів. Для оцінки економічної ефективності проекту ВЕС часто використовується **чиста приведена вартість (NPV)**. [25]

Розрахунок NPV (Net Present Value)

Чиста приведена вартість показує різницю між приведеною вартістю доходів (виручки) та приведеною вартістю витрат проекту. Проект вважається економічно ефективним, якщо $NPV > 0$. [25]

Формула для розрахунку:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (4.1)$$

- C_t — чистий грошовий потік у році t .
- C_0 — початкові капіталовкладення.
- r — ставка дисконту.
- n — тривалість проекту (роки).

Приклад розрахунку NPV для ВЕС

Вихідні дані:

- Потужність ВЕС: 100 МВт.
- Вартість проекту (початкові інвестиції, C_0): \$200 млн.
- Річне виробництво електроенергії: 350 ГВт·год.
- Ціна продажу електроенергії: \$0,08/кВт·год.
- Річний дохід (C_t): \$28 млн.

- Операційні витрати: \$5 млн/рік.
- Чистий грошовий потік: \$23 млн/рік.
- Тривалість проекту: 20 років.
- Ставка дисконту (r): 8%.

Розрахунок:

1. **Чистий грошовий потік:** $C_t=23$ млн щороку протягом 20 років.
2. **Приведена вартість грошових потоків:**

$$PV = \sum_{t=1}^{20} \frac{23}{(1+0.08)^t} \quad (4.2)$$

Використовуючи формулу для геометричної прогресії,

$$PV=23 \times 1 - (1+0,08)^{-20} / 0,08 \approx 245.45 \text{ млн.}$$

NPV:

$$NPV=PV-C_0=245.45-200=45.45 \text{ млн.}$$

Інтерпретація:

NPV = \$45.45 млн означає, що проект економічно вигідний і принесе чистий прибуток у вигляді приведеної вартості на цю суму після врахування початкових витрат і дисконтованих доходів.

Термін окупності = $200/23 \approx 8.7$ років.

Термін окупності становить приблизно 8,7 років. Це означає, що інвестори зможуть повернути вкладені кошти менш ніж за 9 років експлуатації проекту, після чого проект почне приносити чистий прибуток.

Економія на традиційних джерелах енергії завдяки ВЕС

Реалізація вітроелектростанцій (ВЕС) дозволяє значно скоротити споживання традиційних енергоносіїв, таких як вугілля, газ або мазут, які використовуються на теплових електростанціях (ТЕС). Це досягається завдяки заміщенню виробництва електроенергії, що базується на спаленні викопного палива, дешевою та відновлюваною енергією вітру.

Основні чинники економії:

1. Зменшення витрат на паливо:

Традиційні ТЕС потребують постійного постачання палива. ВЕС, натомість, використовують безкоштовний ресурс — вітер.

2. Зниження витрат на транспортування та зберігання палива:

Викопне паливо потрібно доставляти, що додає витрат.

3. Зниження викидів і плати за вуглецеві квоти:

ВЕС дозволяють скоротити викиди CO₂, уникаючи додаткових витрат, пов'язаних із вуглецевими податками.

Приклад розрахунку економії

Вихідні дані:

- Потужність ВЕС: 50 МВт.
- Річне виробництво електроенергії: 175 ГВт·год.
- Еквівалентна економія вугілля: 0,34 тонни вугілля на 1 МВт·год виробленої енергії.
- Вартість вугілля: \$100 за тонну.

Заощаджене вугілля=175 ГВт×0.34 тонн=59,500 тонн.

Розрахунок економії на паливі:

Економія=59,500 тонн×100 \$/тонну=5,950,000 \$.

Інтерпретація:

ВЕС потужністю 50 МВт, працюючи протягом року, дозволяє зекономити майже \$6 мільйонів на витратах на вугілля. Це не враховуючи додаткову вигоду у вигляді зниження викидів CO₂, економії на логістиці та потенційних субсидій за екологічність проекту.

Такий підхід ілюструє, наскільки ВЕС ефективні у зменшенні залежності від викопного палива, сприяючи енергетичній незалежності та сталому розвитку.

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

Висновок:

Під час виконання магістерської роботи, було змодельовано аналітично від обличчя інженера-проектувальника два випадки підбору ВЕУ для користування в повсякденні. Основна увага була приділена аналізу економічних перспектив ВЕС та різних моделей роботи ВЕУ в різних умовах. Також було проаналізовано декілька режимів роботи та надана оцінка їх роботи.

На першому етапі роботи було приведено два приклади встановлення ВЕУ для різних користувачів, а саме для приватного будинку та готелю при дорозі. Було підраховано та підібрані всі необхідні компоненти для використання енергії ВЕУ як одиничного енергонакопичувача.

На другому етапі роботи, було змодельовано аналітично три режими роботи вітряків, в залежності від швидкості вітру. Було побудовано графіки залежності потужності ВЕУ від вітру.

На третьому етапі роботи, був зроблений підрахунок блисквозахисту та системи заземлення, які є обов'язковими для встановлення ВЕУ. Також були надані рекомендації для експлуатації ВЕУ.

На четвертому етапі, вся увага була приділена економічному обґрунтуванню, в якій було надано розрахунки та інформація, чому тема ВЕС зараз дуже актуальна і є економічно вигідною не тільки як великі електростанції, а також і для особистого користування

Загалом, проведена робота є більш глибоким дослідженням теми відновлювальної енергії ніж бакалаврська, дослідження цієї теми показало, наскільки це недооцінена галузь і які великі перспективи у відновлювальної енергії в світі.

Список джерел:

1. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 174 с.
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/366/747/845-1?inline=1>
2. Дослідження роботи вітрової електростанції в системі електропостачання населеного пункту. Котовський С. М. – дипломна робота. – кафедра електротехнічних систем, технологій та автоматизації в АПК. Вінниця. 2018.
<http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/17437.pdf>
3. Z. Fan, G. Kalogridis, C. Efthymiou, M. Sooriyabandara, M. Serizawa, and J. McGeehan, “The New Frontier of Communications Research: Smart Grid and Smart Metering,” in ACM E-Energy Conference, Passau, Germany, Apr. 2010
https://www.researchgate.net/publication/221561413_The_new_frontier_of_communications_research
4. The Modern Grid Initiative Version 2.0, Conducted by the National Energy Technology Reliability, January 2007. [Electronic resource] - Mode of access:
<http://www.netl.doe.gov/moderngrid/resources.html>
5. Л.Е.М.Ліньярола, Д.Рагнія, Ч.Крішнасваміа, К.Ченаб, Сімао Феррейра, Дж.Дж.В.ван Буссель. Експериментальний аналіз сліду моделі вітрової турбіни з горизонтальною віссю. Режим доступу:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114000494>.
6. Крейг Стоута, Бенджамін Бірда. Підвищення ефективності вітрогенераторів з вертикальною віссю з верхнім дефлектором. Режим доступу:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217325584>.
7. Джеральд Мюллер, Мерт Чавушоглу, Марк Керрі. Вітрогенератор з вертикальною віссю опорного типу для інтеграції в будівлю. Режим доступу:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117304020>.
8. Ноель Еклі Селін. Енергія вітру. БРИТАНСЬКА ЕНЦИКЛОПІДІЯ. Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/wind-power>.
9. Держенергоефективності України <http://saee.gov.ua/>
10. Дорожня карта розвитку відновлювальних джерел енергії в Україні 2030 року (REMAP 2030. Renewable Prospects for Ukraine), 2015. <http://www.uwea.com.ua>
11. Запорожець О.І. Розрахунок відстані від вітроенергетичних установок для зменшення ефекту мерехтіння тіней на здоров'я людини / О.І. Запорожець А.В. Литвинюк // Наукоємні технології, 2012, № 4 (16). – С. 121-126
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2a>

[hUKEwjIw67buM3_AhXS-
ioKHcthCcAQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fjrn1.nau.edu.ua%2Findex.
php%2FFSBT%2Farticle%2Fdownload%2F5311%2F5992&usg=AOvVaw0_-
KC4uD7I2D3j3sg1BWN0&opi=89978449](https://www.nau.edu.ua/index.php?FSBT%2Farticle%2Fdownload%2F5311%2F5992&usg=AOvVaw0_KC4uD7I2D3j3sg1BWN0&opi=89978449)

12. Посібник для девелоперів. (2014). Програма фінансування альтернативної енергетики України (USELF) <http://www.uself.com.ua>
13. ENERGY POTENTIAL NONCONVENTIONAL AND RENEWABLE ENERGY SOURCES OF EREAS OF UKRAINE [Nataliya Strelbitska, Ternopil National Economic University,](https://www.researchgate.net/publication/271369998_Energeticnij_potencial_NV_DE_oblastej_Ukraini) 2011
[https://www.researchgate.net/publication/271369998 Energeticnij potencial NV DE oblastej Ukraini ENERGY POTENTIAL NONCONVENTIONAL AND RENEWABLE ENERGY SOURCES OF EREAS OF UKRAINE](https://www.researchgate.net/publication/271369998_Energeticnij_potencial_NV_DE_oblastej_Ukraini)
14. Guidelines on the Environmental Impact Assessment for Wind Farms (2010), Belgrade. https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/eia/documents/EIAGuides/Serbia_EIA_windfarms_Jun10_en.pdf
15. Kornius, S. (2012), Power system of Ukraine. Electricity Stakeholder Event on Transit and Cross-Border Cooperation. Energy Charter Secretariat, 28 March 2012. Brussels
https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Events/20120328-ESM_Power_System_Ukraine.pdf
16. Stevenson R. Environmental Impact Assessment for Wind farms. http://gse.cat.org.uk/downloads/Environmental_Impact_Assessment_Consenting_Process_Windfarms.pdf
17. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.П. Кузнецов, О.А. Мельник – Електронні текстові дані (1 файл: 7,93 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 304 с.
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48635/1/Kompleksne_2022.pdf
18. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/OB-2015-02-11.pdf>
19. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с. <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
20. REmap 2030, Renewable Energy Prospects: Ukraine. https://sae.gov.ua/sites/default/files/ENG%20IRENA_REmap_Ukraine_paper_2015%201304.pdf

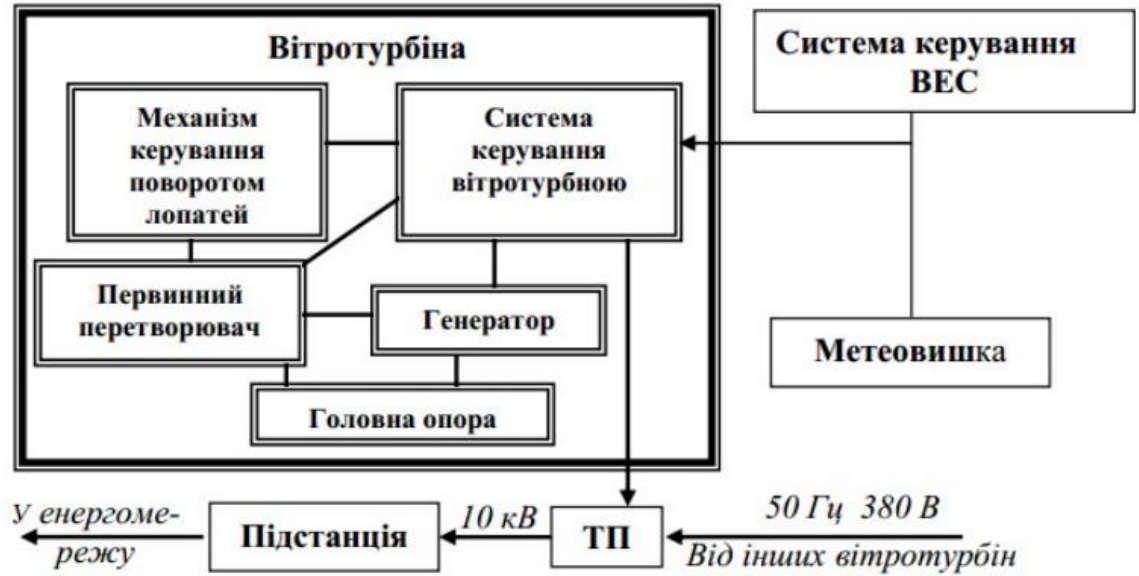
Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

21. Вітроенергетичний сектор України 2016
http://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2016_report_ua_web_open.pdf
22. <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>
23. Обґрунтування економічної ефективності використання вітроенергетики в різних регіонах України, ЧИРИНДА Михайло-Вадим Анатолійович, Магістерська робота, Тернопіль – 2017
<http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/17282/1/Чиринда.pdf>
24. Звіт "Вітроенергетичний сектор України 2021" від Української вітроенергетичної асоціації
https://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf
25. збірник матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, м. Харків, 16 березня 2023 р. / за заг. ред. С. М. Домбровської. – Харків : НУЦЗУ, 2023. 315 с
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22673/1/ZBNMKS2023.pdf>

Зм	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

Додаток 1

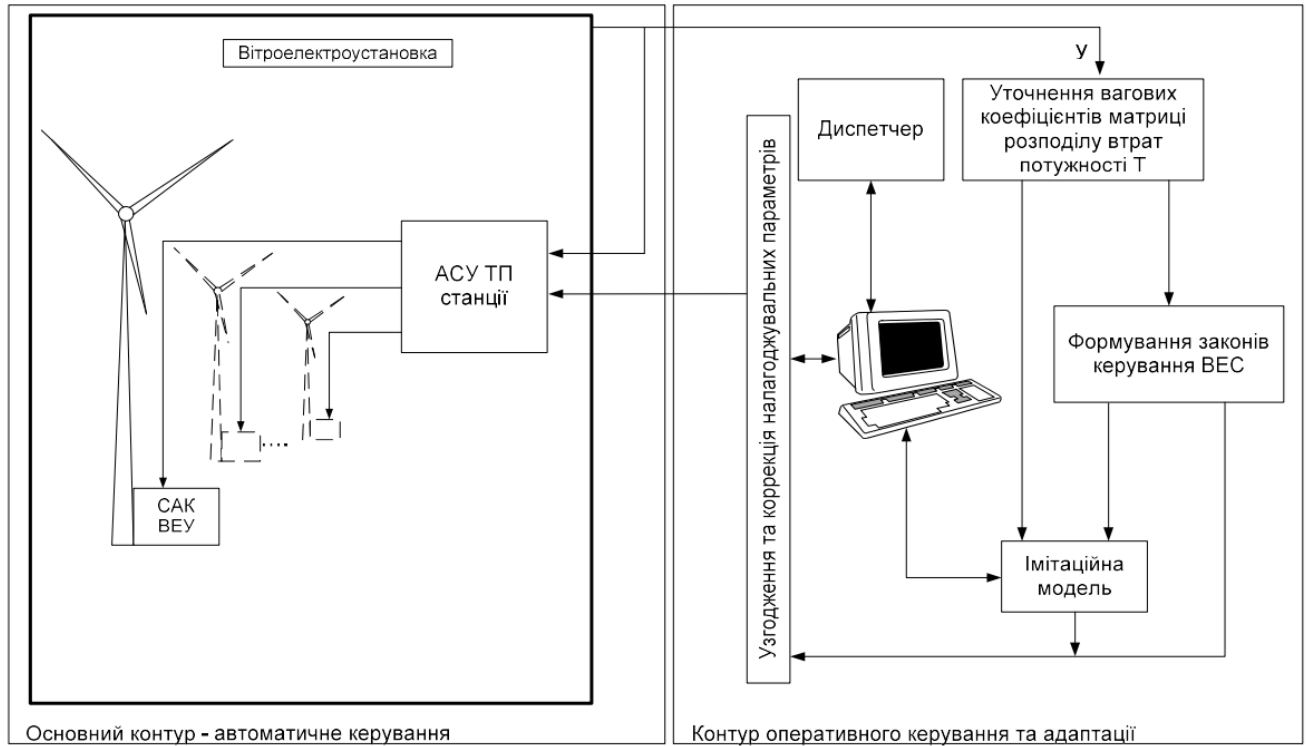
Функціональна схема ВЕУ



					МРЗ.8.141.613 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій					
Розроб.	Михно Я.Р.							Лит.	Арк.	Листів
Перевір.	Василега								70	73
Реценз.								СумДУ, гр. ЕТ.м-31		
Н. Контр.	Василега П.О.									
Затверд.	Лебедка С.М.									

Додаток 2

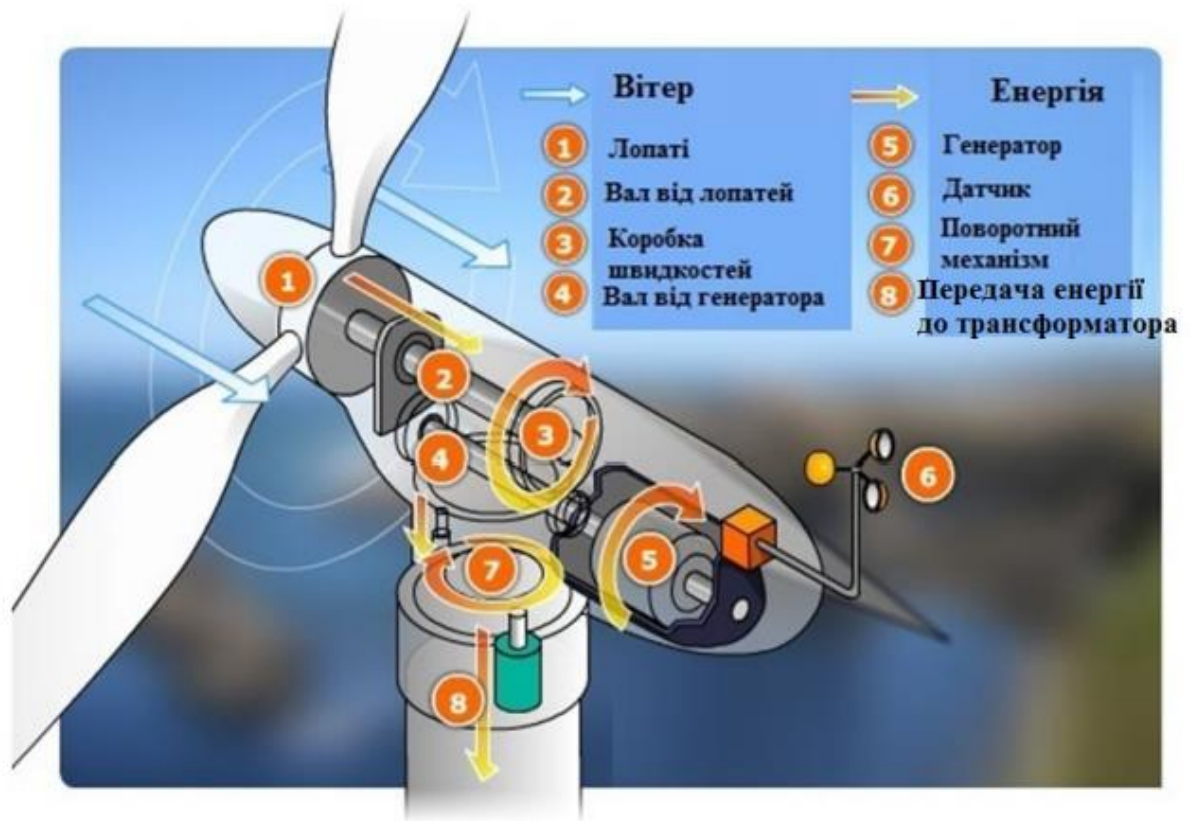
Структурна схема оптимального керування



					MP3.8.141.613 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	Лит.	Арк.	Листів
Розроб.	Михно Я.Р.						71	73
Перевір.	Василега							
Реценз.								
Н. Контр.	Василега П.О.							
Затверд.	Лебедка С.М.				СумДУ, гр. ЕТ.м-31			

Додаток 3

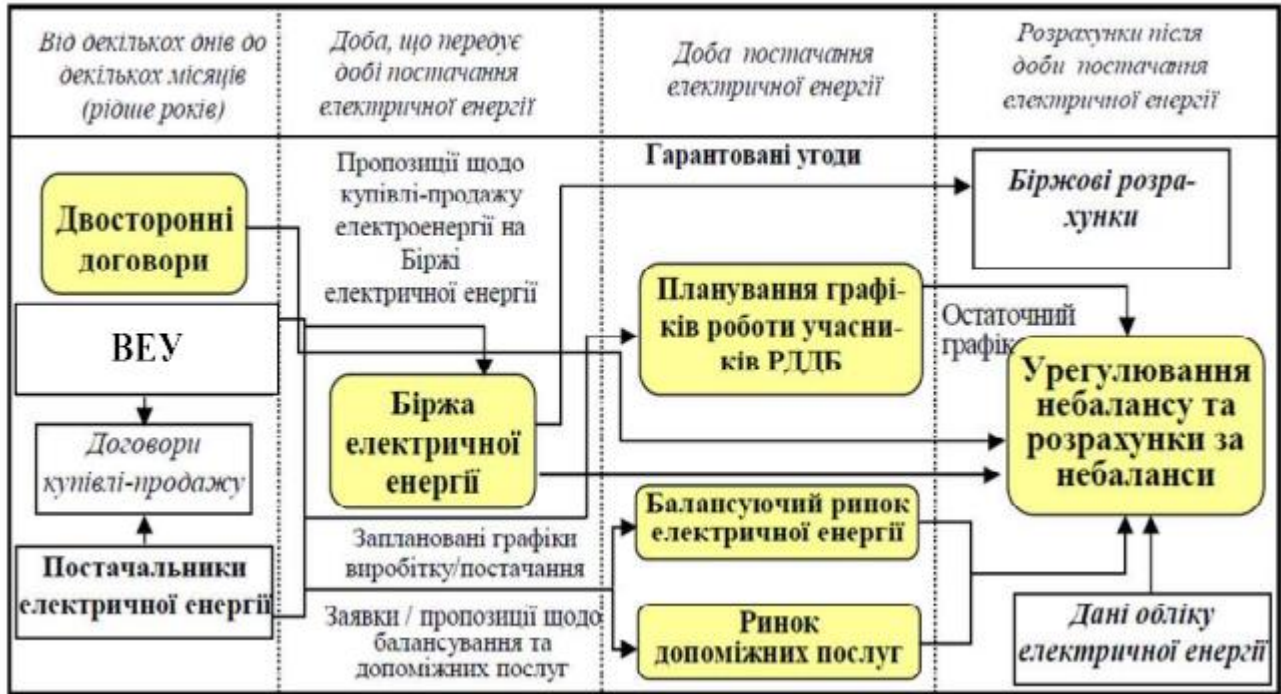
Принципова схема вітроустановки



					MP3.8.141.613 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	Лит.	Арк.	Листів
Розроб.	Михно Я.Р.						72	73
Перевір.	Василега					СумДУ, гр. ЕТ.м-31		
Реценз.								
Н. Контр.	Василега П.О.							
Затверд.	Лебелка С.М.							

Додаток 4

Рольова модель ринку двосторонніх договорів та балансуючого ринку електричної енергії



МРЗ.8.141.613 ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Михно Я.Р.			Аналіз та моделювання режимів роботи вітрових електростанцій	Лит.	Арк.	Листів
Перевір.		Василега					73	73
Реценз.						СумДУ, гр. ЕТ.м-31		
Н. Контр.		Василега П.О.						
Затверд.		Лебелка С.М.						