

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Навчально-науковий інститут інженерії та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та електромеханіки

**ДИПЛОМНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

на тему

**АВТОНОМНА ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ  
ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ**

Виконав: студент групи БЕМ-19  
спеціальності

141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

Новіков Петро

Петрович

Науковий керівник

д.т.н., проф. Шведчикова І.О. \_\_\_\_\_

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та  
ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та  
ініціали)

Київ 2023

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ**Інститут Навчально-науковий інститут інженерії та інформаційних технологійКафедра комп'ютерної інженерії та електромеханікиСпеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханікаОсвітня програма Електромеханіка**ЗАТВЕРДЖУЮ****Завідувач кафедри комп'ютерної  
інженерії та електромеханіки**Борис ЗЛОТЕНКО

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 року

**ЗАВДАННЯ****НА ДИПЛОМНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)  
СТУДЕНТУ**Новікову Петру Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема дипломної бакалаврської роботи (проєкту) Автономна  
вітроелектростанція для електроживлення локального об'єкту

Науковий керівник роботи Шведчикова Ірина Олексіївна, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом КНУТД від «08» листопада 2022 року № 224-уч

2. Строк подання студентом дипломної роботи (проєкту) 05.06.2023 р.
3. Вихідні дані до дипломної бакалаврської роботи (проєкту) навчальна та  
методична література; методики розрахунку.
4. Зміст дипломної бакалаврської роботи (проєкту) (перелік питань, які потрібно розробити) Тенденції розвитку вітроенергетики. Проєктування вітроелектростанції. Розрахунок вітрогенератора.

- Дата видачі завдання 01.03.2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломної бакалаврської роботи(проєкту)  | Терміни виконання етапів | Примітка про виконання  |
|-------|---|--------------------------|---|
| 1     | Вступ   | 10.03.2023               | <i>З підписами наукового керівника і студента</i>   |
| 2     | Розділ 1  | 20.03.2023               | <i>З підписами наукового керівника і студента</i>   |
| 3     | Розділ 2  | 25.04.2023               | <i>З підписами наукового керівника і студента</i>   |
| 4     | Розділ 3  | 03.05.2023               | <i>З підписами наукового керівника і студента</i>   |
| 5     | Висновки  | 16.05.2023               | <i>З підписами наукового керівника і студента</i>   |
| 6     | Оформлення кваліфікаційної роботи (чистовий варіант)  | 19.05.2023               | <i>З підписами керівника і студента</i>   |
| 7     | Здача кваліфікаційної роботи на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)                      | 14.06.2023               | <i>З підписами студента та рецензента</i>   |
| 8     | Перевірка кваліфікаційної роботи на наявність текстових співпадінь та помилок (за 10 днів до захисту) | 04.06.2023               | <i>З підписами наукового керівника, студента та працівника відділу моніторингу якості підготовки фахівців та аналітичної роботи</i> |
| 9     | Подання кваліфікаційної роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)              | 07.06.2023               | <i>З підписами завідувача кафедри, керівника, студента</i>  |

Студент

\_\_\_\_\_ ( підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали та прізвище)

Науковий керівник  
роботи

\_\_\_\_\_ ( підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали та прізвище)

Рецензент

\_\_\_\_\_ ( підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Дипломна бакалаврська робота за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньою програмою «Електромеханіка». – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2023 рік.

Бакалаврська робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел (58 найменувань). Робота виконана в обсязі 59 сторінок друкованого тексту, містить 6 рисунків та додатки.

Мета роботи – аналіз принципів побудови автономної вітроелектростанції та здійснення розрахунку параметрів вітрогенератора. Об'єкт дослідження: Процеси функціонування автономної вітроенергетичної системи, інтегрованої у систему електроживлення локального об'єкту. Предмет дослідження: процеси вироблення енергії вітрогенератором та розрахунок його параметрів.

В першому розділі проведений аналіз інформаційних джерел, розглянуто тенденції розвитку вітроенергетики, проаналізовано основні типи вітрогенераторів. В другому розділі розглянуто питання проектування вітрових електростанцій. У третьому розділі наведені результати розрахунків електроспоживання локального об'єкта та обраний вітрогенератор для автономної системи електроживлення.

**Ключові слова:** швидкість вітру, вітрогенератор, потужність, стартова швидкість вітру, ефективність роботи вітрогенератора.

## ANNOTATION

Bachelor thesis in speciality 141 Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, educational program “Electromechanics”. – Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2023.

The bachelor thesis consists of an introduction, 3 chapters, conclusions, list of sources used (58 titles). The work is performed in the amount of 59 pages of printed text, containing 6 figures and applications.

The work aims to analyze the principles of building an autonomous wind power plant and calculate the parameters of the wind generator. Research object: processes of functioning of an autonomous wind energy system integrated into the power supply system of a local facility. The subject of research: processes of energy production by a wind generator and calculation of its parameters.

In the first section, an analysis of information sources was carried out, trends in wind energy development were considered, and the main types of wind generators were analysed. The second chapter deals with the design of wind power plants. The third section gives the results of the calculations of the electricity consumption of the local object and the selected wind generator for the autonomous power supply system.

Keywords: wind speed, wind generator, power, starting wind speed, the efficiency of the wind generator.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 7  |
| РОЗДІЛ 1 ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ.....                    | 9  |
| 1.1 Вітрова енергетика в Україні та світі.....                      | 9  |
| 1.2 Принцип роботи вітрогенератора.....                             | 19 |
| 1.3 Вітрогенератори: типи, застосування, ефективність роботи.....   |    |
| РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....                      | 27 |
| 2.1 Аналіз та перспективи впровадження вітрових електростанцій..... | 27 |
| 2.2 Особливості вертикальних вітрогенераторів.....                  | 40 |
| РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВІТРОГЕНЕРАТОРА..                    |    |
| ВИСНОВКИ.....   | 51 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                     | 52 |
| ДОДАТКИ.....  | 58 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Пошук альтернативних способів виробництва енергії триває вже багато років. Одним з них є вітрогенератор, який використовує вітер для виробництва електроенергії. Принцип роботи вітрогенераторів заснований на їх здатності перетворювати енергію з однієї форми в іншу. Принцип роботи цього пристрою полягає в тому, що вітер має кінетичну енергію, яка може бути перетворена на механічну за допомогою ротора. Потім пристрій перетворює цю механічну енергію в електричну. Таким чином можна виробляти безкоштовну електроенергію. Потужність вітрових електростанцій варіюється від 5 до 4 500 кВт. Сьогодні розроблені пристрої, які можуть виробляти електроенергію навіть при дуже низьких швидкостях вітру, наприклад, 4 м/с. Оскільки принцип роботи вітрогенераторів дуже простий, такі пристрої можна виготовляти самостійно. Цей пристрій не тільки дозволяє економити на рахунках за електроенергію, але й може бути проданий державі за "зеленими" цінами. Такий спосіб виробництва енергії підходить для всіх об'єктів, розташованих в районах без централізованого електропостачання, а також може використовуватися як додаткове джерело живлення. Це найкращий варіант, і кожен об'єкт може бути електрифікований незалежно.

В даний час для вітрогенераторних автономних об'єктів в якості джерел електроенергії застосовують вітроелектростанції. Тому актуальним завданням є обґрунтований вибір та визначення параметрів вітрогенератора для автономної системи електроживлення локального об'єкта.

**Метою роботи** є аналіз принципів побудови автономної вітроелектростанції та здійснення розрахунку параметрів вітрогенератора.

Для досягнення зазначеної мети дослідження були вирішені такі завдання:

- здійснити аналіз тенденцій розвитку вітроенергетики в Україні та світі:

-провести аналіз існуючих типів вітрогенераторів для використання в системах електроживлення локальних об'єктів;

- зробити аналіз існуючих варіантів побудови автономних систем вітроелектростанцій;

- розрахувати параметри вітрогенератора для автономної системи електроживлення локального об'єкта.

**Об'єкт дослідження.** Процеси функціонування автономної вітроенергетичної системи, інтегрованої у систему електроживлення локального об'єкту.

**Предмет дослідження.** Процеси вироблення енергії вітрогенератором та розрахунок його параметрів.

**Методи дослідження.** Дескриптивний метод (для опису принципів функціонування вітроелектростанції), методи обчислювальної математики (для розрахунку параметрів вітрогенератора).



## РОЗДІЛ 1 ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

### 1.1 Вітрова енергетика в Україні та світі

Декарбонізація енергетичного сектору та скорочення викидів вуглецю для стримування зміни клімату є спільною темою у виступах майже всіх світових лідерів [16]. На кліматичному саміті COP26 у Глазго понад 40 країн домовилися про поступову відмову від вугільної енергетики протягом наступних 20 років. Серед них і Україна. Декарбонізація енергетичного сектору та скорочення викидів вуглецю для стримування зміни клімату є червоними лініями у виступах майже всіх світових лідерів і є важливою віхою в міжнародній дорожній карті енергетичного переходу. План полягає в тому, щоб замінити найбруднішу генерацію екологічно чистими відновлюваними видами палива [17].

Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA) вважає, що трансформація світової енергетичної системи спрямована на підвищення енергетичної безпеки та доступності енергії. Для країн, які значною мірою залежать від імпорту викопного палива, енергетична безпека є ключовим елементом національної безпеки, а відновлювані джерела енергії можуть стати альтернативою збільшенню диверсифікації джерел енергії через розвиток місцевого виробництва енергії, сприяючи таким чином стійкості системи та протистоянню загрозам ("Захист критичної інфраструктури"). Регіональні громади, особливо ті, що зосереджені в сільській місцевості, мають великі перспективи для поширення технологій відновлюваної енергетики. Це пов'язано з тим, що розвиток відновлюваної енергетики може призвести до створення робочих місць на місцевому рівні та участі жінок і чоловіків у різних професіях. Міжнародні експерти вважають, що

трансформація глобальної енергетичної системи принесе значні соціально-економічні вигоди, що є ключовим фактором впливу на всі політичні рішення. Таким чином, нагальні суспільні потреби, соціальні та екологічні вигоди і привабливі економічні можливості є рушійною силою трансформації глобальної енергетичної системи [18].

Вітрова та сонячна енергетика відіграватимуть провідну роль у трансформації глобального енергетичного сектору У своєму Звіті про глобальний енергетичний перехід за 2019 рік IRENA представляє можливі сценарії розвитку глобального енергетичного сектору до 2050 року. Аналіз енергетичних сценаріїв показує, що існує консенсус щодо того, що вітроенергетика буде зростати в енергетичному балансі протягом наступних десятиліть: За оцінками експертів IRENA, до 2050 року наземна та офшорна вітроенергетика може задовольнити понад третину (35%) загального попиту на електроенергію, що наочно демонструє важливість збільшення частки вітроенергетики для декарбонізації енергетичної системи. Але чи зможе Україна, яка задекларувала "зелений шлях", приєднатися до лав розвинених країн у розвитку відновлюваної енергетики [19].

За даними Міністерства енергетики України, частка теплової генерації в загальному виробництві електроенергії зменшилася на 5% з 2016 року. Так, у 2016 році частка генерації ТЕС у загальному виробництві електроенергії становила 32,2%, тоді як у 2020 році теплові електростанції вироблятимуть лише 27,2% від загального виробництва електроенергії. У 2020 році частка кліматично нейтральної генерації атомних електростанцій, великих ГЕС та відновлюваних джерел енергії покриватиме близько 2/3 загального споживання. Міністерство енергетики очікує, що ця тенденція збережеться. Згідно з розрахунковим платіжним балансом, затвердженим Міністерством енергетики, очікується подальше зниження частки вугільної генерації на ТЕС

до 25,6% до кінця цього року. Перехід на виробництво електроенергії з відновлюваних джерел є не "довгостроковою перспективою", а "нагальною потребою" [20].

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), за 20 років світова вітроенергетична потужність зросла у 75 разів - з 7,5 гігават (ГВт) у 1997 році до приблизно 564 ГВт у 2018 році (рис. 1.1). Наразі потужність вітрових електростанцій досягла 730 ГВт, що свідчить про оптимістичну тенденцію на майбутнє. Вітроенергетика швидко розвивається в Азії та Північній Америці, тоді як країни ЄС, такі як Данія, Іспанія, Ірландія та Німеччина, продовжують розвивати свій потенціал [21].



Рис. 1.1. Зростання вітрової генерації у світі

За даними Національного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, у першому півріччі 2021 року загальна потужність установок відновлюваної енергетики зросла на 278,4 МВт. Однак настрої інвесторів не надто оптимістичні. Експерти енергетичного сектору зазначають, що умови для залучення інвестицій у відновлювану енергетику

погіршилися. Серед них - прийняття закону, що дозволяє ретроактивне зниження "зелених" тарифів, закінчення терміну дії пільгових податкових ставок для діючих електростанцій з 1 січня 2030 року, а також недотримання умов Меморандуму про взаєморозуміння щодо погашення заборгованості, що унеможлиблює накопичення нових боргів для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Втім, сектор відновлюваної енергетики має продовжувати розвиватися [22].

Вітроенергетика почала розвиватися у 19 столітті з появою генераторів. Британські та американські вчені працювали над вітроенергетикою, а перша сучасна вітроелектростанція з'явилася в Данії в 1891 році [23].

Перша вітроелектростанція в Україні була розроблена в 1930-х роках Юрієм Кондратиком, одним із засновників науки про космічні польоти. Кондратик працював над проектом Кримської вітроелектростанції потужністю 12 МВт з вежею висотою 160 м і трилопатеvim пропелером діаметром 80 м. У 1937 році на горі Айпетрі в Криму розпочалися фундаментні роботи на об'єкті. Однак у 1938 році будівництво було зупинено, і проект більше не відроджувався [24].

Другий етап розвитку вітроенергетики в Україні розпочався у 1996 році. У цьому році була спроектована Новоазовська вітроелектростанція потужністю 50 МВт у селі Безіменне Донецької області. Станція стала до ладу через 15 років, у 2011 році.

Більшість вітрових електростанцій в Україні розташовані вздовж узбережжя Чорного та Азовського морів, у Криму та Карпатах, а також в Одеській, Херсонській та Миколаївській областях. За даними Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук України, ці регіони є найбільш сприятливими для використання енергії вітру [25].

Новий етап у розвитку вітрових електростанцій розпочався у 2009 році, коли Уряд України запровадив "зелений тариф" (економічний механізм отримання виплат за виробництво електроенергії з відновлюваних джерел).

Наприкінці 2012 року потужність вітрових електростанцій в Україні становила близько 263 МВт, а через сім років Україна приєдналася до Гігаватного клубу. Цей клуб об'єднує країни зі встановленою вітроенергетичною потужністю понад 1 000 МВт.

За даними державної енергетичної компанії "Укренерго", загальна встановлена потужність вітроенергетичного сектору України становить 1 529 МВт; УВЕА (Українська вітроенергетична асоціація) очікує, що до кінця року вона зросте до 1 750 МВт [26].

В Україні "зелену" електроенергію виробляють 34 вітроелектростанції. Найбільші з них - Ботієвська, Приморська, Мильненська, Орлівська, Овер'янівська та Новоазовська вітроелектростанції. За винятком Ботієвської та Приазовської, всі перші сім вітроелектростанцій були введені в експлуатацію у 2019 році (рис.1.2) [27].



Рис. 1.2. Найбільші вітрові електростанції в Україні

*Ботієвська ВЕС* розташована поблизу села Приморський Посад Мелітопольського району Запорізької області. Об'єкт був побудований у 2012 році енергетичним холдингом ДТЕК і є найбільшою вітроелектростанцією в Україні загальною потужністю 200 МВт, що складається з 64 турбін Vestas V-112 потужністю 3 МВт кожна [28].

Вітропарк скорочує шкідливі викиди вуглекислого газу на 730 000 тонн. Це еквівалентно викидам 365 000 автомобілів.

*Приморська* вітроелектростанція розташована в селі Болісівка Запорізької області. Електростанція запрацювала в листопаді 2019 року. Її побудувала компанія "Вінд Пауер", дочірня компанія ДТЕК ВДЕ. Вітропарк має 52 віротурбіни, кожна потужністю 3,8 МВт. Висота веж становить 110 м, а діаметр ротора - 137 м. Потужність електростанції становить 200 МВт [29].

*Мирненська ВЕС* розташована на території Мирненського об'єднаного територіального ансамблю в Херсонській області; на площі 55 га встановлено 35 турбін загальною потужністю 163 МВт. Вона виробляє близько 574 млн кВт-год енергії на рік і скорочує викиди CO<sub>2</sub> на 455 000 тонн на рік [30].

*Орлівська* вітроелектростанція Орлівська ВЕС у Приморському районі Запорізької області має 26 віротурбін Vestas V126 загальною генеруючою потужністю 3,8 МВт. Висота вежі становить 112 м, а діаметр ротора - 126 м [31].

*Новотроїцька ВЕС* розташована в Новотроїцькому районі Херсонської області. Вітропарк складається з 12 віротурбін Vestas V126 (3,65 МВт кожна) і восьми віротурбін V136 (3,6 МВт кожна). Висота кожної вежі становить 117 м, а прольоти лопатей - 126 м і 136 м [32].

*Овер'янівська ВЕС* розташована в Генічеському районі Херсонської області. Електростанція була введена в експлуатацію у 2019 році. Потужність

ВЕС становить 68,4 МВт. Вона здатна скоротити викиди CO<sub>2</sub> на 210 000 тонн на рік.

*Новоазовська* вітроелектростанція була спроектована в 1996 році і введена в експлуатацію через 15 років. Вітропарк складається з 23 вітротурбін потужністю 2,5 МВт кожна виробництва німецької компанії Fuhrlaender AG. При проектуванні та будівництві ВЕС були враховані всі вимоги ботаніків, орнітологів та зоологів з метою мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище [33].

За даними УВЕА, цей список найбільших вітропарків може змінитися вже наступного року. Зокрема, компанія ДТЕК ВДЕ розпочала будівництво Тиригульської вітроелектростанції в Миколаївській області загальною потужністю 500 МВт, яку планують ввести в експлуатацію до кінця 2022 року. Найближчим часом буде введено в експлуатацію вітропарк потужністю 241,8 МВт у Чаплинському районі Херсонської області [34].

Більшість вітроелектростанцій, що будуються в Україні, є великими і забезпечують електроенергією всі регіони; потужності Овер'янівської ВЕС достатньо для забезпечення електроенергією 44 000 домогосподарств, а нові вітротурбіни, введені в експлуатацію в першому півріччі 2021 року, мають середню потужність 3,8 МВт [35]. Вони використовуються для забезпечення електроенергією невеликих домогосподарств.

Ця вітротурбіна Flamingo потужністю 1,6 кВт розташована в селі Бірмак на Запоріжжі. Її встановив місцевий житель Сергій Горпинич. Вітрогенератор забезпечує 30% енергії для міні-ринку, яким керує пан Горпинич. Решта електроенергії генерується сонячними панелями і використовується магазином та окремими домогосподарствами [36]. Однак встановлення таких міні-вітрогенераторів є рідкісним явищем і не набуло широкого розповсюдження. На це є кілька причин.

По-перше, термін окупності таких електростанцій становить близько 10 років. Це вдвічі більше, ніж у домашньої сонячної електростанції. Таку різницю можна пояснити тим, що вітрові турбіни вимагають більш складного інжинірингу, ніж сонячні електростанції, що робить обладнання більш дорогим [37].

Другий - доцільність встановлення вітрогенераторів. Олег Савицький, експерт з питань кліматичної та енергетичної політики Центру екологічних ініціатив "Екодія", зазначає, що міні-вітроелектростанції варто будувати у віддалених районах, де немає ліній електропередач. Наприклад, у віддалених населених пунктах в Карпатах.

У звіті Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) підкреслюється важливість скорочення викидів вуглецю та переходу до кліматично нейтрального світу до 2050 року. Як і IRENA, розвиток відновлюваної енергетики розглядається як одне з рішень, що може сприяти скороченню викидів [38].

Для досягнення цілей декарбонізації МЕА рекомендує подвоїти темпи будівництва та введення в експлуатацію сонячних та вітрових електростанцій. Очікується, що це дозволить скоротити викиди вуглецю більш ніж наполовину. Для цього необхідно інвестувати 4 трильйони доларів США у розвиток відновлюваних джерел енергії та енергоефективності до 2030 року [39].

"Сонячні та вітрові електростанції є найдешевшим джерелом нової електроенергії на сьогоднішній день. Технології чистої енергії стають новою і важливою сферою інвестицій та зайнятості, а також динамічною ареною для міжнародного співробітництва та конкуренції".

Енергетична стратегія України до 2035 року, прийнята в серпні 2017 року, передбачає підвищення енергоефективності та використання енергії з



відновлюваних та альтернативних джерел. Впровадження заходів із запобігання та адаптації до зміни клімату визначено одним із пріоритетів розвитку енергетики. Згідно з цим документом, частка відновлюваних джерел енергії в енергосистемі України має досягти 12% до 2025 року і щонайменше 25% до 2035 року.

Водночас, у цьому процесі важливо враховувати спроможність економіки стимулювати розвиток відновлюваної енергетики та спроможність енергосистеми прийняти такі об'єкти. При цьому українським споживачам має бути гарантовано якісне, надійне та безперебійне електропостачання незалежно від погодних умов [40].

Звіт НЕК "Укренерго" про оцінку достатності генеруючих потужностей у 2020 році передбачає, що з урахуванням сучасних тенденцій енергозбереження частка всіх видів ВДЕ в структурі виробництва електроенергії в найближчі 10-11 років буде і надалі збільшуватися. Так, до 2020 року щорічна частка подвоюється (з 3,5% у 2019 році до 7,39% у 2020 році). Протягом наступних трьох років (2021-2023) очікується продовження висхідної тенденції, але зі значно меншими темпами зростання (з 16% у 2022 році до 2,4% у 2031 році) [41].

У довгостроковій перспективі ВДЕ мають частково замінити електроенергію вугільних ТЕС, які, за прогнозами, скоротять своє виробництво приблизно на 12% до 2031 року. Для реалізації такого сценарію розвитку ВДЕ в Україні необхідно підвищити гнучкість електроенергетичної системи. Для цього їй потрібно розбудовувати вже найближчим часом:

Встановити щонайменше 1 ГВт високоманеврених швидкопускових потужностей (повний запуск з місця протягом 15 хвилин, запуск і зупинка не менше чотирьох разів на добу, діапазон регулювання не менше 80% від встановленої потужності). Водночас, має бути побудовано щонайменше 2 ГВт

диспетчерських потужностей для того, щоб максимізувати виробництво електроенергії з ВДЕ і, відповідно, максимально зменшити їхні обмеження [42].

Там, де ВДЕ задіяні в балансуванні енергосистеми та резервному постачанні, необхідно побудувати 0,5 ГВт систем накопичення енергії. Якщо ВДЕ не задіяні в балансуванні або потужність атомних електростанцій вимушено обмежена, потреба в накопичувачах енергії може зрости до 2 ГВт.

Крім того, для реалізації цільового сценарію розвитку генеруючих потужностей до 2031 року має бути доступно щонайменше 12 ГВт робочої потужності СЕС, основного типу генерації, який наразі використовується для балансування енергосистеми. Цього можна досягти за рахунок реконструкції вугільних ТЕС та впровадження заходів зі скорочення викидів. Одним з можливих шляхів вирішення цієї проблеми є термінова реконструкція блоків ТЕС та будівництво 1,2-1,5 ГВт нових напівпікових потужностей [43].

Також пропонується, щоб державна підтримка ВДЕ надавалася через тендери на розподіл квот підтримки лише після вирішення питання лібералізації ВДЕ з метою забезпечення операційної стабільності електроенергетичної системи. Крім того, при встановленні квот підтримки нові інвестори у ВДЕ повинні бути зобов'язані встановити накопичувачі енергії або інші види балансуєчих потужностей у розмірі до 20% від встановленої потужності ВДЕ [44].

Згідно з базовою оцінкою, якщо ці заходи не будуть впроваджені без зволікань, поточна проблема невідповідності генеруючих потужностей перетвориться на проблему недостатніх генеруючих потужностей вже у 2025 році. Реалізація рекомендацій звіту залежатиме від спільних зусиль.

УВЕА прогнозує, що ринок офшорної вітроенергетики (офшорні вітроелектростанції) може з'явитися в Україні протягом семи років. Морська

вітроенергетика є не лише ефективним інструментом декарбонізації та енергонезалежності, а й джерелом сировини для виробництва зеленого водню та посилення міжнародного співробітництва УВЕА вважає, що перший проект морської вітроелектростанції потужністю 100 МВт в Україні можна очікувати вже у 2028 році Перший проект морської вітроелектростанції потужністю 100 МВт в Україні можна очікувати вже у 2028 році [45].

Ефективність виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії залежить від погоди, а динамічний розвиток вітроенергетики не може відбуватися без стабільності енергосистеми. Тому подальший розвиток має бути тісно пов'язаний з будівництвом систем зберігання енергії, маневрових станцій та гібридних електростанцій на ВДЕ [46].

## 1.2 Принцип роботи вітрогенератора

Вітрогенератор – це пристрій, який має лопаті, які обертаються під дією вітру. Це обертання активує турбіну, і вона починає обертатися. Турбіна починає виробляти енергію, потужність якої залежить від сили вітру. Зі збільшенням енергії вітру збільшується і механічна енергія, що виробляється турбіною.

Вітрові турбіни можуть мати або не мати мультиплікатор на роторі. Якщо він є, енергія турбіни передається на нього. Мета мультиплікатора - прискорити обертання валу. Обладнання без цього пристрою не виробляє додаткової енергії (для прискорення обертання валу) і тому є більш ефективним, оскільки не споживає енергії. Для нормальної роботи таких установок достатньо енергії вітру [1].

Принцип роботи вітроелектростанцій дозволяє їм генерувати енергію альтернативним способом і забезпечувати автономність кожного окремого

об'єкта. Потужність цього обладнання повністю визначається розміром його лопатей. Чим більша його площа, тим більшу потужність він може генерувати, використовуючи принцип роботи вітроенергетики.

Для розрахунку потужності вітрогенераторів використовується залежність третього порядку від швидкості вітру, тобто якщо потік вітру 6 м/с виробляє 100 Вт, то при збільшенні швидкості потоку до 12 м/с він виробляє у вісім разів більше - до 800 Вт. Якщо турбіна невелика, для досягнення великої потужності потрібен дуже сильний вітер [2].

Якщо вітрогенератор великий, він може генерувати необхідну потужність навіть при низькій швидкості вітру.

Конструкція вітрової турбіни повністю визначає її здатність генерувати певну кількість енергії за одиницю часу залежно від швидкості вітру [3]. Багатьох цікавить, як влаштовані вітрогенератори, тому цьому розділу приділено особливу увагу. До складу таких установок входять такі функціональні блоки:

- Машини, які перетворюють силу вітру в енергію.
- Акумуляторні батареї.
- Інвертори.
- Контролери заряду.

До обладнання, яке перетворює енергію вітру в електрику, відносяться:

- Турбіни (ротори), що перетворюють енергію прямого вітру.
- Генератори, які перетворюють механічну енергію в електричну.
- Щогли (цей конструктивний елемент може бути гратчастим або трубчастим).
- Система управління турбіною.
- Мультиплікатор (в залежності від моделі).
- Хвостовий або азимутальний привід.

- Випрямлячі: якщо використовуються генератори змінного струму, вони необхідні для забезпечення належної зарядки акумуляторів.

За потужністю всі вітрогенератори поділяються на дві категорії: побутові, що характеризуються потужністю 1-10 кВт, та промислові, починаючи від 500 кВт. Пристрої від 10 кВт до 500 кВт використовуються рідко.

Принцип роботи вітрогенераторів дозволив створити побутові пристрої з різним розташуванням валу турбіни. Горизонтальні типи відрізняються системою, яка керує ротором. В азимутальних приводах напрямок вітру визначається електронним способом. Залежно від отриманих даних, якщо швидкість обертання ротора перевищує номінальне значення, ротор розвертається від вітру [4].

Якщо система управління аеродинамічна, лопаті генератора оснащені спеціальними рухомими елементами. Завдяки такому конструктивному рішенню положення поверхонь лопатей можна змінювати в залежності від напрямку вітру. Це забезпечує максимально ефективну роботу обладнання [5].

Вітрогенератори з вертикальною віссю є неефективними установками і тому не рекомендуються до використання. До такого неефективного обладнання відносяться:

- "Darrieus" - ротор, придатний лише для використання в якості анемоскопа.

- "Savonius" - ротор з недоліком щодо наявного коефіцієнта подачі. Цей пристрій не є самохідним і повинен обертатися. Таким чином, він може виробляти електроенергію лише тоді, коли швидкість вітру досягає 10 м/с.

Останнім часом вітрогенератори з горизонтальною віссю обертання стали нормою. Це пов'язано з тим, що коефіцієнт використання енергії вітру,

як правило, становить близько 30%. За певних умов цей показник може бути набагато вищим. Якщо вісь обертання вертикальна, цей коефіцієнт в кращому випадку становить лише близько 20%. Як наслідок, енергія вітру використовується неефективно. Якщо порівнювати вітрове і сонячне енергопостачання, то схема підключення в конкретному будівельному проєкті ідентична. Тому така система електропостачання може включати обидва генератори. Таким чином можна отримати максимальну потужність від альтернативних джерел [6].

Слід зазначити, що швидкість вітру збільшується на 1 м/с на кожні 10 м висоти. Отже, висота щогли має прямий вплив на ефективність виробничої установки. Діаметр ротора також впливає на ефективність, чим він більший, тим краще.

Швидкість вітру важлива для роботи обладнання. Лопаті починають обертатися при швидкості вітру 1,5 м/с. Коли швидкість вітру досягає 3 м/с, починається виробництво енергії. Номінальна швидкість вітру для українських вітрогенераторів - 7-9 м/с. Таке обладнання може працювати при швидкості вітру до 52 м/с (близько 200 км/год) [7].

Вітрогенератори можуть бути використані для широкого спектру застосувань. Їх встановлюють у будинках, на підприємствах, приватних будинках та інших об'єктах, де потрібне автономне електропостачання. Рекомендується вибрати відкриту ділянку для установки. Пагорби, схили і мілководдя також прийнятні [8].

Вітрогенератори можна використовувати окремо або в групах. У великих установках такі пристрої можна об'єднати в парк. Їх можна використовувати як основне або додаткове джерело енергії.

### 1.3 Вітрогенератори: типи, застосування, ефективність роботи

Потік вітру обертає лопаті вітрової турбіни: вітрова турбіна приводиться в рух вітром і починає обертатися. Вал турбіни виробляє енергію пропорційно до сили вітру. Чим сильніший вітер, тим більша кількість енергії виробляється. Потім енергія передається через вал ротора на мультиплікатор (якщо він є), а мультиплікатор генерує енергію. Зауважте, що обладнання без мультиплікаторів, які прискорюють обертання валу, є більш ефективним, не виробляється і, відповідно, не витрачається зайва енергія, а швидкість вітру є цілком достатньою для оптимальної роботи вітрогенератора. Генератор перетворює механічну енергію в електричну [9].

Потужність вітрової турбіни вимірюється площею, яку вона охоплює. Чим більший розмір лопатей, тим більше енергії може бути вироблено. Потужність вітрової турбіни розраховується відповідно до кубічної залежності від швидкості вітру.

Приклад. Якщо потік вітру зі швидкістю  $n$  генерує 100 Вт, то потік зі значенням  $n+1$  генерує 300 Вт, а зі значенням  $n+2$  - 900 Вт.

Тому, якщо розмір вітрогенератора невеликий, для виробництва великої кількості енергії потрібен дуже сильний потік вітру, в той час як великий вітрогенератор може виробляти таку ж кількість енергії і при слабкому вітрі [10].

Однак для того, щоб вітрогенератор працював збалансовано і виробляв потрібну кількість енергії, всі необхідні параметри вітроелектростанції повинні бути правильно розраховані на етапі проектування.

За конструкцією побутові типи вітряків відрізняються будовою ротора (турбіни).

Горизонтальний вал. Існують відмінності в системах управління турбіною (ротором), це:

- Аеродинаміка (лопаті оснащені спеціальними "лопатями", які змінюють кут атаки відповідно до напрямку вітру; вища швидкість вітру збільшує кут атаки лопатей і навпаки). Змінюючи кут атаки, турбіною можна керувати як на низьких, так і на високих швидкостях, забезпечуючи ефективну і точну роботу обладнання.

- Азимутальний привід (коли електроніка визначає швидкість і напрямок вітру і повертає турбіну за вітром або проти вітру, коли швидкість вітру перевищує номінальну).

Турбіни з вертикальним валом є неефективними пристроями і не рекомендуються для використання через низку недоліків. Вони залежать від типу турбіни:

Ротор типу Савоніуса. Їх недоліком є коефіцієнт подачі. Якщо швидкість вітру становить 10 м/с, наконечник турбіни обертається зі швидкістю 100 м/с, а час подачі дорівнює 10. Насправді, вітрогенератор не може почати рухатися сам по собі, його потрібно обертати, і тільки тоді він почне рухатися. Таким чином, вона почне виробляти енергію лише тоді, коли швидкість вітру перевищить 10 м/с [11].

Ротор Дар'є. Через низький коефіцієнт корисної дії використовуються лише як анемоскопи.

В даний час вітрогенератори з горизонтальною віссю обертання (лопаті) широко використовуються, оскільки їх коефіцієнт використання енергії вітру (WFEF), як правило, перевищує 30%, в той час як вітрогенератори з вертикальною віссю обертання мають WFEF близько 20% [12].



Домашні системи енергопостачання з використанням вітрових турбін подібні до систем з використанням сонячних модулів, де одна система може використовувати як вітрові турбіни, так і сонячні модулі.

Кількість виробленої електроенергії залежить від висоти щогли та діаметру ротора, а також від швидкості вітру, яка збільшується на 1 м/с на кожні 10 м висоти вітрогенератора. Чим вища щогла, тим вища ймовірність працювати максимально ефективно. Те ж саме стосується і ротора: чим більший діаметр, тим більший вихід енергії [13].

- Швидкість вітру, при якій лопаті починають обертатися, становить 1,5 м/с, і за такої швидкості вітру вони не виробляють жодної енергії.
- Мінімальна швидкість вітру, при якій починається вироблення електроенергії - 3 м/с.
- Номінальна швидкість вітру (вітрогенератори українського виробництва) - 7-9 м/с.
- Максимальна швидкість вітру, при якій вітрогенератори українського виробництва продовжують працювати, становить 52 м/с (200 км/год), що свідчить про якість місця встановлення та довговічність використаних матеріалів.

Вітрогенератори широко використовуються на об'єктах різного призначення, включаючи приватні будинки, домогосподарства, підприємства та спеціалізовані будівлі, які потребують незалежного енергопостачання. Місця встановлення повинні бути на відкритих ділянках з вітровими траєкторіями, таких як поля, гори (пагорби), острови та мілководдя, бажано на височині. Вітрові турбіни можна встановлювати поодиночі або групами, утворюючи вітроелектростанції для забезпечення електроенергією великих підприємств. Вітрові турбіни здебільшого використовуються для

забезпечення електроенергією приватних будинків, які не підключені до міської електромережі. Вітрогенератори малої потужності використовуються для мисливських і рибальських угідь, літніх дач бджолярів і автономних ліхтарів для освітлення доріг [14].

Наразі використання енергії вітру як альтернативи централізованому енергопостачанню не є рентабельним через високу вартість обладнання, але в той же час енергію вітру можна використовувати там, де немає централізованого енергопостачання або де воно часто переривається. Період окупності становить 25 років [15].

Також технічно можливо побудувати генератори змінного струму, які можна використовувати для безпосереднього живлення споживачів, що не потребують безперебійного електропостачання, наприклад, насосів для осушення ґрунту.

Вітрові турбіни доступні по всій території України, і їхня ефективність варіюється. З точки зору вітроенергетичного потенціалу, найбільш сприятливими місцями для вітрогенерації є Крим та Закарпаття.

## РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

### 2.1 Аналіз та перспективи впровадження вітрових електростанцій

Для того, щоб ефективно використовувати енергію вітру, важливо розуміти добові та сезонні коливання вітру, зміну швидкості вітру в залежності від висоти над землею, кількість бризів за короткі проміжки часу, а також статистичні дані принаймні за останні 20 років.

Енергія вітру використовується людством здавна. Одним з найдавніших винаходів, що використовує вітер, є вітрило, що датується 5 тисячоліттям до нашої ери. У першому столітті до нашої ери давньогрецький вчений Герон Александрійський винайшов вітряк, який приводив у рух орган [48].

Вітряки для переробки зерна з'явилися ще в Середньовіччі. Вважається, що перші вітряки були побудовані між 9 і 7 століттями до нашої ери в Систані, між сучасними Іраном і Афганістаном. Ці млини мали вертикальний вал і 6-12 лопатей, виготовлялися з тканини або очерету і використовувалися як млини та водяні насоси.

В останні роки вітрогенератори все частіше використовуються для виробництва електроенергії. Високопотужні вітрові турбіни були побудовані і встановлені в районах, де вітер дме часто і сильно. З роками їхня кількість і якість зростали, а також були створені системи масового виробництва.

Всесвітня вітроенергетична асоціація повідомляє, що наприкінці червня 2020 року світова вітроенергетична потужність досягла 336 327 МВт, з яких 17 613 МВт було додано в першій половині 2021 року. Це значне зростання порівняно з 13,9 ГВт у першій половині 2020 року та 16,4 ГВт у 2019 році. Станом на середину 2021 року загальна встановлена вітроенергетична потужність становила близько 4% світового попиту на електроенергію. За шість місяців світова вітроенергетична потужність зроста

на 5,5% (5% за аналогічний період 2020 року і 7,3% у 2019 році) і на 13,5% в річному обчисленні (середина 2021 року порівняно з серединою 2021 року). Для порівняння, річний темп зростання у 2021 році був на 12,8% нижчим [49].

Потужний світовий ринок вітроенергетики, безсумнівно, зумовлений економічними перевагами вітроенергетики, її зростаючою конкурентоспроможністю порівняно з іншими джерелами електроенергії, а також нагальною потребою у використанні технологій без викидів для пом'якшення наслідків зміни клімату та забруднення повітря.

Провідні ринки вітроенергетики у 2019 р.: Китай, Німеччина, Бразилія, Індія та США.

П'ять традиційних вітроенергетичних країн - Китай, США, Німеччина, Іспанія та Індія - разом складають 72% світових вітроенергетичних потужностей. З урахуванням нових потужностей частка "Великої п'ятірки" зросла з 57% до 62%.

Китайський ринок демонструє дуже хороші результати, додавши 7,1 ГВт потужностей, що значно більше, ніж у попередні роки. Загальна вітроенергетична потужність Китаю досягла 98 ГВт у червні 2021 року і зараз перевищила позначку 100 ГВт. Німеччина також показала хороші результати, додавши 1,8 ГВт потужностей у першому півріччі. Цей новий рекорд, безсумнівно, відображає очікування змін у вітроенергетичному законодавстві, які можуть уповільнити розвиток німецького ринку в найближчі роки [50].

Бразилія вперше увійшла в топ-10, ставши третім за величиною ринком з 1,3 ГВт нових вітрових установок, що становить 7% від загального обсягу продажів нових вітрових установок. Бразилії також вдалося зберегти своє незмінне лідерство в Латинській Америці.

Індія зберегла свою позицію другого за величиною ринку в Азії і п'ятого за величиною в світі з 1,1 МВт нових вітроенергетичних установок.

Ринок США продемонстрував сильні ознаки відновлення після обвалу в 2020 році, з розміром ринку 835 МВт, трохи випередивши Канаду (723 МВт), Австралію (699 МВт) і Великобританію, яка скоротила розмір свого ринку вдвічі в першій половині 2021 року до 649 МВт.

Іспанський ринок не сприяв загальному зростанню у 2021 році, оскільки він залишався в основному в стагнації, встановивши лише 0,1 МВт нових потужностей у першій половині 2021 року.

Чотири країни встановили понад 1 ГВт потужностей у першій половині 2020 та 2021 років: Китай (7,1 ГВт нових потужностей), Німеччина (1,8 ГВт), Бразилія (1,3 ГВт) та Індія (1,1 ГВт).

Топ-10 країн-лідерів вітроенергетики демонструють схожу картину в першій половині 2021 року, хоча і з невеликим покращенням своїх показників: п'ять країн покращили свої показники порівняно з 2020 роком: Китай, США, Німеччина, Франція та Канада; п'ять країн зазнали падіння ринку: Іспанія, Велика Британія, Італія, Данія та, меншою мірою, Індія. Іспанія та Італія пережили майже повну стагнацію, встановивши лише 0,1 МВт та 30 МВт нових потужностей відповідно. Польща наразі входить до топ-15 країн за встановленими потужностями, тоді як Японія випала зі списку [51].

Великобританія та Німеччина планують стати лідерами у розвитку вітроенергетики в найближчому майбутньому за рахунок встановлення офшорних вітроелектростанцій.

Технічні рішення (Технічні характеристики, обладнання, особливості встановлення та експлуатація, виробники, переваги та недоліки).

Особливості вітрової електростанції (ВЕС).

Паралельна робота з електромережею. У цьому випадку енергія, що виробляється вітроелектростанцією, повинна відповідати вимогам до якості електроенергії, що пред'являються мережею. Мережа також повинна приймати енергію від ВЕС (наприклад, пропускна здатність лінії електропередач, наявність відповідних лічильників електроенергії тощо) і своєчасно реагувати на зміну її кількості [52].

Автономна робота вітроелектростанцій. Робота таких вітроелектростанцій вимагає встановлення акумуляторів для зберігання електроенергії, виробленої віротурбінами за сприятливих погодних умов. Встановлення акумуляторів значно збільшує загальну вартість системи. Тому перед прийняттям остаточного рішення необхідно провести технічні та економічні розрахунки. Автономні вітроелектростанції можна встановлювати разом з фотоелектричними модулями [53].

Пряме перетворення електричної енергії в теплову. Електроенергія, вироблена вітрогенератором, перетворюється на тепло шляхом нагрівання об'єму води за допомогою електричних нагрівачів. Іншими словами, вода є резервуаром тепла. Цей метод можна використовувати для попереднього підігріву води в системах водяного опалення [54].

Основними недоліками вітроенергетики є нестабільність і нерегульованість вітрових потоків. Іншим важливим питанням є економічна життєздатність вітрових електростанцій.

Вітроенергетика на сьогоднішній день є однією з найбезпечніших форм електроенергії. Україна має високий вітровий потенціал для розвитку вітроенергетики. Завдяки високим тарифам на вітрову енергію інвестиційний клімат в Україні є дуже привабливим. У 2019 році Україна увійшла до п'ятірки європейських країн з найбільшою кількістю вітрових електростанцій, встановлених у першій половині 2019 року, посівши п'яте

місце. Загалом у 2019 році було введено в експлуатацію 637 МВт вітроенергетичних потужностей. Україна також посідає восьме місце в рейтингу найпривабливіших країн для інвестицій у "зелену" енергетику. Завдяки урядовим реформам в енергетичному секторі інвестиції зростають з кожним роком: У 2018 році в нові об'єкти відновлюваної енергетики було інвестовано 801 мільйон доларів США, що на 755 мільйонів доларів США більше, ніж у 2017 році [55].

Проектування вітрових електростанцій має відповідати низці українських законів та нормативно-правових актів, зокрема

- *ДСТУ 8339:2015 “Оцінення впливу вітроелектростанцій на навколишнє середовище”*
- *ДСТУ 8292:2015 “Приєднання до електроенергетичної системи”*
- *ДСТУ 4037-2001 “Установки електричні вітрові. Загальні технічні вимоги”*
- *ГКД 3-004-2000. Вітрові електричні установки. Визначення характеристик потужності;*
- *ГКД 341.003.004.001-2000. Техніко-економічне обґрунтування інвестицій у будівництво вітрових електростанцій;*
- *ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій;*
- *ГКД 341.003.001.001-2000 Під`єднання об`єктів вітроенергетики до електричних мереж. Порядок та вимоги. Зміни*
- *СОУ-Н МПП 27.180-66:2006 Вітроенергетика. Установки електричні вітряні. Порядок поставлення на серійне виробництво;*
- *СОУ-Н МПП 27.180-65:2006 Вітроенергетика. Установки електричні вітряні. Порядок проведення приймальних випробувань дослідних зразків;*

- *СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014 Норми технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище;*
- *СОУ НЕК 341.001:2019 Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України.*
  - *ПУЕ 2017 «Правила улаштування електроустановок».*
  - *Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності».*
  - *Закон України «Про основи містобудування».*
  - *Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18.01.2001р.*
  - *Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403Л/І.*

Перед проектуванням ВЕС необхідно залучити дослідників для визначення рівня впливу на флору і фауну та доцільності будівництва вітроелектростанції, тобто наскільки безпечною буде майбутня ВЕС для міграції птахів і кажанів. Екологи проводять польові дослідження (вдень і вночі) для визначення стану флори і фауни в районі, де планується будівництво ВЕС. Інженер-проектувальник разом з екологом також обстежує запропоновану ділянку вітроелектростанції, щоб визначити, чи є технічна можливість встановлення вітрових турбін [56].

Придатність вітрової турбіни досліджується до початку будівництва. На висоті 30-100 м встановлюються анемометри і збираються дані про швидкість і напрямок вітру протягом одного-двох років. Ці дані зводяться в карту вітроенергетичного потенціалу, яка може бути використана майбутніми власниками для оцінки прибутковості проекту.

При проектуванні вітроелектростанцій враховується вплив вітрових турбін на здоров'я людей. Перед будівництвом вітроелектростанції проводяться попередні розрахунки щодо шуму та мерехтіння тіні. У багатьох



країнах рівень шуму суворо регламентований. В Україні рівні шуму від діючих ВЕС визначені ДСП 173-96 і становлять 45 дБ в нічний час. Мерехтіння тіней не регулюється чинним українським законодавством. Ми використовуємо програмне забезпечення WindPro для розрахунку шумових навантажень і мерехтіння тіні під час роботи вітроелектростанції [57].

Ми можемо проектувати наземні вітроелектростанції на території України.

Етап розробки вітроенергетичних проектів:

1. Підготовка бізнес-плану проекту.
2. Топографо-геодезична зйомка земельної ділянки.
3. Розробка техніко-економічного обґрунтування для приєднання вітроелектростанції до електромережі.
4. Оформлення права власності або користування, містобудівних умов та обмежень забудови земельної ділянки.
5. Підготовка технічних умов на проектування та проектної документації на їх основі.
6. Експертиза проекту будівництва та отримання дозволу Державної будівельної інспекції України на виконання будівельних робіт вітрової електростанції.
6. Отримання ліцензії на виробництво електроенергії.
7. Здійснити будівництво, монтаж та введення в експлуатацію схеми електропостачання.
8. Отримати сертифікат готовності робочого проекту та об'єкта відновлюваної енергетики від Державної архітектурно-будівельної інспекції України.
9. Продавати вироблену електроенергію за "зеленим" тарифом.

Якщо ви вирішили побудувати вітрову електростанцію, вам потрібно врахувати деталі ще на етапі складання плану проекту. Розглянемо докладніше, з чого складається бізнес-план вітроелектростанції:

- Визначення мети та завдання проекту.
- Огляд ринку збуту, де вироблена електроенергія буде продаватись.
- Визначення типу будівництва. Нове будівництво чи реконструкція об'єкту.
- Визначення розмірів земельної ділянки для будівництва вітроелектростанції.
- Визначення планованої потужності ВЕС.
- Технічний опис проекту вітроелектростанції.
- Вибір обладнання для ВЕС.
- Визначення вартості виконання будівельно-монтажних та пусконаладжувальних робіт вітроелектростанції.
- Визначення прогнозованої величини виробництва електроенергії ВЕС за рік.
- SWOT-аналіз, враховуючи опис позитивних соціально-економічних факторів, що виникають від реалізації проекту вітрової електростанції, а саме:
  - Створення нових робочих місць;
  - Технічне переоснащення електричних мереж;
  - Зниження споживання викопного палива при виробництві електроенергії;
  - Екологічний вплив (запобігання викиду шкідливих речовин в атмосферу, проведення ОВД – оцінки впливу на довкілля).
  - Прогнозування термінів будівництва.

- Визначення основних економічних та фінансових показників проекту (обсяг інвестицій, операційні витрати, термін окупності проекту).

Лише у 2019 році проєктні команди MCL розробили 10 проєктів у Житомирській та Волинській областях. Проєктна потужність ВЕС становить від 21 до 111 МВт у Житомирській області та від 63 до 72 МВт у Волинській області.

MCL є членом Української вітроенергетичної асоціації (УВЕА), що дозволяє нам залучати до процесу розробки вітроенергетичних проєктів найкращих експертів вітроенергетичного сектору України. Обираючи MCL, ви обираєте найкраще для свого бізнесу [58]!

Вітрові електростанції належать до систем відновлюваної енергетики, оскільки вітер є відновлюваним джерелом енергії. Тому вони не вимагають додаткових витрат і мають значні переваги в порівнянні з іншими електростанціями, тому широко використовуються в усьому світі.

Наразі у світі налічується близько 3 мільйонів вітрогенераторів, з яких близько 3 500 встановлені в країнах СНД. Вітрові електростанції (ВЕС) досягли такого рівня комерційної зрілості, що можуть конкурувати з традиційними джерелами енергії там, де існують сприятливі швидкості вітру. Більшість різних пристроїв, які перетворюють енергію вітру в механічний рух, є лопатевими машинами з горизонтальними валами, встановленими проти вітру [59].

В даний час найпоширенішим обладнанням, що підключається до мережі, є вітрогенератори одиничною потужністю 100-500 кВт.

Турбіни з горизонтальними валами і високою швидкістю обертання мають найвищий коефіцієнт використання енергії вітру.

В даний час існує багато типів систем для перетворення вітру в електроенергію. Основним гравцем є вітрова турбіна. Вітрові електростанції

можна розділити на три класи відповідно до принципу роботи і структури вітротурбіни:

- 1) крильчасті (пропелерні) — мають вітроколесо з лопатями, розташованими перпендикулярно до валу;
- 2) карусельні або роторні;
- 3) барабанні.

У карусельних і барабанних вітрогенераторах вал вітротурбіни встановлюється вертикально. Лопаті з одного боку валу вітрогенератора обертаються під впливом вітру, тоді як інші лопаті нахилені або обертаються за допомогою спеціальних пристроїв, що мають ребра проти вітру. Ці два класи більш громіздкі і менш ефективні, ніж ті, що мають лопаті. Тому всі сучасні вітрогенератори в основному базуються на лопатевому типі. Пропелерні вітрогенератори є більш досконалішими, споживають порівняно менше матеріалів і мають набагато вищий коефіцієнт використання енергії вітру [60].

Аналіз енергетичного, земельного, екологічного та містобудівного права дозволив визначити правові умови та особливості, які слід враховувати при розміщенні та експлуатації вітрових електростанцій з точки зору земельного, екологічного, містобудівного, господарського та організаційного права, а також розробити збалансований механізм сприяння їхньому розвитку. Автор описує сучасні тенденції та правові механізми, які сприяють підвищенню інвестиційної привабливості вітроенергетики та зростанню обсягів будівництва вітрових електростанцій.

Вітроенергетика характеризується тісним зв'язком із землею, на якій вона будується. Відповідно до нормативних вимог Земельного кодексу України ("ЗК") та Закону України "Про правове регулювання спеціальних зон земель енергетики та об'єктів енергетики", розміщення, будівництво та

експлуатація вітрових електростанцій та вітрових турбін (як об'єктів альтернативної енергетики) дозволяється в окремій категорії земель "землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення".

У межах цієї загальної категорії земель, відповідно до ч. 1 ст. 76 Земельного кодексу України, землі енергетики - це землі, надані для розміщення об'єктів енергетики, у тому числі вітрових електростанцій, крім випадків, коли такі об'єкти розміщуються на землях іншого цільового призначення, встановленого законом. Закон України "Про правове регулювання використання земель енергетики та спеціальних зон енергетичних об'єктів" (стаття 7) передбачає, що у складі земель енергетики землі, надані для розміщення, будівництва та експлуатації об'єктів електроенергетики, зокрема вітрових електростанцій, вважаються землями підприємств з виробництва електричної та теплової енергії.

У сфері спрощення доступу до земельних ділянок для створення об'єктів альтернативної енергетики, у тому числі вітроенергетики, відбулися позитивні зрушення у зв'язку з прийняттям Закону України від 23 листопада 2018 року "Про внесення змін до Податкового кодексу України та деяких інших законодавчих актів щодо покращення адміністрування окремих податків і зборів" (набрав чинності 1 січня 2019 року). Відповідно до цього законодавчого нововведення, об'єкти альтернативної енергетики, що використовують енергію вітру, можуть встановлюватися не лише на землях, визначених як "землі енергетики", а й на інших землях загальної категорії "землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення" без необхідності зміни цільового призначення. Встановлення вітрових турбін дозволяється без необхідності зміни цільового призначення.

Враховуючи специфіку вітроенергетики, яка залежить від природних умов, обмеження щодо територіального розміщення об'єктів вітроенергетики, безумовно, стримують розвиток галузі. Відповідно до статті 18 Закону України "Про правовий режим спеціальних зон земель енергетики та об'єктів енергетики", санітарно-захисні зони об'єктів енергетики встановлюються з метою надійної експлуатації та захисту об'єктів електроенергетики, об'єктів передачі електричної та теплової енергії, а також для забезпечення громадської безпеки та охорони навколишнього природного середовища. Необхідність встановлення таких зон значно збільшує кількість земельних ділянок, необхідних для будівництва об'єктів вітроенергетики.

Однак землі, що використовуються для виробництва енергії, не слід розглядати лише як землі енергетики. Землі, що використовуються для виробництва енергії, в тому числі вітрової, належать до різних категорій земель.

Закон "Про альтернативні джерела енергії" дозволяє змінювати цільове призначення земельної ділянки до передачі її у власність або оренду вітроенергетичному проекту, якщо це необхідно для задоволення потреб у виробництві вітрової енергії. Детально про встановлення та зміну цільового призначення земельної ділянки викладено у статті 20 Земельного кодексу України. Землі, що виділяються під вітрові електростанції, здебільшого є землями сільськогосподарського призначення. Це пов'язано з тим, що існують організації, які виробляють енергію таким чином. Це організації, які займаються товарним сільськогосподарським виробництвом.

Однак зміна цільового призначення земельних ділянок часто відбувається з порушенням законодавства. Наприклад, досить поширеним прикладом порушення є те, що на окремі види земель сільськогосподарського призначення поширюється мораторій на відчуження та зміну цільового

призначення відповідно до глави 15 Тимчасових положень Земельного кодексу України, що робить недійсними всі правочини щодо таких земель з моменту їх укладення.

При реалізації вітроенергетичних проєктів найбільш поширеними способами набуття прав на земельні ділянки (разом з набуттям права власності на відповідну земельну ділянку) є договори оренди та договори про встановлення земельних сервітутів. Безперечною перевагою земельних сервітутів є те, що законодавство не містить жодних обмежень щодо форми власності земельної ділянки, на яку поширюється земельний сервітут, та цільового призначення земельної ділянки.

Тому, на відміну від договору оренди, при встановленні вітротурбіни для СТО на землях сільськогосподарського призначення не потрібно змінювати цільове призначення земельної ділянки. Згідно з юридичною практикою, для отримання права користування земельною ділянкою, що перебуває у власності або користуванні фізичної особи, для виробництва вітрової енергії пріоритетним є підписання договору сервітуту, тоді як якщо земельна ділянка перебуває у власності держави або територіальної громади, зазвичай укладається договір оренди, і ймовірність встановлення сервітуту є меншою. Таким чином, для реалізації права на будівництво ВЕС необхідною умовою є отримання відповідних прав на земельну ділянку. При цьому, передача (надання) земельної ділянки із земель державної чи комунальної власності у власність або користування фізичній чи юридичній особі для містобудівних потреб дозволяється за умови, що відповідна земельна ділянка розташована на території, на якій на місцевому рівні затверджено хоча б один з таких видів містобудівної документації комплексний план, у тому числі план земельної ділянки, генеральні плани населених пунктів, у тому числі плани земельних ділянок; плани земельних ділянок як окремий вид

містобудівної документації; плани земельних ділянок як окремий вид містобудівної документації. Однак це обмеження не поширюється на випадки відведення земельних ділянок для розміщення лінійних об'єктів транспортної та енергетичної інфраструктури (доріг, мостів, шляхопроводів, ліній електропередач, зв'язку), що значно полегшує доступ до земельних ділянок для вітрових електростанцій.

## 2.2 Особливості вертикальних вітрогенераторів

Вертикальні вітрогенератори (з вертикальною віссю обертання) безшумні, інерційні, оптимально адаптовані до погодних умов України. На сьогоднішній день вертикальні вітрогенератори є однією з найефективніших розробок.

Основними перевагами вертикальних вітрогенераторів є простота монтажу, доступність під час експлуатації та цілорічна робота без зниження продуктивності в осінньо-зимовий період. Вони не залежать від напрямку вітру та їх можна встановлювати прямо на рівні землі, що значно скорочує витрати.

Перевага вітроелектростанцій у тому, що вони займають меншу площу, ніж сонячні електростанції. Так, для ВЕС потужністю 1 МВт знадобиться лише 30-50 соток землі, тоді як для СЕС аналогічної потужності – близько двох гектарів. ВЕС можуть бути максимально наближені до точок підключення: ВЕС понад 20 МВт може перебувати за 700 м від населених пунктів, побутова 150 кВт – лише за 40 метрів (згідно з ДСТУ). Вітрогенератори, на відміну від СЕС, дозволено розмішувати на землях сільськогосподарського призначення (є процедура виділення ділянки). Тому народжується нова група виробників енергії із відновлюваних джерел – фермери, аграрії (рис. 2.1, 2.2).



Ці новації роблять проекти з будівництва та введення в експлуатацію ВЕС до 5 МВт, для продажу за «зеленим» тарифом, привабливими для інвесторів.



Рис. 2.1. Вертикальний вітрогенератор

Вітер утворюється в результаті гігантських конвекційних потоків в атмосфері Землі, що рухаються тепловою енергією від Сонця. Це означає, що кінетична енергія вітру є відновлюваним енергетичним ресурсом – доки Сонце існує, вітер теж існуватиме.

Вітрові турбіни використовують вітер для безпосереднього керування турбінами. Вони мають величезні лопаті, встановлені на високій щоглі. Лопаті з'єднані з “гондолою”, або корпусом, що містить шестірні, пов'язані з генератором. Коли вітер дме, він передає частину своєї кінетичної енергії лопатям, які обертаються та рухають генератор. Декілька вітрогенераторів можуть бути згруповані у вітряних місцях для формування вітрових електростанцій.

Переваги вітрогенераторів:

- Вітер – це відновлювальний енергетичний ресурс, і витрати на пальне відсутні.
- Шкідливих забруднюючих газів не виробляється.
- Можливість розміщення у важкодоступних місцях.
- Вимагають малої площі та вписуються у будь-який ландшафт.
- Отримання безкоштовної електроенергії у довгостроковій перспективі, відсутність витрат на паливо та його доставку.
- Автономність – незалежність від стану та роботи зовнішніх електричних мереж.

Недоліки вітрогенераторів:

- Кількість виробленої електроенергії залежить від сили вітру.

Типовий склад системи енергозабезпечення на базі вітрогенератора:

- Вітроелектрична установка (*вітрогенератор, ВЕУ*) – виробляє “грубу” електроенергію з нестабільними параметрами, що залежать від швидкості вітру.
- Щогла – служить для встановлення ВЕУ на такій висоті, де вітровий потік не затінюється перешкодами і має достатню швидкість.
- Акумуляторна батарея (АКБ) – є буфером, який узгоджує графіки вироблення та споживання енергії.
- Контролер заряду АКБ – захищає АКБ від перезаряду, обмежуючи зарядний струм та напругу.
- Інвертор – перетворює постійну напругу на змінну  $\sim 220\text{В}$ .

- Зарядний пристрій – за необхідності заряджає АКБ від зовнішньої мережі  $\sim 220\text{В}$ .
- Мережева автоматика – стежить за станом мережі та, за заданим алгоритмом, підключає навантаження до мережі або до інвертора.

Комбінація сонячної та вітрової генерації. Комбінувати сонячні та вітрові електростанції корисно. Вже просто через те, що вітрові електростанції, на відміну від сонячних, працюють уночі. Та й сезонні коливання знижуються. У багатьох регіонах сонячні електростанції взимку виробляють набагато менше, ніж улітку, а вітрові, навпаки, продуктивніше функціонують узимку. Тобто комбінація дозволяє згладжувати добові та сезонні коливання, підвищити надійність системи та знизити потребу в системах накопичення енергії та балансувальних потужностей для інтеграції змінних ВІЕ.

Багатополюсність генератора говорить про його тихохідність, дозволяючи отримати номінал на малих обертах вітрогенератора і повністю відмовитися від редукторів, колекторних щіток і використовувати метод магнітної левітації при його обертанні. Наше крило успішно пройшло випробування з аеродинаміки і показало найкращий результат зі стрілювання, а саме – вже при швидкості вітру в  $0,17\text{ м/с}$  відбувається старт нашого вітрогенератора та стійка зарядка АКБ з  $2\text{ м/с}$  (на відміну від аналогів, які стартують за швидкості вітру від  $5\text{ м/с}$ ). Завдяки новій формі крила та зниженню його ваги ми досягли зниження швидкості вітру для досягнення номінальної потужності вітрогенератора з  $5\text{ м/с}$  до  $3\text{ м/с}$ . Збираються вітрогенератори різної потужності від  $250\text{ Вт}$  до  $32\text{ кВт}$ .



Рис. 2.2. Вітрогенератори

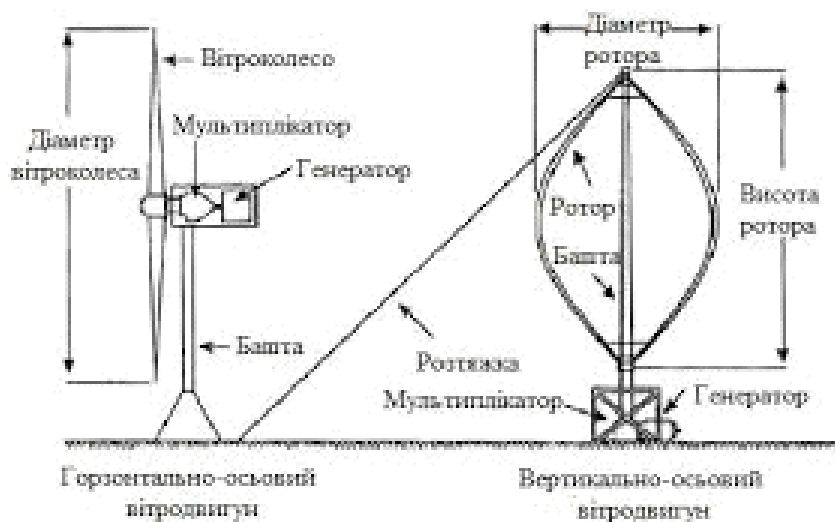


Рис. 2.3. Різновид вітрогенераторів за типом застосовуваної вітрогенераторної

Переваги вертикальних вітрогенераторів над традиційними:

Застосування інноваційних безшумних та безвібраційних технологій

Застосування високоефективних методів отримання та перетворення енергії вітру на електричну

Оптимальний профіль лопаті вітроколеса дозволяє досягти ККД крила близький до ідеального, незалежно від напрямку вітру (незалежне наведення на напрям вітру)

Вітрогенератор вертикального виконання не вимагає регламентного обслуговування та ремонту. Конструкція не містить деталей з поверхнями, що труться, за винятком упорного підшипника вітрокрила, що має трисоткратний запас міцності.

Високо стійкий до сильного вітру, досить стійкий, щоб витримати ураганний вітер

Контролерно-перетворююча система дозволяє заряджати акумуляторну батарею при найменших обертах генератора. Це забезпечує можливість споживання раніше виробленої енергії під час безвітря

Потребує мінімум простору для розміщення, абсолютно нешкідливий через відсутність випромінювання, вібрації та шумового навантаження

Можливість встановлення без шкоди ландшафтним видам, безпечний для птахів дизайн

Швидка установка та обслуговування

Головною перевагою ВЕУ є її незалежність від магістральних енергетичних мереж, автономність виробництва та споживання електроенергії. Відносна простота пристрою, універсальність обладнання, доступність транспортування та монтажу дозволяють зводити вітроенергетичні станції в недоступних, віддалених від енергопостачання районах.

### Горизонтальні вітрогенератори.

Вітрогенератор з горизонтальною віссю обертання, має дві або три лопаті, встановлені на вершині щогли – найбільш поширений тип вітроустановок ВЕУ. Сучасні горизонтальні вітрогенератори є установкою, яка служить для переробки кінетичної енергії вітру в механічну енергію за допомогою лопатей, а потім в електричну за допомогою електричного генератора. На рис. 2.4, 2.5 показані для прикладу загальний вигляд та технічні характеристики вітрогенератора з горизонтальною віссю типу ENERCON 500.



Рис. 2.4. Загальний вигляд вітрогенератора ENERCON 500

Таблиця 2.1

- Основні характеристики вітрогенератора типу ENERCON 500

|   |  |
|---|--|
| Діаметр вітротурбіни: 4,4 м<br>Ометна площа: 15.2 м <sup>2</sup><br>Вироблення енергії за місяць: 250-500 кВт·год<br>Стартова швидкість вітру: 2-3 м/с<br>Розрахункова швидкість вітру: 8 м/с<br>Макс. швидкість вітру: 40-50 м/с<br>Номінальна частота обертання: 230 об/хв<br>Напруга генератора: 48 В<br>Номінальна потужність (при 8 м/с): 1600 Вт<br>Рекомендована висота щогли: 17-23 м | Діаметр вітротурбіни: 6.7 м<br>Ометна площа: 35.3 м <sup>2</sup><br>Вироблення енергії за місяць: 600-1200 кВт·год<br>Стартова швидкість вітру: 2-3 м/с<br>Розрахункова швидкість вітру: 8 м/с<br>Макс. швидкість вітру: 40-50 м/с<br>Номінальна частота обертання: 145 об/хв<br>Напруга генератора: 48 В<br>Номінальна потужність (при 8 м/с): 4000 Вт<br>Рекомендована висота щогли: 21-27 м |
|---|--|

Вітрогенератори можуть використовуватись як для промислового виробництва електроенергії, так і для побутового. Вітрогенератори промислового призначення мають досить велику потужність, а в такому вітропарку можуть встановлюватися до декількох сотень вітряків. Для побутового використання, як правило, встановлюється один вітрогенератор, підключений до системи домашнього електропостачання, яка включає також накопичувальні акумулятори.

### РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВІТРОГЕНЕРАТОРА

Розрахунок вітрогенератора будемо проводити згідно методики, яка наведена в [55, 56]. Локальним об'єктом є приватний будинок з наступним набором електроприладів та їх потужністю: освітлення (150 Вт), холодильник (500 Вт), мікрохвильова піч (1000 Вт-год.), пральна машинка (2000 Вт), телевізор (100 Вт), комп'ютер (500 Вт), праска (1200 Вт), пілосос (1200 Вт) зарядний пристрій мобільного телефону (60 Вт) та чайник (1000 Вт). Сумарно ці прилади споживатимуть 7310 Вт за годину, якщо будуть працювати одночасно. Враховуючи, що одночасно ці прилади практично включатися не будуть, та задавши час, впродовж якого вони працюють, можна визначити електроенергію, що буде споживатися електроприладами за добу: освітлення –  $150 \times 6 \text{ год.} = 900 \text{ Вт-год.}$ ; холодильник –  $500 \times 12 \text{ год.} = 600 \text{ Вт-год.}$ ; мікрохвильова піч –  $1000 \times 0,5 \text{ год.} = 500 \text{ Вт-год.}$ , пральна машинка –  $2000 \times 1,5 \text{ год.} = 3000 \text{ Вт-год.}$ , телевізор –  $100 \times 4 \text{ год.} = 400 \text{ Вт-год.}$ , комп'ютер –  $500 \times 4 = 6000 \text{ Вт-год.}$ , праска –  $1200 \times 0,2 \text{ год.} = 240 \text{ Вт-год.}$ , пілосос –  $1200 \times 0,2 = 240 \text{ Вт-год.}$ , зарядний пристрій мобільного телефону –  $60 \times 0,5 \text{ год.} = 30 \text{ Вт-год.}$  та чайник –  $1000 \times 0,15 = 150 \text{ Вт-год.}$  Тому сумарне споживання електроенергії за добу становитиме –  $5820 \text{ Вт-год.} = 5,8 \text{ кВт-год.}$  або 242 Вт на годину.

Середня швидкість вітру на території України улітку варіюється в діапазоні від 3 до 6 м/с, у середньому на території країни — до 5 м/с. Узимку загалом вітри сильніші, можуть досягати 5-8 м/с. Рекордна швидкість вітру в Україні за весь час метеоспостережень 180 км/год зафіксована на горі Ай Петрі в Криму [55]. Для розрахунку візьмемо середню швидкість вітру 5 м/с.

Перш за все, потрібно дізнатися, скільки енергії можна буде отримати від вітрогенератора. Для розрахунку використовується відома кубічні



залежність потужності  $P$  вітрогенератор від швидкості вітру  $V$  в місці встановлення пристрою [56, 57]

$$P = \rho S V^3, \quad (3.1)$$

де  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – щільність повітряного потоку;  $S$  – площа, на яку тисне повітряний потік.

Наприклад, якщо на площу, що дорівнює  $10 \text{ м}^2$ , тисне повітряний потік зі швидкістю  $5 \text{ м/с}$ , тоді маємо

$$P = 1.29 \cdot 10 \cdot 5^3 = 1612,5 \text{ Вт} = 1,6 \text{ кВт.}$$

Цей розрахунок є достатньо грубим, тому що на практиці будемо отримувати не більше 20-50% потенційної енергії вітрогенератора. Частина енергії втрачається на завихрення, обтікання тощо.

Більш точний розрахунок можна зробити за такою формулою

$$P = 0.5 \xi \pi R^2 \rho V^3 \eta_r \eta_g, \quad (3.2)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт використання енергії вітру (в номінальному режимі для швидкохідних вітряків досягає максимум  $\xi_{\max} = 0,4-0,5$ ), безмірна величина;  $R$  - радіус ротора, м;  $\eta_r, \eta_g$  - ККД редуктора та генератора, відповідно.

Якщо прийняти наступні вихідні дані:  $\xi = 0,5$ ;  $R = 4,5 \text{ м}$ ;  $V = 5 \text{ м/с}$ ;  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ;  $\eta_r = 0,87$ ,  $\eta_g = 0,9$ , то отримаємо наступне значення потужності вітрогенератора

$$P = 0.5 \xi \pi R^2 \rho V^3 \eta_r \eta_g = 0.5 \cdot \pi \cdot 0.5 \cdot 4.5^2 \cdot 5^3 \cdot 1.29 \cdot 0.87 \cdot 0.9 = 803.22 \text{ Вт.}$$

Відомо [56], що номінальна швидкість вітру повинна бути не більш, ніж в 2 рази, вище за середньорічну ( $5 \text{ м/с}$ ). Тобто, номінальна швидкість

вітру для вітрогенератора, що розраховується, має становити приблизно 8-10 м/с.

Вітрогенератор розрахованої потужності (800 Вт на годину) підійде для покриття потреб в електроенергії локального об'єкту, яка становить приблизно 250 Вт на годину. Враховуючі, що більшість часу вітрогенератор працювати не на номінальній потужності, яка відповідає номінальній швидкості вітру (8-10 м/с), а на половинній потужності, яка відповідає середньорічній швидкості вітру (4-5 м/с). Вітрогенератор в автономній системі повинен встигати виробляти ту кількість енергії, яка споживається. Слід також враховувати коливання швидкості вітру відносно середнього показника.

Таким чином, можна рекомендувати для електроживлення локального об'єкту вертикальний вітрогенератора типу Есо-ВЕГ номінальної потужності 800 Вт з наступними характеристиками: номінальна швидкість вітру - 3-10 м/с, стартова швидкість вітру - 1,5 м/с, робоча швидкість вітру – 2-16 м/с, кількість – 3 [58].

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз особливостей застосування вітроенергетичних установок різних типів. Швидкість вітру в часі нестабільна і змінюється стрибкоподібно. Великі швидкості і пориви вітру можуть привести до вироблення надлишків енергії або до руйнування агрегату. Для запобігання небажаних режимів роботи в системах вітрогенерації передбачена система обмеження оборотів вітроколеса шляхом регулювання кута нахилу лопатей. Наведено переваги та недоліки вітрогенераторів з горизонтальною та вертикальною віссю обертання.

Специфіка використання енергії вітру для виробництва електроенергії полягає в тісному взаємозв'язку із земельними ділянками, які є територіальною основою для здійснення виробництва електроенергії. Вітрогенератори краще встановлювати на відкритому просторі, без перешкод для вітру, на відстані від житлового будинку не менше 25-40 метрів, тому що вітрогенератори є джерелами шуму.

Швидкість вітру є найважливішим чинником, що впливає на потужність вітрогенераторної установки в цілому. Кількість електроенергії, виробленої вітрогенератором, зростає в кубічному співвідношенні з підвищенням швидкості вітру. Чим вище щогла вітрогенератора, тим більша швидкість вітру.

Розраховано параметри вітрогенератора, призначеного для використання на локальному об'єкті з заданим навантаженням. Визначена потужність вітрогенератора, обґрунтована номінальна швидкість вітру.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Циганок О. В. Альтернативні джерела енергії як засіб ресурсоефективності / О. В. Циганок, А. В. Череп. // Випуск 22. – 2018. – С. 688–691.
2. Українська альтернативна енергетика: повільно, але стабільно [Електронний ресурс] // Baker Tilly Ukraine. – 5. – Режим доступу до ресурсу: <https://bakertilly.ua/news/id44270>.
3. Сонячні колектори [Електронний ресурс] // Центр альтернативних та відновлювальних джерел енергії. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: [http://aesd.org.ua/?page\\_id=177](http://aesd.org.ua/?page_id=177).
4. Хрипко С. Л. Сонячні батареї створенні на основі низько-розмірних нанокompatитних структур / С. Л. Хрипко, В. В. Кідалов. // ЖУРНАЛ НАНОТА ЕЛЕКТРОННОЇ ФІЗИКИ. – 2016. – С. Том 8 № 4(2), 04071(10сс).
5. Фотоелектричні панелі та їх типи [Електронний ресурс] // Теплоціль. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://xn--e1amaldq6a1c6e.xnjlamh/fotoelektricheskiye-paneli-i-ikh-tipy>.
6. Які сонячні панелі кращі - монокристалічні чи полікристалічні? [Електронний ресурс] // Гексагон-енергія Альтернатива енергії природи. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/me7rDpl>.
7. Типи сонячних батарей [Електронний ресурс] // ПКП "Техноноватор" – Режим доступу до ресурсу: <http://tehnovator.com.ua/ua/energy-ua/sun-batteryua/types-sun-battery-ua.html>.
8. Чукрина В. Полікристалічні сонячні батареї [Електронний ресурс] / В. Чукрина // Компанія "Концепція Енергозбереження". – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://alternative-energy.com.ua/vocabulary/полікристалічні-сонячнібатареї/>.

9. Герасимюк О. Типи сонячних батарей та їх ККД [Електронний ресурс]

10. / О. Герасимюк // Компанія "Концепція Енергозбереження". – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/te7r02e>.

11. Типи вітрогенераторів [Електронний ресурс] // atmosfera.ua – Режим доступу до ресурсу: <https://www.atmosfera.ua/uk/vitryani-elektrostantsii/tipivitrogeneratoriv/>.

12. Камінський Ю. Вітрогенератори для дому: види, приблизні ціни, виготовлення своїми руками [Електронний ресурс] / Ю. Камінський // isu.org.ua. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/4e7twAi>.

13. Куц Т. Горизонтальний або вертикальний вітрогенератор? За і проти [Електронний ресурс] / Т. Куц // Компанія "Концепція Енергозбереження". – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/Ge7tnGf>.

14. Миронюк Д. Вітер та сонце – разом ефективніше [Електронний ресурс] / Д. Миронюк // solarlove.org. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://ecotown.com.ua/news/Viter-ta-sontse-razom-efektyvnishe/>.

15. Синєглазов В. М. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем [Електронний ресурс] / В. М. Синєглазов // enerhodzherela.com.ua – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/ne7tUzD>.

16. Гібрид вітрогенератора і сонячних панелей [Електронний ресурс] // ВІР. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://vir.uan.ua/hybrid-wind-turbine-andsolar-panels/>.

17. Герасимюк О. SolarMill – гібридна установка, яка генерує енергію з вітру та сонячної енергії [Електронний ресурс] / О. Г // Компанія "Концепція Енергозбереження". – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/Ve7tXyT>

18. Сама велика в світі гібридна сонячно-вітрова установка [Електронний ресурс] // KarmaDigital –Режим доступу до ресурсу: <https://karma.digital/samaya-bolshaya-v-mire-gibridnaya-solnechno-vetryanayaustanovka>.

19. Global Wind & Solar Installations // Forecast International Energy Portal [Електронний ресурс]. – Режим доступу :<http://www.fipowerweb.com/Renewable-Energy.html>

20. Валько І.І., Бунько В.Я. Оцінка ефективності використання сонячної енергії. Матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «Сталий розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення», 5 листопада 2020 року м. Березани, Тернопільська область.

21. Боровик Ю. Т. Проблеми та перспективи розвитку альтернативної енергетики в Україні / Ю. Т. Боровик, Ю. В. Єлагін. // Вісник економіки транспорту і промисловості № 65. – 2019. – С. 68–75.

22. Перетворювальна техніка: вітроенергетика [Електронний ресурс]. Режим доступу : <http://www.spwr.by/stati/vetroenergetika.html>.

23. Касич А. О. Чинники розвитку альтернативної енергетики у сучасних умовах / А. О. Касич, Я. О. Литвиненко. // Випуск 12. – 2017. – С. 93–99.

24. Денисюк В. Ю. Автономні гібридні системи енергопостачання з використанням відновлювальних джерел енергії / В. Ю. Денисюк, В. С. Оленіч. // Перспективні технології та прилади. – С. 29–33.

25. Щур І. З. Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта / І. З. Щур, В. І. Климко. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – С. 92–100.

26. Український гідрометеорологічний центр [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: . <https://cutt.ly/xe7yOtD>.

27. Patel K. A review about the straight-bladed vertical axis wind turbine (SB- vawt) and its performance [Текст] / K. Patel, Y. Sarthi, A. Tirkey, P. K. Sen // International Journal for Innovative Research in Science and Technology. – 2014. – Vol. 1, No. 6. – P. 46-51.

28. Климко В. І. Інтелектуальна система керування електропостачанням окремого об'єкта від мережі та поновлюваних джерел енергії [Текст] / В. І. Климко, І. З. Щур // Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених (25-26 жовтня, 2012 р., м. Київ). – 2012. – С. 25-26. 95

29. Впровадження сонячних електростанцій та дослідження їх впливу на роботу електроенергетичних систем. – 2018. – С. 1–8. Режим доступу до ресурсу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/19b8e72e-5279-41a8-8831-d285389cd264>

30. Система електрозабезпечення експериментального будинку типу 0- енергії (площею 300 м<sup>2</sup> ) на основі використання відновлюваних і альтернативних джерел енергії // Nauka innov. – 2015. – С. 29–39.

31. Катаєва Є. Ю. Система розрахунку енергоефективності підприємства на базі методу проектування гібридних установок / Є. Ю. Катаєва, В. Ю. Теличко. // ВІСНИК КНУТД. – 2013. – С. 48–49.

32. Основні причини пожеж [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://buklib.net/books/31855/>.

33. Характерні причини виникнення пожеж [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://studopedia.com.ua/1\\_33436\\_harakterni-prichiniviniknennya-pozhezh.html](https://studopedia.com.ua/1_33436_harakterni-prichiniviniknennya-pozhezh.html).

34. Правила надання першої допомоги при ураженні електричним струмом [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://lviv.dsp.gov.ua/?p=10723>.

35. Долікарська допомога при ураженні електричним струмом [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/berezyuk\\_bezpeka\\_zhittyediyalnosti/76.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/berezyuk_bezpeka_zhittyediyalnosti/76.htm).

36. Богатирєв Н. І., Креймер А. С. Імітаційне моделювання вітроенергетичної установки. Київ: Основа, 2000. 416 с.

37. Васько В.П. Управління параметрами електроенергії автономних вітроелектричних станцій. Вінниця: ВНТУ, 2002. 246 с.

38. Вітроенергетика України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.uwea.com.ua/ukraine\\_wind.php](http://www.uwea.com.ua/ukraine_wind.php)

39. Германович В.М., Турілін А.А. Альтернативні джерела енергії. СПб.: Наука та Техніка, 2011. 318 с.

40. Гліненко Л.К., Сухоносів О.Г. Основи моделювання технічних систем. Львів: Видавництво “Бескид Біт”. 2003. 176 с.

41. Голіцин М.В., Голіцин А.М., Проніна Н.М. Альтернативні енергоносії. М: Наука, 2004. 157 с.

43. Деркачев С.В. Актуальність і проблеми розвитку вітроенергетики в Україні. К.: Урожай, 2006. 272 с.

45. Єрмолаєв С.О., Яковлєв В.Ф., Мунтян В.О. та ін. Проектування систем електропостачання в АПК. Мелітополь: Люкс, 2009. 568 с.

47. Кириленко О.В. Системи силової електроніки та методи їх аналізу. К.: "Текст", 2006. 488 с.

48. Ковальов І. О., Ратушний О.В. Альтернативні джерела енергії України: навч. посіб. Суми: Вид-во СумДУ, 2015. 201 с.



49. Коробко Б. С. Енергетика та сталий розвиток. Київ : Основа, 2006. 285 с.

50. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.

53. Михальчук В.Б., Потапенко М.В. Розробка імітаційної моделі вітроенергетичної установки. Матеріали I Міжнародної науковопрактичної конференції «Сталий розвиток аграрної сфери: інженерноекономічне забезпечення». ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», 5 листопада 2020 року м. Бережани, С.

54. Михальчук В.Б., Потапенко М.В. Розробка керуючого контролера вітроенергетичної установки. Матеріали науково-практичної студентської конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (2-3 квітня, 2020 р.) Випуск 12, ХНТУСГ ім. Петра Василенка, м. Харків. С. 94.

55. Гармаш Є.В., Любименко О.М. Розрахунок вітрогенератора в сільській місцевості - Режим доступу до ресурсу: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/8607/1/NRMSE2017\\_V2\\_P400-401.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/8607/1/NRMSE2017_V2_P400-401.pdf).

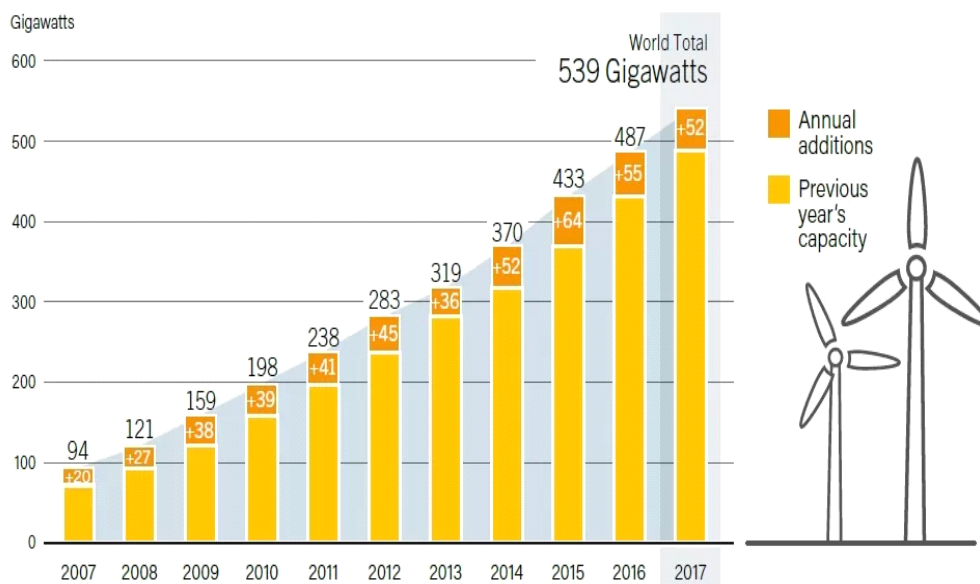
56. Основи вітроенергетики / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.

57. Yuriy Pantsyr, Ihor Garasymchuk, Vasyl Duganets, Mariia Melnyk, Oksana Yurchenko. Current state and prospects of wind energy development in Ukraine. E3S Web Conf., 154 (2020) 06004. Published online: 2020-03-09. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015406004>.

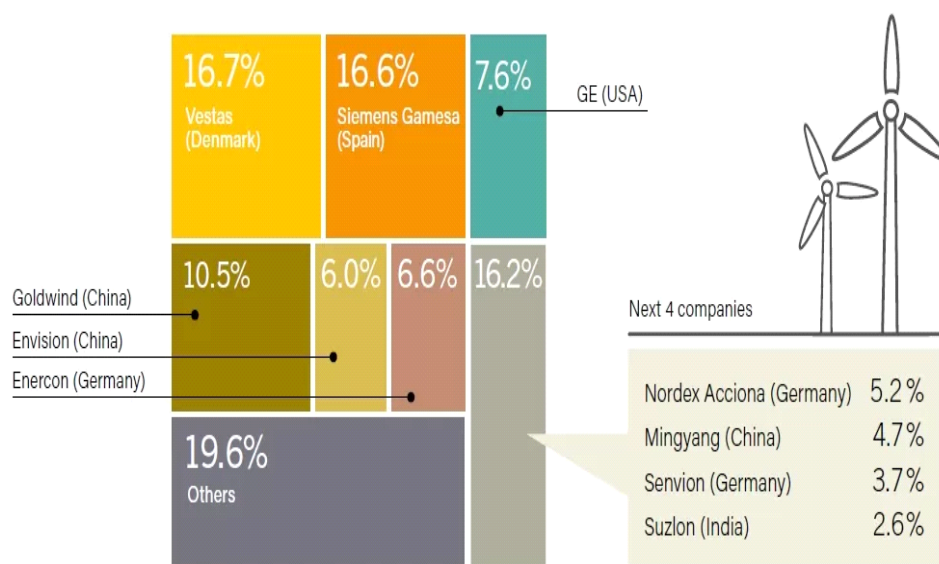
58. Вітрогенератор вертикальний. – Режим доступу: <http://www.ecosvit.net/ua/vertical-windgenerator-800w>.

## ДОДАТКИ

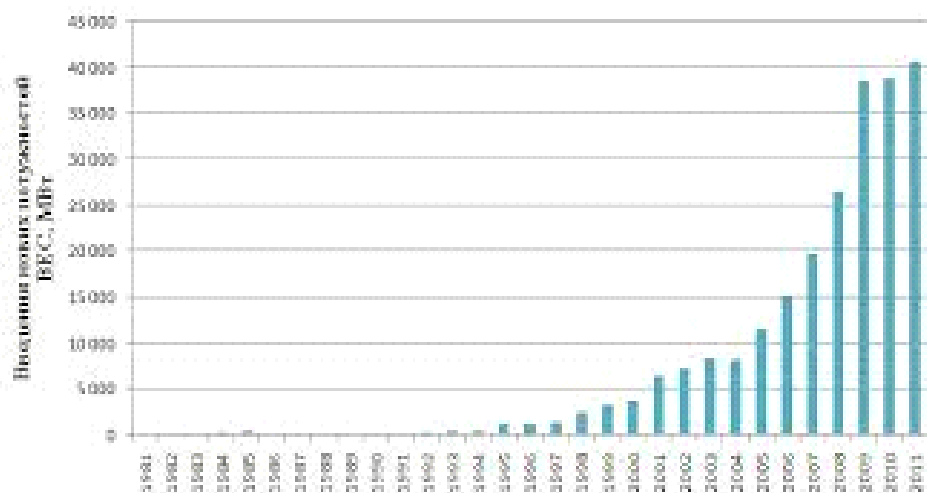
### Додаток 1.1 Вітроенергетика



### Додаток 1.2 AVENSTON - вітроенергетика, вітрогенератори



### Додаток 1.3 Аналіз та перспективи впровадження вітрових електростанцій



### Додаток 1.4 Вітроенергетика і перспективи її розвитку в Україні

