

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та
аспірантської підготовки
Кафедра загальної та теоретичної фізики

Магістерська кваліфікаційна робота
на тему: «МОДЕЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЄМНОСТІ ВІТРОДВИГУНІВ
В КОНЦЕПЦІЇ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ»

Виконала студентка 2-го курсу групи МТЗ-2
спеціальності 183 «Технології захисту
навколишнього середовища»
Фомічева Марія Володимирівна

Керівник д. ф-м.н., професор
Герасимов Олег Іванович

Реценцент д. техн. наук
Мещеряков В. І.

Одеса - 2018

МІНІСТРЕСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та аспірантської підготовки
Кафедра загальної та теоретичної фізики
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища
(шифр і назва)

(наказ № 271-С, від 05.10.2018)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
загальної та теоретичної фізики
Герасимов О. І.
“29 ” 10 2018 р

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Фомічевої Марії Володимирівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: *Модельна оцінка енергоємності вітрогенераторів в концепції альтернативних джерел енергії*

керівник роботи д. ф-м.н., проф. Герасимов О.І.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “05” жовтня 2018 р.

2. Срок подання студентом роботи 10 грудня 2018 р.

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). *1) Вивчення режиму швидкості вітру в Одеській області. 2) Наукове обґрунтування вибору теоретичного закону розподілу швидкостей вітру. 3) Розробка принципів законів розподілу швидкості вітру в часі і їх розподілу по території 4) Оцінка вітроенергетичних ресурсів Одеської області.*

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

Таблиця 1.1 – Структура світового споживання енергії. Таблиця 1.2 – Структура загального постачання первинної енергії України. Таблиця 1.3 – Структура фактичного виробництва електроенергії України, млн.кВт/год. Рис. 1.2.1 – Частка найбільших країн в загальносвітових запасах нафти. Рис. 1.2.2 – Частка найбільших країн в загальносвітових запасах газу. Рис. 1.2.3 – Частка найбільших країн в загальносвітових запасах вугілля. Таблиця 1.4 – Світові запаси урану. Таблиця 1.5 – Ресурси основних джерел відновлюваної енергії. Таблиця 1.6 – Показники розвитку використання альтернативних джерел енергії в Україні. Таблиця 2.1 – Сила вітру за шкалою Бофорта та вплив на умови роботи ВЕУ. Рис. 2.1. Типовий запис швидкості вітру. Рис. 2.2 Вітровий режим Одеської області (зимовий період). Таблиця 2.1 – Максимальна потужність вітрової енергії. Рис. 3.1. Основні параметри ВГУ. Таблиця 3.1 – Залежність відносної потужності генератора від висоти щогли. Рис.4.1. Роза вітрів, м. Одеса (ряд 1 – зимовий період; ряд 2 – весна; ряд 3 – літо; ряд 4 – осінь). Рис. 4.2 Середньодобова швидкість вітру. Одеса, р-н аеропорту, 2017р. Рис. 4.3 Середньодобова швидкість вітру. Кілійський р-н, 2017р. Рис.4.4 Середньодобова швидкість вітру. Татарбунарський р-н, 2017р. Рис. 4.5 Гістограми повторюваності швидкості вітру по градаціям як функції швидкостів вітру v та $\ln v$. Одеса, р-н аеропорту. Рис.4.6 Гістограми повторюваності швидкості вітру по градаціям як функції швидкостів вітру v та $\ln v$. Кілійський р-н. Рис. 4.7 Гістограми

повторюваності швидкості вітру по градаціям як функції швидкостів вітру v та $\ln v$. Татарбунарський р-н. Таблиця 4.1 – Щомісячний та річний прогностний виробок енергії за щоденною вітровою обстановкою в Одесі, Кілійському та Татарбунарському районах. Рис. 4.8 – Прогностний щомісячний виробок енергії для ВЕУ з діаметром вітроколеса = 6,2 м за щоденними показниками швидкості вітру (ряд 1) та з урахуванням обмежень за робочою швидкістю (ряд 2). м. Одеса (аеропорт). Рис.4.9 – Прогностний щомісячний виробок енергії для ВЕУ з діаметром вітроколеса = 6,2 м за щоденними показниками швидкості вітру (ряд 1) та з урахуванням обмежень за робочою швидкістю (ряд 2). Кілійський район. Рис. 4.10 – Прогностний щомісячний виробок енергії для ВЕУ з діаметром вітроколеса = 6,2 м за щоденними показниками швидкості вітру (ряд 1) та з урахуванням обмежень за робочою швидкістю (ряд 2). Татарбунарський район. Таблиця 4.2 Середньомісячні значення швидкостів вітру (м/с) по регіонам. Таблиця 4.3. Прогнозна оцінка виробку енергії для вітродвигуна з діаметром вітроколеса = 6,2м за різними методиками її розрахунку. Рис. 4.10 – Прогностний щомісячний виробок енергії для ВЕУ з діаметром вітроколеса = 6,2 м за таблицею 4.3. (А – ряд 1; В – ряд2; С – ряд 3). Одеса (аеропорт). Рис. 4.11 – Прогностний щомісячний виробок енергії для ВЕУ з діаметром вітроколеса = 6,2 м за таблицею 4.3. (А – ряд 1; В – ряд2; С – ряд 3). Кілійський район. Рис. 4.12 – Прогностний щомісячний виробок енергії для ВЕУ з діаметром вітроколеса = 6,2 м за таблицею 4.3. (А – ряд 1; В – ряд2; С – ряд 3). Татарбунарський район. Таблиця 4.4. Сезонна оцінка виробку енергії для вітродвигуна з діаметром вітроколес 6,2м. Рис. 4.12 – Прогностний виробок енергії за метеоданими про швидкість вітру для Одеси (район аеропорту) – 1; Кілійського району – 2; Татарбунарського району – 3 за сезонами (зима – ряд 1; весна – ряд 2; літо – ряд 3; осінь – ряд 4). Таблиця 5.1. Частка найбільших країн в світових запасах викопного палива. Таблиця 5.2. Середньодобова швидкість вітру м. Одеса (район аеропорту). Таблиця 5.3.

Середньодобова швидкість вітру Одеська область, Кілійський район.
Таблиця 5.4. Середньодобова швидкість вітру Одеська область,
Татарбунарський район.

Дата видачі завдання 29.10.2018 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломного проекту (магістерської роботи)	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання	
			За 4-х бальною шкалою	%
1	Огляд новітніх літературних джерел за темою дипломного проекту	31 жовтня 2018		
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	29.10.2018		
3	Рубіжна атестація	19-24.11.2018		
4	Здача на кафедрі	24.12.2018		
5	Перевірка на плагіат	13-14.12.2018		
6	Рецензування	19-20.12.2018		
7	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)	Грудень		

Студент _____ Фомічева М.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ д.ф-м.н., проф. Герасимов О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

«Модельна оцінка енергоємності вітродвигунів в концепції альтернативних джерел енергії»

Актуальність теми. У світовому енергетичному секторі стійко відслідковується перехід від використання виключно викопного палива до пошуку та підвищення енергоефективності розвитку альтернативних джерел енергії й включенню їх до енергетичних планів та стратегій.

Важливою умовою економічного розвитку суспільства є раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів, що потребує розвитку інноваційних технологій в сфері альтернативних джерел енергії і впровадженню їх до систем електричної генерації. Організація раціонального енергоспоживання, з достатнім технологічним рівнем задоволення потреб споживачів усіма видами енергії, з мінімальним негативним впливом на клімат – найактуальніше питання сучасного суспільства.

Мета дослідження – модельна оцінка вітроенергетичного потенціалу Одеської області.

Об’єкт дослідження. Вітровий режим та вітроенергетичний потенціал Одеської області.

Предмет дослідження Параметризація теоретичних законів розподілу швидкостей вітру. Вітроенергетичний потенціал Одеської області, просторові закономірності його розподілу.

Задачі дослідження:

- вивчення режиму швидкості вітру в Одеській області;
- наукове обґрунтування вибору теоретичного закону розподілу швидкостей вітру;
- розробка принципів законів розподілу швидкості вітру в часі і по території, параметризація законів розподілу;
- оцінка вітроенергетичних ресурсів Одеської області.

Робота містить:

Сторінок – 69

Таблиць – 17

Рисунків – 20

Літературних посилань – 29

Додатків – 4

Ключові слова: альтернативні джерела енергії; вітроенергетика; вітрогенераторна установка; оптимальна корисна потужність; прогнозний виробок енергії.

SUMMARY

"A model estimation of power- capacity of wind engines in conception of alternative energy sources"

Actuality of theme. In a world power sector a transition is proof watched from the use exceptionally of fossil fuel to the search and increase of energy efficiency of development of alternative energy sources and to including of them to the power plans and strategies.

The important condition of economic development of society is the rational use of fuel and energy resources, that needs to development of innovative technologies in the sphere of alternative energy sources and introduction of them to the systems of electric generation.

Organization of rational energy consumption, with the sufficient technological level of satisfaction of necessities of consumers by all types of energy, with minimum negative influence on a climate - pressing question of modern society.

Object of study is a model estimation of wind's power potential of the Odessa area.

Subject of study. The Odesa area has The wind mode and wind's power potential of the Odessa area.

Research objectives:

- a study of the mode of speed of wind in the Odessa area;
- a scientific ground of choice of theoretical law of distribution of speeds of wind;
- development of principles of laws of distribution of speed of wind in time and for territories, parameterization of laws of distribution;
- an estimation of wind's power resources of the Odessa area.

The work contains:

Pages – 69

Tables – 17

Figures – 20

Literature references – 29

Apps – 4

Key words: alternative energy sources; wind energy; wind generator setting; optimal useful power; prognosis making of energy.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РЕСУРСИ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ В СВІТІ	15
1.1 Глобальні тенденції міжнародного та національного енергетичного сектору	17
1.2 Ресурси традиційної енергетики	17
1.3 Ресурси альтернативних джерел енергії	22
1.4 Перспективи розвитку вітроенергетики в Україні	23
2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ.....	25
2.1 Природа походження та характеристики вітру.....	25
2.2 Технологічні особливості використання вітропристроїв у якості джерела енергопостачання	34
3 ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИХ ДАНИХ	36
3.1 Основні параметри вітроенергетичних пристроїв.....	36
3.2 Математична модель руху вітроколеса	40
4 ХАРАКТЕРИСТИКА ВІТРОВОГО РЕЖИМУ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	46
4.1. Характеристика вітрового режиму Одеської області.....	46
4.2. Прогнозна оцінка використання вітрової енергії Одеської області.....	51
ВИСНОВОК.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	62
ДОДАТОК А	65
ДОДАТОК Б	67
ДОДАТОК В	68
ДОДАТОК Г.....	69

ВСТУП

Велика частина глобальних проблем сучасної світової економіки пов'язана з енергетикою.

За прогнозуванням Міжнародного Енергетичного Агентства (МЕА) до 2040 року глобальний попит на енергію підвищиться на 37%, тому раціональне використання енергетичних ресурсів, поповнення його новітніми альтернативними джерелами набуває наочної актуальності [1].

У світовому енергетичному секторі вже стійко відслідковується перехід від використання виключно викопного палива до пошуку та підвищення енергоефективності розвитку альтернативних джерел енергії й включенню їх до енергетичних планів та стратегій особливо високо розвинутих країн.

Обмеженість традиційних енергоресурсів, та тенденція до підвищення використання викопних ресурсів, зміна клімату, зумовлює до ефективного використання традиційних ресурсів, та активнішому розвитку та пошуку більш екологічних, ефективніших джерел енергії.

Важливою умовою економічного розвитку суспільства є раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів. Для досягнення цієї мети необхідний розвиток інноваційних технологій в сфері альтернативних джерел енергії і впровадженню їх до систем електричної генерації.

Організація раціонального енергоспоживання, з достатнім побутовим та технологічним рівнем задоволення потреб споживачів усіма видами енергії, з мінімальним негативним впливом на клімат – найактуальніше питання сучасного суспільства.

Розвиток інноваційних технологій в сфері енергетики, збільшення частки енергії виробленої за рахунок відновлювальних джерел енергії, зменшення частки атомної енергії і поступова відмова від неї є одними із пріоритетних задач в ЕС.

Директивами ЕС було встановлено, що доля альтернативних джерел енергії в загальному енергобалансі Європи повинна досягнути 20% до 2020 року, а до 2040 року збільшитись до 40%.

У більшості держав, в енергобалансі переважає енергія, що вироблена на викопних енергоресурсах, незважаючи на світову тенденцію до впровадження і більшого використання альтернативних джерел енергії.

В Данії в структурі енергобалансу вітрова енергія складає 40%, а Норвегія практично повністю забезпечує себе енергією від ГЕС незважаючи на те що є найбільшим постачальником природного газу до Європи.

Декларація Ріо-де-Жанейро 1992 року, яка на сьогодні підписана 178 країнами і Україною в тому числі, підписання Паризької Угоди від 22 квітня 2016 року, визначили сталий розвиток як пріоритетний напрямок розвитку держави, що передбачає зменшення впливу на навколишнє середовище і зменшенню викидів CO₂ [2],[3],[4].

В Україні досить високий рівень споживання енергії, це зумовлює необхідне підвищення енергоефективності, що є основним напрямком енергетичної політики держави.

Україна починаючи з 2014 року вперше опинилась в залежності від імпорту не тільки нафтопродуктів і природного газу, а також вугілля та періодичний імпорт електричної енергії. Основне навантаження на цей період припало на атомні електростанції.

Реальний енергобаланс, інвестиційні вклади, зріст ВВП 2005-2012 років супроводжений високою енергоемністю валового продукту, все це не було враховано.

Енергостратегія 2012 року передбачає, що до 2030 споживання нафти стане вдвічі більше, але видобуток залишається на тому ж рівні, збільшення планувалося за рахунок імпорту. Планувалось збільшити частку атомної енергії завдяки створенню власного циклу виробництва ядерного палива, чого так і не сталося. Планувалось розвивати вугільну генерацію за рахунок власного видобутку, але вже у 2014 він зменшився на 20 % і надалі має

тенденцію к зменшенню. Зростання газовидобутку мало б забезпечити освоєння шельфу Чорного моря, це зараз також вже неможливо.

В таких умовах необхідно враховувати нестачу власних енергоресурсів, зміни в інфраструктурі, політиці.

Розвиток теплової, атомної, гідроенергетики, повинні доповнюватися розвитком інноваційних енергетичних технологій, та реальному включенню їх до енергобалансу [5], [6].

У роботі ми розглянемо основні принципи побудови та планування сектору енергобалансу, пов'язаного із використанням вітрової енергії як у розвинутих країнах світу так і на Україні і зокрема в кліматичних умовах одеського регіону.

Законодавство України про альтернативні джерела енергії базується на Конституції України і складається з Закону «Про альтернативні джерела енергії». Цей Закон визначає правові, економічні, екологічні та організаційні засади використання альтернативних джерел енергії та сприяння розширенню їх використання у паливно-енергетичному комплексі держави, з метою виробництва, постачання, транспортування, передачі та споживання енергії [7].

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РЕСУРСИ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ В СВІТІ

1.1 Глобальні тенденції міжнародного та національного енергетичного сектору

Розвиток світової економіки в ХХ ст. було засновано на стрімкому зростанні споживання органічних енергоресурсів. (таблиця 1.1) [8].

Таблиця 1.1

Структура світового споживання енергії

Рік	Нафта, %	Газ, %	Вугілля, %	ГЕС, %	АЕС, %	Інші, %	Всього (ТВт)
1973	24,8	12,1	38,3	20,9	3,3	0,6	6 131
2014	4,3	21,6	40,8	16,4	10,6	6,3	23 816

У більшості держав, в енергобалансі переважає енергія, що вироблена на викопних енергоресурсах, незважаючи на світову тенденцію до впровадження і більшого використання альтернативних джерел енергії.

Для власних потреб Україна використовує такі джерела енергії, як атомна енергія, гідроенергія, вугілля, нафта, природний газ. Традиційно в енергобалансі переважають викопні ресурси, доля яких у енергобалансі України перевищує 60 %.

Україна дуже відстала від багатьох розвинених країн і країн, що розвиваються по технологіям використання альтернативних джерел енергії і їх частки в енергобалансі. На сьогодні доля відновлювальних джерел енергії в загальному енергобалансі України складає лише 4 % (таблиця 1.2) Структура загального постачання первинної енергії України) [6].

Таблиця 1.2

Структура загального постачання первинної енергії України

Джерела первинного енергопостачання	2015 рік(факт)		2035 рік (прогноз)	
	млн.т.н.е.	%	млн. т.н.е.	%
Вугілля	27,3	30,4	12	12,5
Природний газ	26,1	28,9	29	30,2
Нафтопродукти	10,5	11,6	7	7,3
Атомна енергія	23,0	25,5	24	25,0
Біомаса, біопаливо, відходи	2,1	2,3	11	11,5
Сонячна та вітрова енергії	0,1	0,1	10	10,4
ГЕС	0,5	0,5	1	1,0
Термальна енергія доквілля та скидні ресурси техногенного походження	0,5	0,6	2	2,1
Всього	90,1	100	96	100

Згідно цих даних можна визначити, що по фактичним даним Енергетичної стратегії України, відновлювальні джерела енергії складають лише 4 відсотки від загального постачання енергії, але за прогнозуванням до 2035 року доля відновлювальних джерел енергії повинна збільшитись до 25%. [6],[9].

У 2017 році виробництво електроенергії альтернативними джерелами (ВЕС, СЕС, біомаса) становила 1743,9 млн. кВт/год. (таблиця 1.3).

Відносна доля енергоресурсів складає: вугілля – 30%, газ – 28.9 %, АЕС – 25.5%, сира нафта і нафтопродукти – 11.6%, альтернативні джерела енергії – 4% (відповідні порівняльні дані наведені у таблиці 1.3.) [6].

Таблиця 1.3

Структура фактичного виробництва електроенергії України, млн.кВт/рік

Джерела енергії	2017	2016
АЕС	77 871,0	72 741,2
ТЕС, ТЕЦ	50 287,3	55 083,6
ГЕС, ГАЕС	9 328,4	8 452,8
Альтернативні джерела	1 743,9	1 433,2
Блок-станції та інші	1 372,3	1 387,5
Всього	140 602,9	139 098,3

Так скажемо у 2017 році виробництво електроенергії альтернативними джерелами (ВЕС, СЕС, біомаса) становила 1743,9 млн. кВт/рік.

Можемо спостерігати стійкий ріст сектору з альтернативних джерел що й привело до його урахування в структурі державного енергобалансу України і, як наслідок, підвищенню екологічної безпеки всієї енергетичної галузі країни.

1.2 Ресурси традиційної енергетики

Енергетичні ресурси, їх кількість, з розвитком науки і сучасних технологій постійно доповнюються і змінюються. У 2014 році доведені світові запаси сирої нафти оцінювались у 239,8 млрд. тонн, вугілля – 891,5млн. тон, газ – 201,14 трлн.м³ (дані наведені на рис 1.2.1 – 1.2.3 та у додатку А) [10].

**Частка найбільших країн в
доведених загальносвітових запасах
нафти (млрд.тон)**

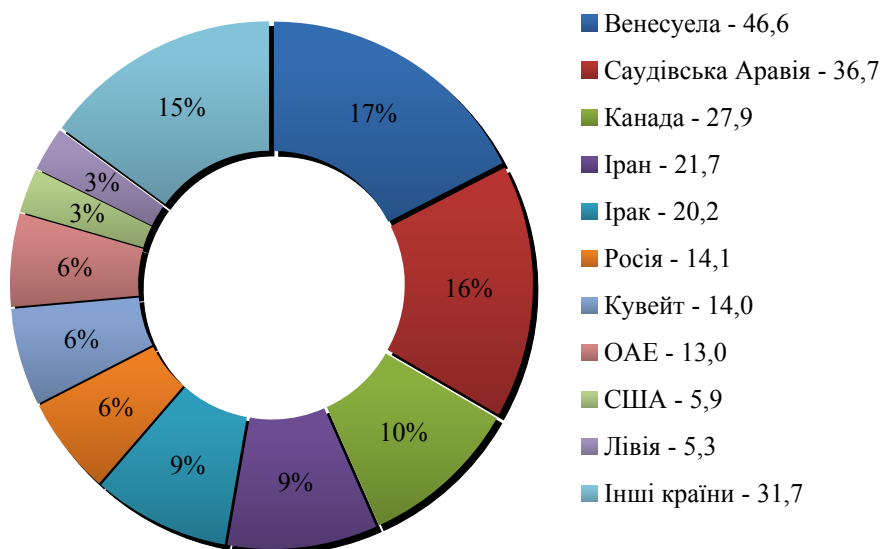


Рис. 1.2.1 – Частка найбільших країн в загальносвітових запасах нафти

За даними "British Petroleum", доведені світові запаси нафти в 2015 р знизилися на 2,4 млрд барелів, у порівнянні з 2014 роком, і склали 1697,6 млрд барелів.

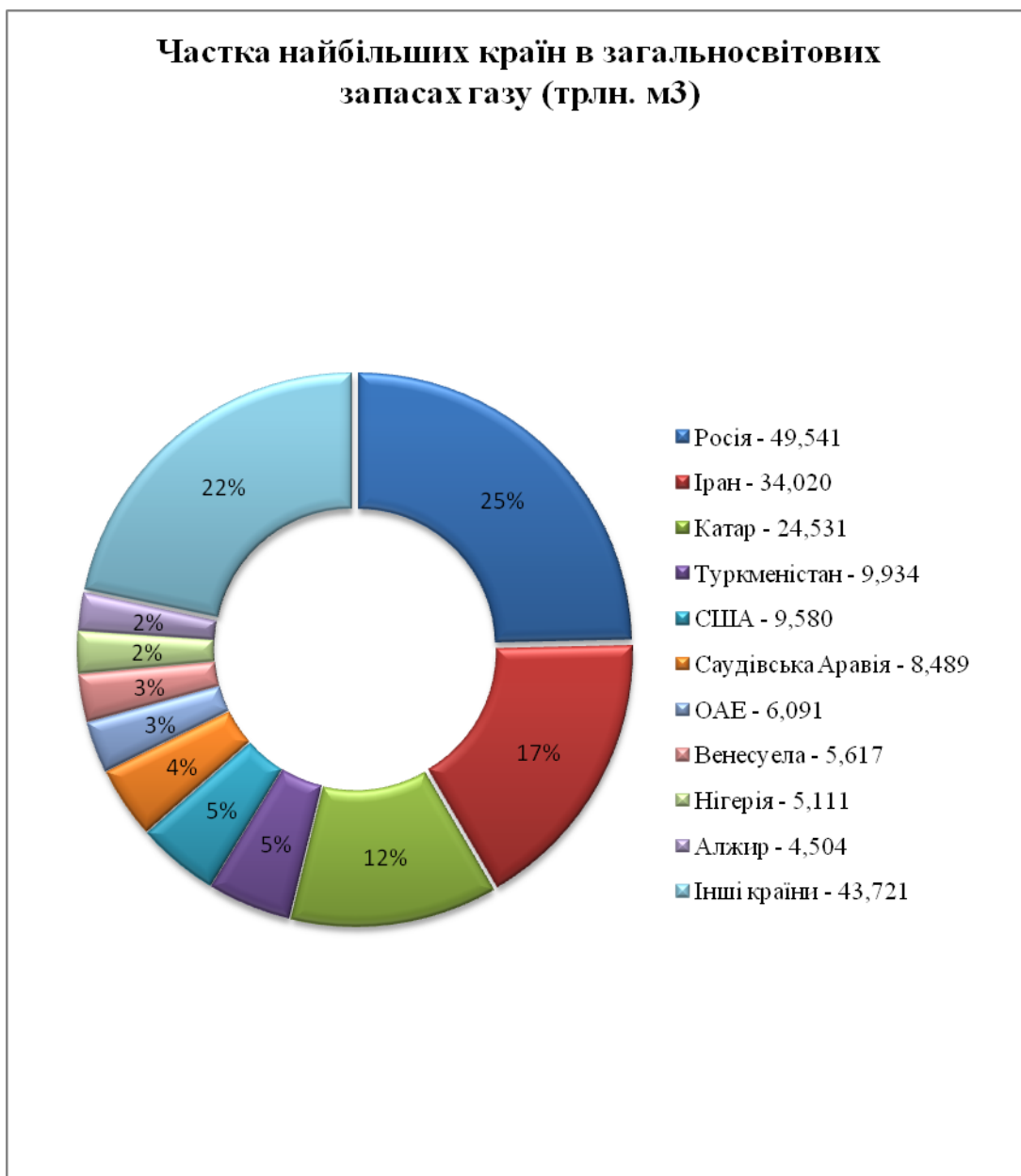


Рис. 1.2.2 – Частка найбільших країн в загальносвітових запасах газу

Даний список країн з доведеними запасами вугілля заснований на оцінках ВР в опублікованому Статистичному огляді світової енергетики 2014 (Statistical Review of World Energy 2014 року) станом на 2013 рік в млн. тонн [11].

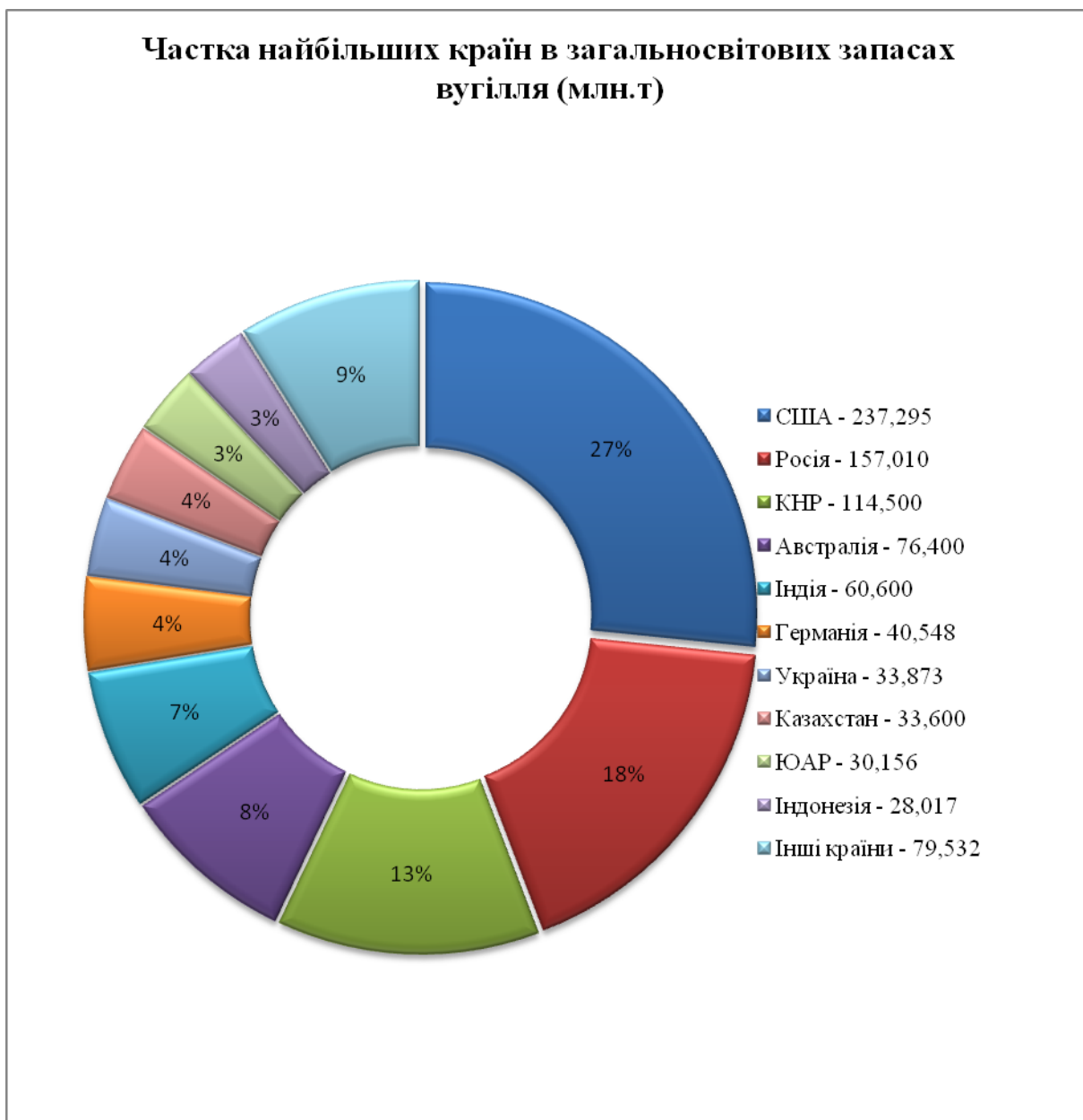


Рис. 1.2.3 – Частка найбільших країн в загальносвітових запасах вугілля

До 1986 року одним з найбільш перспективних джерел енергії була ядерна енергія. Ураховуючи особливості використання ізотопу ^{238}U на електростанціях запасів урану досить на декілька тисячоліть [11].

У таблиці 1.4 наведені дані відносно розподілу світових запасів урану на підставі оцінок Всесвітньої ядерної асоціації на 2015 рік [12].

Таблиця 1.4

Світові запаси урану

Країна	Тонн(U)	%
Австралія	1664100	29
Казахстан	745300	13
Канада	509800	9
Росія	507800	9
ЮАР	322400	6
Нігер	291500	5
Бразилія	276800	5
КНР	267000	5
Намібія	272500	5
Монголія	141500	2
Узбекістан	131100	2
Україна	115800	2
США	62900	1
Інші країни	409900	7
Всього	5718400	100

Як бачимо, на долю України приходить зовсім не мала частка стратегічного світового запасу урану, що вимагає також відповідної стратегії і планування його використання в національному енергетичному секторі, як безумовно альтернативного до екологічно небезпечних джерел, які використовують вугілля та нафтопродукти.

Всі розглянуті джерела енергії є копними паливами, хоча їх запаси і обмежені, вони зможуть забезпечити людство тепловою і електричною

енергією впродовж сотень років , але фактичне їх використання приводить до незворотного виснаження ресурсів і погрожує екологічно. катастрофою. Ці фактори приводять до необхідності розвитку відновлюваної енергетики.

1.3 Ресурси альтернативних джерел енергії

Альтернативні джерела енергії – комплекс обладнання для перетворення енергії відновлюваних чи майже невичерпних природних ресурсів в механічну чи електричну енергію.

До них належать енергія: сонця, вітру, тепла Землі, рік, морів, океанів, біомаси, а також нові альтернативні екологічно чисті види палива.

Вважаючи доступність ресурсів, технічну здійсненність, потенціал відновлюваних джерел енергії дуже великий (таблиця 1.5).

Таблиця 1.5

Ресурси основних джерел відновлюваної енергії

Ресурси (млрд. т. у. т/рік)		
Вид енергії	Потенційні	Технічні
Енергія сонця	72000	68000
Енергія вітру	56	22
Геотермальна енергія	36	07
Енергія приливів	29	09
Продукція біосфери	54	13

Технічні ресурси – частина потенційних ресурсів, які можуть бути ефективно використані з використанням відомих технологій, враховуючи соціальні і екологічні фактори.

Найдетальніші дослідження з оцінки ресурсів вітрової енергетики було проведено в Європі. Результати цих досліджень показали, що вітрові ресурси великі і практично рівномірно розподілені по країнам і всім регіонам.

Глобальні дослідження вказували на менший потенціал вітрових ресурсів, ніж аналізи, що були зроблені безпосередньо для окремих регіонів [13]. Світовий потенціал вітрової енергетики за рік здатен виробляти до 53 000 ТВт - год. на рік, це майже вдвічі більше світового споживання енергії у 2015 році, яке склало 23 816 ТВт - год. на рік.[14],[15].

1.4 Перспективи розвитку вітроенергетики в Україні

В Україні досить високий рівень споживання енергії, це зумовлює необхідне підвищення енергоефективності, що є основним напрямком енергетичної політики держави.

Раціональний підхід до політики у сфері енергоефективності здатен внести значний вклад у досягнення політичних та економічних цілей на національному рівні.

В Україні політика у сфері енергетики викладена у законодавстві Енергостратегія України до 2035 року, що передбачає досягнення основних цілей енергетичної політики: підвищення енергетичної безпеки, підвищення економічного розвитку і конкурентоспроможності держави та зниження негативного впливу на навколишнє середовище унаслідок використання енергоресурсів.

Формально підтримкою такого розвитку є затверджена Енергетична стратегія України. Енергетична стратегія України(ЕСУ) орієнтована на вирішення проблем енергетичної безпеки, екологічної і економічної безпеки.

Законодавчі шляхи для розвитку виробітки альтернативної енергії: економічні заходи , які передбачаються у законодавстві про енергозбереження та охорону навколишнього середовища, створення сприятливих умов для спорудження об'єктів альтернативної енергетики[5]/

У 2008 році до закону «Про електроенергетику» було внесено зміни, що стосуються стимулювання вироблення енергії з альтернативних джерел енергії. [16],[17] .

Національною комісією регулювання електроенергетики України було затверджено «Зелений» тариф на електроенергію, що вироблена суб'єктами господарювання на об'єктах електроенергетики, що використовують альтернативні джерела енергії, і така енергія повинна купуватися Енергоринком за вищим тарифом, ніж електроенергія з традиційних джерел. [18], [19]

Згідно світового досвіду найефективніше енергія вітру використовується в морських і прибережних районах, а також в гірських та пересічених місцевостях.

Середньорічна швидкість вітру в приземному шарі на території України для вітроенергетики досить низька – 4,3 м/с, але територія України, має також і сприятливі географічні характеристики і декілька перспективних зон для вітроенергетики.

Найбільший вітровий потенціал мають території прилеглі до Чорного і Азовського моря, Карпатський регіон.

Таблиця 1.6

Показники розвитку використання альтернативних джерел енергії в Україні

Вид альтернативної відновлювальної енергії	Рівень розвитку (млн.у.п. тон/рік)	
	2020 р.	2030 р.
Вітроенергетика	0.5	0.7
Сонячна енергетика	0.3	1.1
Біоенергетика	6.3	9.2
Мала гідроенергетика	0.8	1.1
Геотермальна енергетика	0.2	0.7

Отже, у перспективі передбачається суттєве зростання використання ресурсів вітрової та, сонячної енергії, біоенергетики та інших альтернативних відновлювальних джерел енергії в Україні.

2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ

2.1 Природа походження та характеристики вітру

За утворення вітру відповідає нерівномірне нагрівання поверхні Землі сонячним випромінюванням, поверхня не є однорідною, тому процес нагрівання відрізняється в залежності від поверхні. Поверхня води, землі, степові масиви, ліси, низини, болотні місцевості на тій самій широті нагріваються по різному.

Внаслідок поглинання частини енергії і витрат на випарювання води над водною поверхнею впродовж дня повітря є досить холодним. Менше поглинається сонячне випромінювання над сушею, повітря нагрівається ліпше, розширюється, стає більш легким і піднімається вгору. Його заміняють більш щільні потоки холодного повітря, які знаходяться над водою - бризи. Напрямок бризів змінюється впродовж ночі, бо суша охолоджується швидше і температура повітря зменшується.

Потоки повітря регулярно змішуються і переміщуються паралельно земній поверхні та у вертикальному напрямку. Процес переміщення повітряних потоків має складний характер і залежить від низки причин.

Річні зміни температур в берегових районах призводять до циркуляції більш великого масштабу – мусонів, що діляться на морські та материкові, які зазвичай характеризуються великими швидкостями змінюючи свій напрям впродовж ночі.

Висота над поверхнею Землі також впливає на зміну швидкості, наприклад, на висоті 500м швидкість вітру вдвічі більша за швидкість у поверхні Землі.

В залежності від географічного розташування зони та висоти сила і напрям вітру змінюються по різному, поблизу до поверхні Землі на екваторі існує зона з малими та змінними за напрямом швидкостями вітру, а у верхніх шарах – потоки, великі за швидкістю.

На висоті від 1 до 4 км, в зоні між 30° північної і південної широти утворюються досить рівномірні повітряні течії. У північній півкулі ближче до поверхні Землі їх середня швидкість становить 7-9 м/с.

На циркуляцію повітряних мас також впливає обертовий рух Землі. Сили інерції, що діють поблизу поверхні Землі на холодне повітря, яке рухається до екватору, закручують його в західному напрямку. Повітря, яке рухається до полюсу, в верхніх шарах атмосфери має тенденцію до закручення на схід. Така циркуляція поблизу зони заниженого тиску в північній півкулі рухається проти руху годинника, а у південному – у напрямку руху.

Через те, що вісь обертання Землі нахилена під кутом $23,5^\circ$ до площини її обертання відносно Сонця, відбуваються сезонні зміни теплової енергії, величина яких залежить від сили і напрямку вітру над певною зоною. Таким чином, безперервне нахождення теплової енергії Сонця, трансформується в кінетичну енергію вітрових потоків. [19].

Оскільки вітер векторна величина, він має два основні характерні параметра: швидкість і напрям переміщення. Швидкість вітру вимірюється у метрах в секунду (м/с), напрям – у градусах або румбах, які відраховуються від напрямку (зазвичай північного) прийнятого за початок відліку [18],[19].

Силу вітру пов'язують з його швидкістю і визначають за умовною шкалою Бофорта де оцінюється сила вітру в балах по хвилюванню моря та впливу вітру на наземні предмети (таблиця 2.1) [20].

Таблиця 2.1

Сила вітру за шкалою Бофорта та вплив на умови роботи ВЕУ

Бали Бофорта	Швидкість вітру, м/с	Характеристика вітру	Вплив вітру на ВЕУ	Умови роботи ВЕУ в зазначеному діапазоні швидкості
0	0,0-0,4	Штиль	Ні	Відсутні
1	0,4-1,8	Тихий	Ні	Відсутні
2	1,8-3,6	Легкий	Обертання значної кількості вітроустановок	Стартова швидкість, мінімальна потужність

3	3,6-5,8	Слабкий	Старт всіх вітроустановок	Сприятливі умови багато лопатевих водопідіймальних установок; мінімальна потужність великих вітроустановок
4	5,8-8,5	Помірний	Потужність вітроустановки досягає 50 % номінальної	Хороші
5	8,5-11	Свіжий	Потужність вітроустановки досягає 80 % номінальної	Хороші
6	11-14	Сильний	Потужність вітроустановки номінальної	Дуже хороші
7	14-17	Міцний	Номінальна або максимальна потужність	Цілком сприятливі
8	17-21	Дуже міцний	Максимальна потужність, відключення деяких видів вітроустановок	Допустимі
9	21-25	Шторм	Масове відключення вітроустановок	Гранично допустимі
10	25-29	Сильний шторм	Розрахункові навантаження	Неприпустимі

Миттєву швидкості вітру (відношення шляху, пройденого вітром за секунди, а іноді частки секунд, до цього проміжку часу) вимірюють за допомогою анемометра. В залежності від інтервалу часу усереднення швидкості обирають більш чи менш інерційні вітроприйомні пристрої анемометра.

При вимірюванні швидкості анемометром похибка вимірювання швидкості складає 7%, тому для отримання точних вимірювань при випробуваннях в аеродинамічній трубі вітродвигунів і їх моделей, використовують більш складні прилади.

Миттєва швидкість вітру – фактор, що визначає динамічний вплив повітряного потоку на вітродвигун. Динамічні характеристики потоку та його пориви впливають на роботу автоматичних систем регулювання орієнтації.

Кількість виробленої вітроустановкою енергії, насамперед залежить від усередненої швидкості вітру за певний проміжок часу по всьому перерізу потоку, який дорівнює площі поверхні, яку обмахує вітроколесо.

Для визначення середньої швидкості вітру $V_{\text{сер}}$ за обраний інтервал часу $T=t_2-t_1$ використовується відношення суми вимірних значень миттєвої швидкості v до кількості вимірювань n :

$$V_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (2.1)$$

Для того щоб знайти середньодобову швидкість вітру $V_{\text{доб}}$ використовується розподіл середньо-годинних швидкостей $V_{\text{год}}$ на 24 суми, а середньорічну швидкість вітру $V_{\text{рік}}$ можна знайти діленням суми всіх середньодобових швидкостей $V_{\text{доб}}$ за рік на кількість днів у році (365 чи 366 у високосний рік).

В загальному випадку дані по середнім значенням швидкості вітру визначають згідно матеріалів метеостанцій, рідше за допомогою анеморозвідок.

Терміни метеорологічних спостережень швидкості вітру відрізняються в залежності від категорії метеостанції, її класу, особливостей та вимог об'єктів, що оточують її (наприклад в районах аеропорту).

Найчастіше на метеостанціях всього світу вимірювання проводять з інтервалом в 3 години, рідше 4 чи 6 годин, існують станції, які ведуть безперервний моніторинг і запис швидкостей вітру.

Вітер зазвичай часто змінює свій напрям, швидкість. Ці параметри можуть змінюватись дуже швидко. На рис. 2.1 представлений типовий запис швидкості вітру.

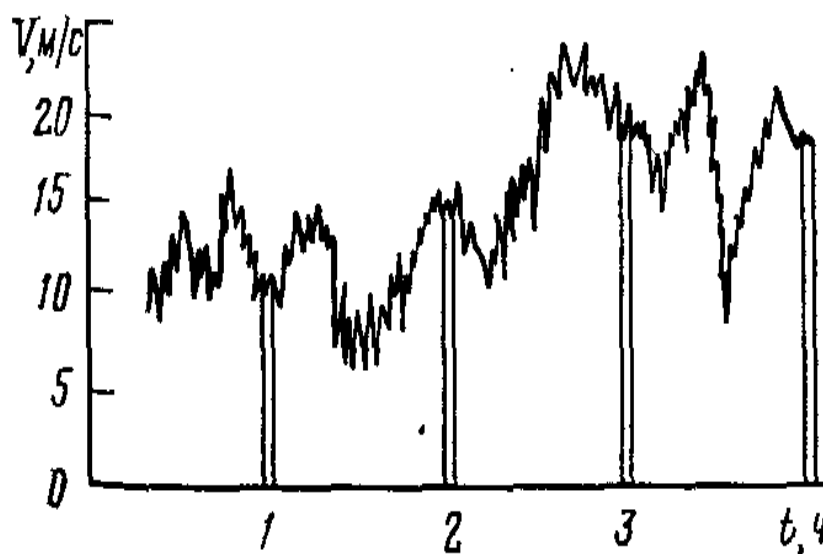


Рис 2.1 – Типовий запис швидкості вітру

Розглядають добовий, місячний та сезонний хід швидкостей, оскільки пора року, місяць, час доби, впливають на зміну середніх швидкостей, визначаючи тенденцію їх змін і макроструктуру повітряного потоку.

Важливими режимними характеристиками вітру є дані про інтенсивність потоку, граничні швидкості вітру, мікроструктура потоку в різних точках його поперечного перерізу і поздовжнього вектора за короткі проміжки часу, які використовуються для розрахунків на міцність і довговічність вітроустановок.

Загальний характер формування структури вітру, особливості місцевості впливають на утворення пульсації швидкості (енергія повітряного потоку). Одною з основних причин виходу з ладу вітроустановки, є не загальний рівень швидкості вітру, на це впливає його динаміка і структура швидкості за короткі проміжки часу: збільшення швидкості потоку, тривалість поривів, збіг поривів в різних точках поверхні, що обмахується вітроколесом.

Поривчастість потоку $K_{пор}$ - відношення максимально замірної швидкості V_{max} до середньої $V_{сер}$ за обраний інтервал часу (в загальному випадку не більше 2 хв.):

$$K_{пор} = \frac{V_{max}}{V_{сер}} \quad (2.2)$$

Поривчастість є функцією факторів і зональних умов вітру, варіюючись в значних межах. Зазвичай чим більше швидкість, тим менше $K_{пор}$, хоча абсолютні відхилення швидкості при пориві від середнього значення зростають.

У різних ландшафтних умовах вітри різних румбів мають неоднакову поривчастість і швидкість. Повторюваність визначають по розі вітрів – графіку, що показує, який відсоток загальної пори року вітер має той чи інший напрямок[13].

На рис.2.2 у якості прикладу представлена роза вітрів, побудована за даними гідрометеорологічної служби України про вітровий режим Одеської області у зимовий період.

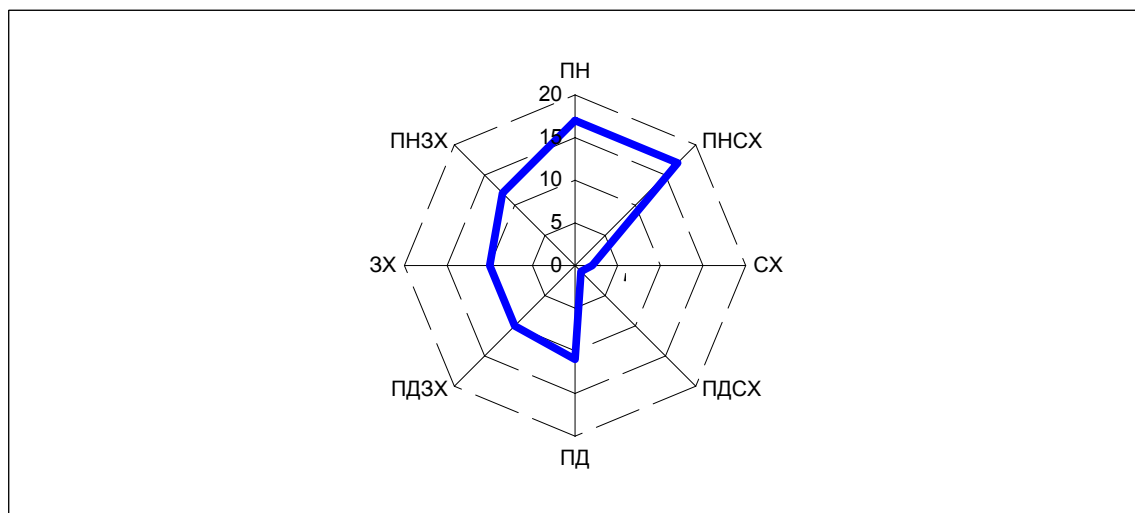


Рис.2.2 – Вітровий режим Одеської області (зимовий період)

При проведенні вимірювання, в залежності від сезону та часу доби, повторюваність швидкостей вітру різних напрямів, змінюється.

Для надійного, довгострокового використання вітроенергетичної установки мають значення граничних швидкостей вітру в зоні. Вони визначають прийняті розрахункові нормативи при проектуванні установки на міцність, чи для аеродинамічних характеристики лопатей.

Вертикальний профіль вітру (зміни його швидкості по висоті в приземному шарі) є також важливою характеристикою. Вплив земної поверхні на швидкість і напрям вітру зі збільшенням висоти має тенденцію зменшуватись. Тому зазвичай швидкість вітрового потоку зростає, а поривчастість і прискорення потоку знижується.

За результатами досліджень розподілу швидкості вітру за висотою були отримані формули, які описують цю залежність. Найпростішою з них є формула, яка описує залежність для висоти від 5 м і вище у вигляді:

$$V = V_{\phi} \left(\frac{h}{h_1} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.3)$$

де v_{ϕ} – швидкість вітру на висоті розташування флюгера; h_{ϕ} – висота розташування флюгера; v – швидкість, обумовлена для висоти h .

Недоліком цієї формули є те, що вона не враховує впливу підстильної поверхні, а також турбулентності потоку поблизу поверхні землі. Якщо врахувати вплив цих факторів і, допустити, що на деякій висоті h_0 швидкість вітру дорівнює нулю, можна отримати наступну формулу:

$$V = V_1 \frac{\ln \frac{h}{h_0}}{\ln \frac{h_1}{h_0}} \quad (2.4)$$

де v – швидкість вітру на висоті h ; v_l – відома швидкість вітру на висоті h_l ; h_0 – висота, на якій швидкість вітру дорівнює 0. Зазвичай h_0 розглядається як міра шорсткості підстильної поверхні; її величина дорівнює для сніжного покриву 0,5 см, для поверхні з низькою травою – 3,2 см, з більш високими рослинами – 7 см; , максимальне значення $h_0 = 20$ см.

Підстильна поверхня та рельєф місцевості впливають на швидкість вітру. Встановлено, що на висоті 10 - 20 м у рівнинному степу швидкість вітру змінюється в залежності від рельєфу місцевості. Швидкість вітру над вершинами відкрито розташованих хребтів з правильними, добре обтічними схилами без різкої зміни рельєфу, збільшується в 2 рази. Якщо височина не представляє правильного схилу або рельєф спотворений обривом, яром, то швидкості вітру зазвичай малі. Пагорби з крутими, обривистими, кам'янистими схилами обумовлюють досить низькі швидкості вітру.

Рельєф місцевості створює місцеві вітри. Якщо повітряний потік зустрічає окрему вершину, то він за деяких умов може обійти її, прямуючи по долині. У разі руху вітру між двома підвищеннями його швидкість значно зростає. У долині між підвищеннями утворюється рід коридору, в який з силою спрямовується повітряний потік. Таким чином, створюються місцеві вітри, що досягають іноді великої сили при відносно малих швидкостях вітру в сусідніх відкритих ділянках.

Перешкоди на земній поверхні впливають на швидкість зростання і напрямок повітряних течій. Частина повітряного потоку при обтіканні перешкод з прямолінійного руху переходить в хаотичний, вихровий.

Повітряні струмені, безпосередньо оточуючі краї перешкод, зриваються з них і закручуються в вихори, які несуться в напрямку повітряного потоку. На місці віднесених з'являються нові, утворюючись на гранях перешкод, далеко за ним поступово загасає і зовсім припиняється на відстані приблизно п'ятнадцяти кратної висоти перешкоди. Внаслідок цього швидкість повітряного потоку при проходженні його над дахом будинку

значно підвищується, а позаду перешкоди убуває не тільки на рівні самої перешкоди, але навіть на декілька більшій висоті.

Повторюваністю вітру називають суму годин, протягом яких в будь-якому певному пункті в різний час був вітер з однаковою швидкістю. Повторюваність є основною величиною, що характеризує вітер з енергетичної сторони. Зважаючи на непостійність вітру, вивчення його повторюваності представляє дуже складну задачу.

Російський дослідник М. М. Поморцев вперше встановив залежність, яка дає оцінку повторюваності вітрів, близької до дійсної, в районах з середньорічними швидкостями, що не перевищують 5 м/сек. Він прийшов до висновку про показовий характер цієї залежності, що приводиться до виду нормальної кривої ймовірності Гауса:

$$A = \frac{\sqrt{B}}{\sqrt{\pi}} = \frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - V_0)^2}} \quad (2.5)$$

$$B = \frac{n-1}{\sum_{i=1}^n (V_i - V_0)^2}$$

де параметри А і В можливо визначити або способом найменших квадратів за фактичними спостереженнями для цілих значень V_0 , або за теоретичною залежністю:

$$\tau = \frac{dt}{dV} = A e^{-B(V-V_0)^2} \quad (2.6)$$

де v – швидкість вітру; v_0 – середня швидкість вітру протягом обраного періоду; n – число доданків.

2.2. Технологічні особливості використання вітропристроїв у якості джерела енергопостачання

Вітроенергетичні пристрої (ВЕС) – комплекс обладнання і споруд для вироблення електроенергії, що використовує енергію вітрового потоку і перетворює в механічну енергію обертання вітроколеса.

П'ять традиційних країн вітроенергетики – Китай, США, Німеччина, Іспанія та Індія – разом представляють 72% світової потужності вітроенергетики. Що стосується нових доданих потужностей, частка Великої п'ятірки збільшилася з 57% до 62%.

На кінець 2015 року світовий потенціал виробництва енергії вітру склав 435ГВт – 7% від загального світового виробництва енергії. (таблиця 2.1)

Таблиця 2.1

Максимальна потужність вітрової енергії

Країна	Енергія (МВт)
Китай	148,000
США	74,347
Німеччина	45,192
Індія	24,759
Іспанія	22,987
Великобританія	13,614

ВЕС класифікують:

1. По потужності: малі (30-5000Вт), середні (5-100кВт), великі (100кВт-5мВт), дуже великі(більше 5 мВт)
2. По числу лопатей вітроколеса
3. По відношенню колеса до напрямку вітру

Зазвичай, використовуються традиційні ВЕС баштового типу з горизонтальною віссю обертання вітроколеса.

На сьогодні одинична потужність великих промислових ВЕП досягає 7МВт: Enercon E-126, при висоті з лопатями – 198 м, діаметром ротору 127м, генерує максимальну потужність 7,58 МВт [21].

ВЕП невеликої потужності для споживачів, господарських об'єктів в даний час використовуються у всіх країнах, потужність цих ВЕП становить від 0,1 кВт до 100 кВт. Для вироблення електроенергії в промислових масштабах проектують і будують вітроенергетичні парки, які об'єднують на великих територіях десятки і сотні ВЕП. Ці вітрові парки є сучасними Вітроелектростанціями (ВЕС), що працюють в енергосистемах.

Особливості застосування вітроелектричних станцій (ВЕС) [22]:

1. Паралельна робота з мережею. У цьому випадку електрична енергія, яку виробляє ВЕС, має відповідати вимогам якості електричної енергії у мережі. Мережа, у свою чергу, повинна мати можливість прийняти потужність від ВЕС (пропускна здатність ЛЕП, наявність відповідних лічильників електроенергії тощо) та вчасно реагувати на зміну її кількості.
2. Автономна робота ВЕС. Для такої роботи ВЕС необхідне встановлення акумуляторних батарей, які накопичуватимуть електричну енергію, що виробляється вітроагрегатом за сприятливих погодних умов. Наявність акумуляторів значно збільшує загальну вартість системи. Тому для прийняття остаточного рішення необхідно проводити техніко-економічні розрахунки. Встановлення автономної ВЕС можливо в поєднанні з фотоелектричним модулем.
3. Пряме перетворення електричної енергії в теплову. Електрична енергія, що виробляється ВЕС, перетворюється в теплову шляхом нагрівання об'єму води електричними ТЕНами. Тобто акумулятором тепла є вода. Таку схему можна використовувати для попереднього нагрівання води в системі гарячого водопостачання.

3. ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИХ ДАНИХ

3.1 Основні параметри вітроенергетичних пристроїв

Енергія вітру використовувалась вже віддавна, найпоширенішим використанням енергії вітру в країнах Європи і Росії були вітряні млини для переробки зерна.

Перші проекти вітрових генераторів, що здатні виробляти електричну енергію з'явилися ще в 1920 роках [23] .

В 1918 року було В.Залевським було розроблено принципи, яким повинен відповідати вітропристрій, в 1925 році було розроблено теорію вітродвигуна Н.Є. Жуковським, і був організований відділ вітрових двигунів в Центральному аерогідродинамічному інституті.

Розглянемо основні параметри, що використовуються для характеристики вітрогенераторних пристроїв (ВГП) (рис.3.1), та спосіб їх обчислення, який за звичаєм використовується при їх розрахунку [23].

Номінальна потужність $P_{ном}$ [Вт, кВт] – це потужність вітропристрою при розрахунковій швидкості вітру. Реальна потужність вітрогенератора змінюється зі зміною швидкості вітру і не дорівнює номінальній. Окрім того, потужність, яку отримують споживачі, залежить також від потужності перетворювача енергії та акумуляторної батареї, оскільки навантаження ніколи не підключають безпосередньо до ВГП.

Розрахункова швидкості вітру V_p [м/с] ;

Розмір ВГП – як правило, це діаметр вітротурбіни D [м] або інші розміри, за якими обчислюється площа вітроприймального пристрою. Площа, яку обмахує вітротурбіна є пропорційною D^2 , а номінальна потужність – пропорційна площі вітроприймального пристрою. Тобто, якщо діаметри двох вітрогенераторів відрізняються в n разів, то їх енергетичні потужності будуть відрізнятися в n^2 разів.

Виробок енергії за місяць W_m [кВт·год] – основний параметр вітрогенератора, який залежить від швидкості вітру в місці його розташування; розмірів вітроенергетичного пристрою, а саме, діаметра вітротурбіни, обмахуваної вітротурбіною площини та конструктивних особливостей ВЕП. Цей параметр повинен узгоджуватися з енергією, яка споживається навантаженням.

Середня потужність $P_{сер}$ [кВт] – потужність, при неперервній підтримці якої, виробок енергії за місяць буде дорівнювати реальному.

Потужність вітропристрою $P_{в.п.} = \eta P_T$ (3.1), де η – коефіцієнт корисної дії генератора та трансмісії. Найчастіше його значення складає 0,8 – 0,9;

P_T – потужність вітротурбіни, яка визначається за формулою

$$P_T = \xi P_{\Pi} \quad , \quad (3.2)$$

де ξ – коефіцієнт вітровикористання, який урахує, що використовується лише частина потужності вітрового потоку (рис. 3.1). За різними теоріями оцінки максимального значення ξ лежать у межах від 0.59 до 0.68. Це зрозуміло, бо, якщо припустити, що у повітряного потоку відбирається вся енергія (100%), потік повинен повністю зупинитися, тобто зникнути, що не узгоджується з його існуванням. У разі якісно спроектованої турбіни реальне значення коефіцієнту вітровикористання належить інтервалу 0.25- 0.4, а, за деякими оцінками, сягає 0.55 [23];

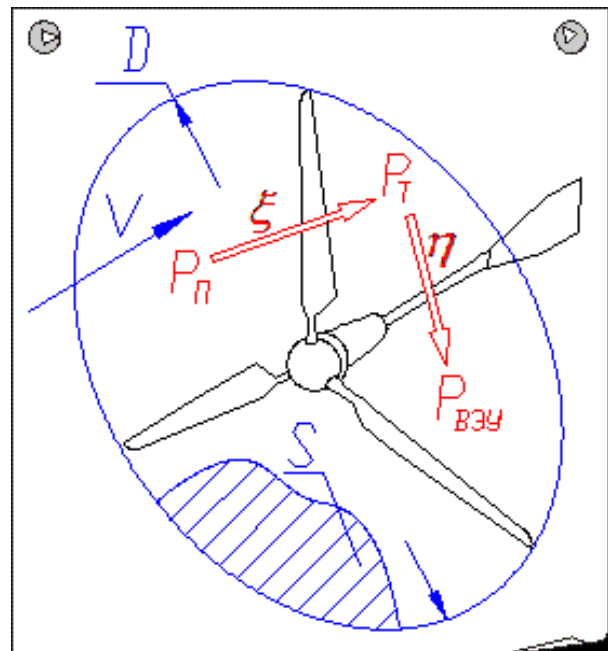


Рис.3.1– Основні параметри ВГП

P_{II} - потужність вітрового потоку, який проходить крізь обмахувану площу S вітротурбіни, за звичаєм обчислюють за формулою:

$$P_{II} = \frac{\rho S V^3}{2}, \quad (3.3)$$

тут ρ - густина повітря, стандартне значення якої приймається рівним $1,225 \text{ кг/м}^3$; V - швидкість незбуреного вітрового потоку; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ - обмахувана вітротурбіною площа.

Важливими характеристиками ВГП також є очікуваний виробок енергії та середня потужність вітропристрою. При розрахунку місячної виробки енергії припускають, що:

- при швидкості вітру нижче розрахункової швидкості потужність вітропристрою є пропорційною кубу швидкості вітру;
- при швидкості вітру вище розрахункової потужність вітропристрою обмежена системою керування або потужністю генератора і дорівнює номінальній потужності;
- розподіл швидкостей вітру у часі відповідає закону Гауса

$$p = A e^{-\pi A^2 (V - V_0)^2}, \quad (3.4)$$

де V_0 - середня швидкість вітру;

A - параметр, який залежить від V_0 .

Таким чином, середня потужність вітропристрою в залежності від її розрахункової швидкості і середньої швидкості вітру може бути обчислена за формулою:

$$P_{cp} = \int_0^{\infty} P_{ном} \left(\frac{V}{V_p} \right)^3 A e^{-\pi A^2 (V - V_0)^2} dV \quad (3.5)$$

Відповідно, виробок енергії, наприклад, за місяць, буде складати

$$W_m = P_{cp} \cdot 30 \cdot 24.$$

Щодо швидкості вітру, важливими параметрами вітрогенератора є:

- *Розрахункова швидкість вітру* – швидкість, при якій вітрогенератор досягає номінальної потужності. Якщо швидкість вітру перевищує розрахункову, включається система регулювання, яка обмежує подальше зростання обертів та потужності.
- *Стартова швидкість вітру*. При стартовій швидкості вітру генератор починає обертатися і заряджувати акумулятори. Значення стартової швидкості у більшості вітрогенераторів лежить в інтервалі 2.5 - 3.5 м/с та має більші значення для вітрогенераторів з вузькими та жорстко встановленими лопатями. Ефективність роботи вітрогенератора залежить від його стартової швидкості: чим більша стартова швидкість, тим більше годин простою генератора.
- *Максимальна експлуатаційна швидкість вітру* - швидкість вітру, яка може привести до руйнування працюючого вітрогенератора. Для безпечної експлуатації вітрогенератора ця швидкість не повинна перевищувати 45-50 м/с.

На виробок енергії суттєво впливає *висота щогли* вітрогенератора, оскільки швидкість і рівномірність вітрового потоку суттєво залежать від висоти. Якщо прийняти швидкість вітру на висоті $h_1=10\text{м}$ за одиницю $V_1=1$, можна оцінити відносні значення швидкості вітру V на висоті h за вище наведеною формулою (2.3)

$$V = V_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.3)$$

Цей фактор призводить до ще більшої залежності енергетичних характеристик вітрогенератора від висоти щогли внаслідок кубічної залежності потужності вітрового потоку P_L від швидкості вітру. Відповідні значення відносної швидкості вітру та відносної потужності генератора при різній висоті щогли наведені в таблиці 3.1 і свідчать про суттєве збільшення ефективності роботи вітрогенератора при більшій висоті щогли.

Таблиця 3.1

Залежність відносної потужності генератора від висоти щогли

Висота щогли $H, м$	5	10	15	20	25
Відносна швидкість вітру	0,87	1	1,08	1,15	1.20
Відносна потужність генератора	0,66	1	1.28	1,52	1,73

Ще одним фактором на користь вітропристроїв, які мають високу щоглу, є зменшення шумового забруднення навколишнього середовища при їх роботі.

3.2 Математична модель руху вітроколеса

Наведені вище формули (3.3) – (3.5), які використовують для оцінки середньої потужності вітропристрою, базуються на математичній моделі М.Є.Жуковського, яка була розроблена для оцінки потужності двигунів літака. Принциповою відміною є те, що робота двигуна базується на реакції повітряної маси і параметром оцінки є швидкість обертання пропелера, в той час, як робота вітрогенератора основана на реакції на потік повітря і параметром оцінки є швидкість вітру. Математична модель, яка ураховує ці відміни і спрямована на створення оптимальної конструкції вітряного двигуна з точки зору спрощення конструкції та максимального використання енергії вітру представлена в роботі [24].

В роботі розглядається математична модель руху вітроколеса в процесі перетворення енергії вітру в електричну енергію, яка може бути використана при створенні системи автоматичного управління вітрового пристрою з оптимальними параметрами.

На основі принципу Даламбера рівняння руху вітрового двигуна може бути записано у наступному вигляді:

$$F_{\text{в}} - F_{\text{см}} = m \frac{dV_{\text{в}}}{dt}, \quad (3.7)$$

де F_g і F_{cm} – відповідно сила вітру та статичне навантаження, m – інертна маса вітроколеса, $V_{ог}$ – окружна швидкість руху вітроколеса.

Сила вітру визначається за другим законом Ньютона

$$F_g = ma, \quad (3.8)$$

де m – маса повітряного потоку, a – його прискорення, отримане при взаємодії з вітроколесом.

Маса повітряного потоку дорівнює

$$dm = \rho S V dt, \quad (3.9)$$

ρ – щільність повітря (стандартне значення $1,225 \text{ кг/м}^3$);

V – швидкість незбуреного вітрового потоку;

S – площа вітроприймального пристрою;

Інтегрування диференціального виразу (3.9) дає масу повітря, яке обметає пристрій за час Δt :

$$m = \rho S V \Delta t. \quad (3.10)$$

Прискорення повітряного потоку виникає внаслідок його взаємодії з вітроколесом і визначається відношенням приростом швидкості відбитого потоку до відповідного часу:

$$a = \frac{\Delta V_{відб.}}{\Delta t} \quad (3.11)$$

$\Delta V_{відб.}$ дорівнює різниці між швидкістю повітряного потоку V та швидкістю вітроколеса $V_{ог}$. Тоді:

$$a = \frac{(V - V_{ог})}{\Delta t} \quad (3.12)$$

Підстановка виразів (3.10) та (3.12) у рівняння (3.8) дає значення сили вітру, що виконує роботу:

$$F_g = \rho S V (V - V_{ог}). \quad (3.13)$$

Формула (3.13) відрізняється від формул, за якими за звичаєм визначається сила вітру, і може бути використана для усіх типів вітряків при урахуванні кутового положення поверхні, яка сприймає потік, відносно вектору сили

вітру. Оскільки у більшості вітрових пристроїв рух перетворюється на обертальний, рівняння (3.8) слід переписати згідно з законом динаміки обертального руху:

$$M_{\epsilon} - M_{cm} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.14)$$

де

M_{ϵ} – обертальний момент, створений вітром;

M_{cm} – статичне навантаження вітрового пристрою;

J – момент інерції механізмів на валу вітрового пристрою;

ω – кутова швидкість обертання.

$$M_{\epsilon} = F_{\epsilon} \cdot R_{np} \quad (3.15)$$

Тут R_{np} – приведений радіус, значення якого залежить від конструкції вітрової установки та місця прикладення сили вітру.

Звідки, з урахуванням виразу (3.13) для F_{ϵ} , отримуємо:

$$M_{\epsilon} = \rho S V (V - V_{\partial\epsilon}) R_{np} \quad (3.16)$$

Виразив $V_{\partial\epsilon}$ через кутову швидкість, отримуємо:

$$M_{\epsilon} = \rho S V (V - \omega R_{np}) R_{np} \quad (3.16a)$$

Якщо статичне навантаження турбіни створюється електричним генератором постійного струму, то:

$$M_{cm} = c \Phi i_n \quad (3.17)$$

де c – постійний коефіцієнт електричного генератора; Φ – магнітний потік генератора; i_n – струм навантаження генератора.

Відомо, що електричний генератор постійного струму описують наступні рівняння:

$$\begin{aligned} E &= c \Phi \omega \\ E &= R_{\text{я}} i_n + L_{\text{я}} \frac{di_n}{dt} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Тут $R_{\text{я}}$ та $L_{\text{я}}$ - відповідно активний та індуктивний опір навантаження електрогенератора.

Таким чином, математична модель вітрового електродвигуна може бути представлена наступним набором рівнянь, які дозволять провести його аналіз та синтез та оптимізувати конструкцію:

$$\begin{aligned} M_{\epsilon} - M_{cm} &= J \frac{d\omega}{dt} \\ M_{\epsilon} &= \rho S V (V - \omega R_{np}) R_{np} \\ M_{cm} &= c \Phi i_n \\ E &= c \Phi \omega \\ E &= R_{я} i_n + L_{я} \frac{di_n}{dt} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Для визначення швидкості вітроколеса, при якій використання енергії вітру буде максимальним, проведений математичний аналіз роботи, яка виконується вітром.

$$P_{\Pi} = \frac{\rho S V^3}{2}, \quad (3.3)$$

Цей вираз надає потужність вітрового потоку, який походить крізь обмахувану площу S вітротурбіни, і не може бути використаний для визначення оптимуму використаної потужності.

Корисна потужність у відповідності з законами механіки визначається з виразу

$$P_{\kappa} = V_{\partial\epsilon} \cdot F_{\epsilon} \quad (3.20)$$

Підстановка виразу для сили вітру в формулу (3.17) дає:

$$P_{\kappa} = \rho S V (V - V_{\partial\epsilon}) V_{\partial\epsilon} \quad (3.21)$$

З формули (3.21) легко помітити, що, коли швидкість руху вітроколеса $V_{\partial\epsilon}$ дорівнює нулю, корисна потужність вітру також дорівнює нулю. Окрім того, якщо швидкість вітроколеса $V_{\partial\epsilon}$ дорівнює швидкості потоку повітря V , використана потужність також буде дорівнювати нулю, тобто вітер не виконує роботу.

Для визначення оптимальної корисної потужності необхідно знайти максимум функції (3.21) за аргументом $V_{\text{ов}}$. Похідна функції (3.21) дорівнює:

$$\frac{dP_{\kappa}}{dV_{\text{ов}}} = \rho S V (V - 2V_{\text{ов}})$$

Прирівняв праву частину цього виразу нулю, отримуємо оптимальне значення швидкості руху вітроколеса:

$$V_{\text{ов}} = \frac{V}{2} \quad (3.22)$$

Звідки, максимальне використання енергії вітру можливе при швидкості вітроколеса, яка дорівнює половині швидкості вітрового потоку, і становить:

$$P_{\kappa.\text{макс.}} = \frac{\rho S V^3}{4}, \quad (3.23)$$

Отриманий результат суттєво відрізняється від тих, що використовуються у сучасній вітроенергетиці.

Згідно теорії Ланчестера-Бейтца-Жуковського не більше ніж 59.3% кінетичної енергії рідини в потоковій трубі, яка має такий самий поперечний переріз, що область вітроколеса може бути перетворена на корисну. Цей результат є максимальним і справедливим тільки, якщо потокова труба вільна від зовнішніх впливів (наприклад, усередині не має дифузорів або секцій). Таке обмеження значень коефіцієнту зверху є зрозумілим, оскільки неможливо зупинити рух рідини (вітру) у потоковій трубі, тобто повністю заблокувати потік, щоб досягнути 100% ефективності. Таким чином, існує оптимальне значення уповільнення потоку, яке і дає максимальну потужність в 59.3% від кінетичної енергії. Але це значення не досягається в існуючих вітроенергетичних установках, а є дуже низьким $\sim 10\text{-}12\%$. Розглянута модель [24] дозволяє зрозуміти такий результат і надає вираз для визначення максимального використання енергії вітру.

Слід зауважити, що в моделі розглядається випадок ламінарної течії, тобто не враховуються ефекти пов'язані з завихренням повітряного потоку за

вітродвигуном, які впливають на ефективність роботи вітродвигуна. Задача урахування турбулентності, яка залежить від конкретної форми лопотів двигуна, їх розташування відносно напрямку повітряного потоку та деяких інших факторів, є складною, потребує експериментальних досліджень в спеціальних лабораторіях або використання комп'ютерних програм обчислювальної гідродинаміки та відповідного апаратного забезпечення.

З цієї точки зору представляється актуальною робота [28], в якій запропоновано підхід до визначення інтенсивності турбулентності потоків з великомасштабними вихорами на основі припущення про головну роль макроструктури у формуванні основних статистичних характеристик пульсацій швидкості. Автори отримали інтенсивність турбулентності для вільних плоских струменів та напівобмежених струменів з різною кривиною поверхні настилання, а також інтенсивність турбулентності для примежового шару між потоками, причому їх результати добре збігаються з відомими дослідними даними.

4. ПРОГНОЗНА ОЦІНКА ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГІЇ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ

4.1. Характеристика вітрового режиму Одеської області

Вітер зазвичай часто змінює свій напрям та швидкість. Його середня швидкість також часто змінюється згідно з сезоном. У більшості місць амплітуда вітру взимку вище в 2 - 3 рази на відміну від літа.

Типовий графік, що демонструє залежність напрямку та величини швидкості вітру від пори року (м. Одеса), побудований за даними гідрометеорологічної служби ОДЕКУ, представлений на рис. 4.1.

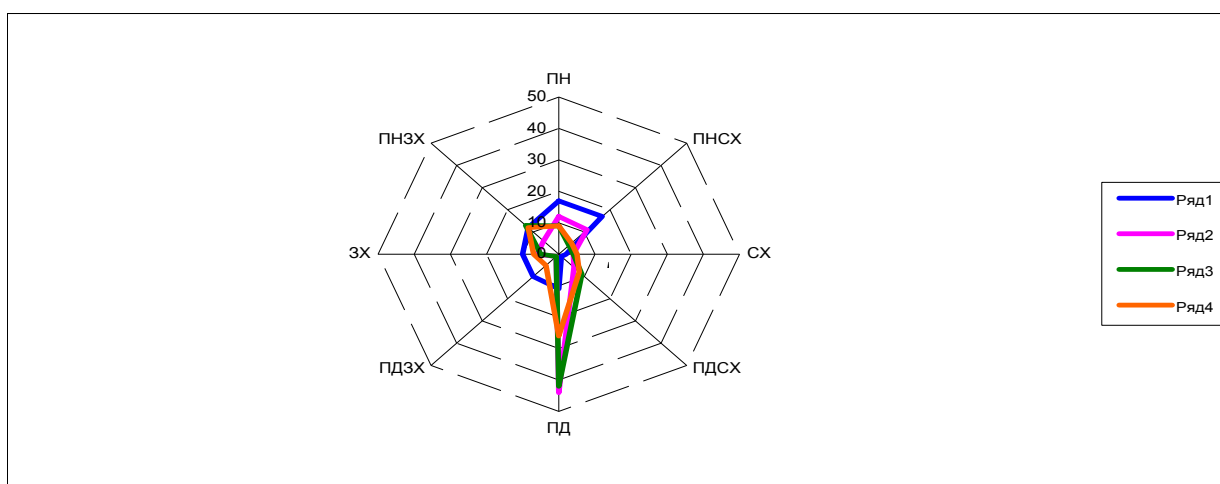


Рис.4.1 – Роза вітрів, м. Одеса (ряд 1 – зимовий період; ряд 2 – весна; ряд 3 – літо; ряд 4 – осінь).

Нами в ході роботи було розглянуто вітровий режим Одеської області за даними гідрометеорологічної служби України. Використовувались усереднені за добу значення восьмирічної системи збору даних швидкості вітру за 2017 рік в Одесі (район аеропорту), Кілійському та Татарбунарському районах, які наведені в таблиці (див. додатки Б, В, Г), а також у вигляді графіків (рис. 4.2 - 4.4).

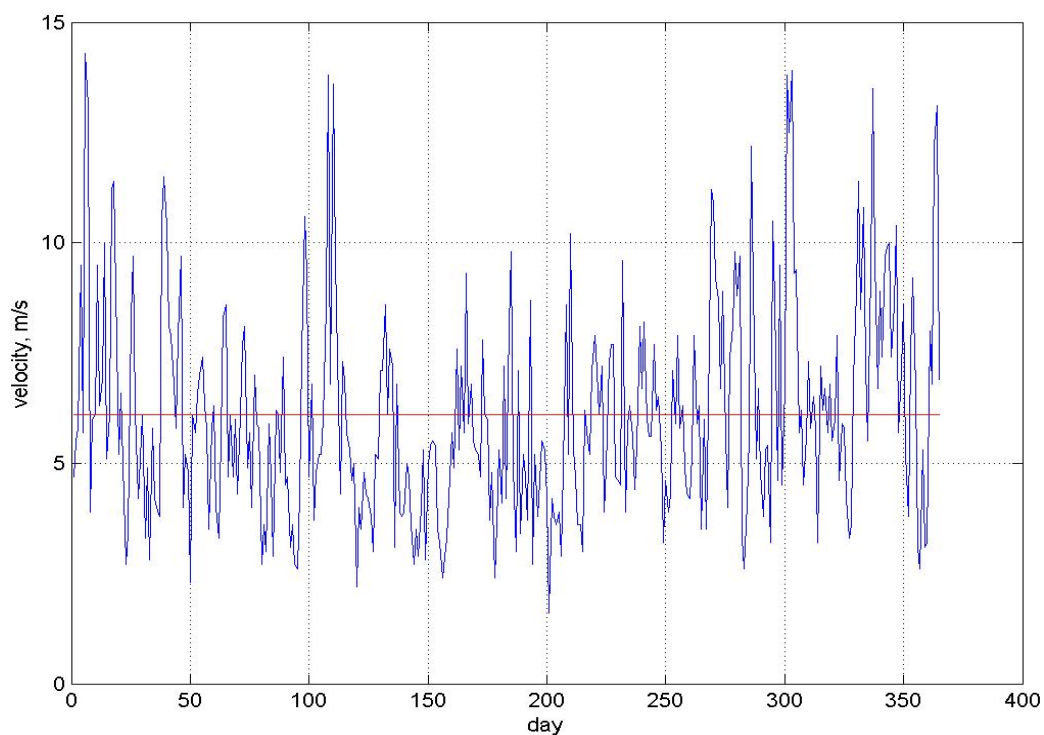


Рис.4.2 – Середньодобова швидкість вітру. Одеса, р-н аеропорту, 2017р.

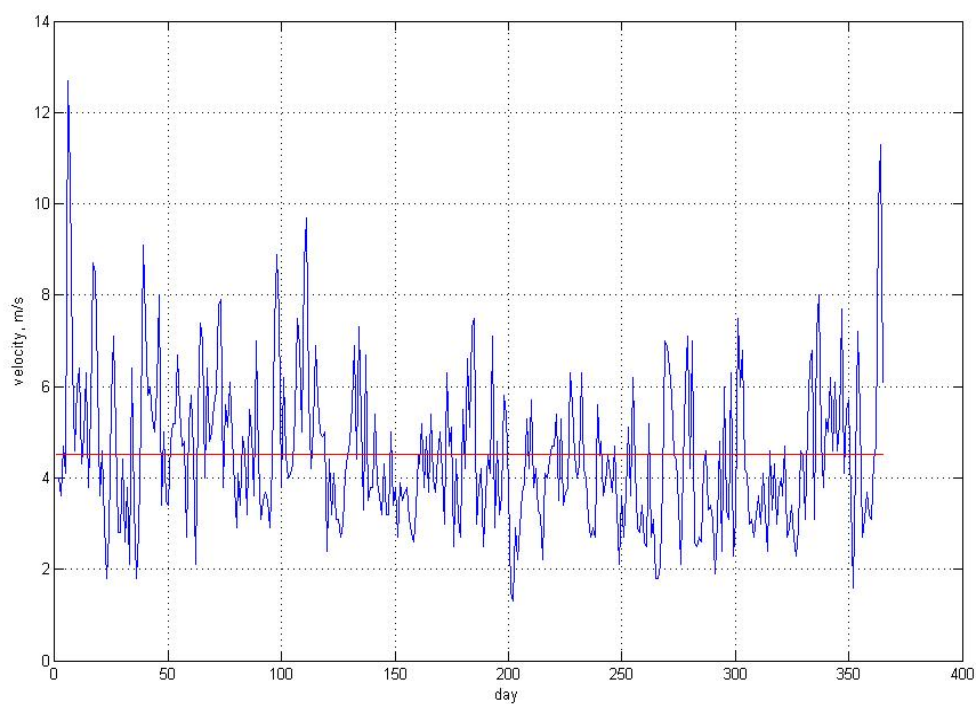


Рис.4.3 – Середньодобова швидкість вітру. Кілійський р-н, 2017р.

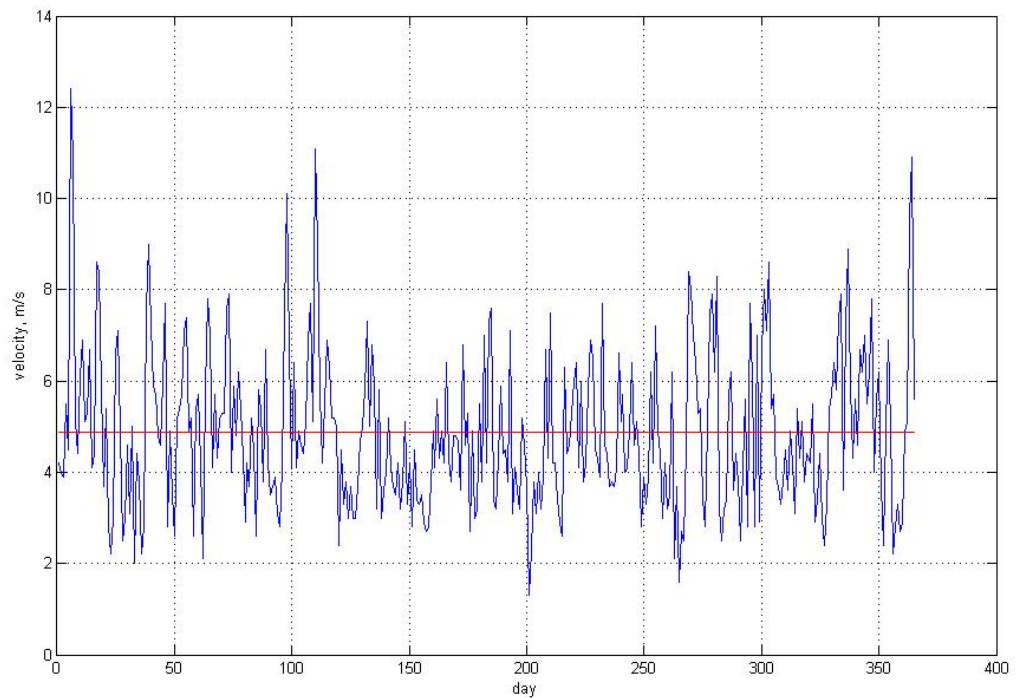


Рис.4.4 – Середньодобова швидкість вітру. Татарбунарський р-н, 2017р.

Для дослідження характеру розподілу швидкості вітру за часом, який за звичаєм вважається гаусовим (див. формулу (3.4), за наведеними даними нами були побудовані діаграми повторюваності протягом року швидкості вітру за градаціями (рис. 4.5 - 4.7) [29]. На цих діаграмах представлений розподіл кількості днів на протязі року зі швидкістю вітру, який належить певному діапазону, в залежності від діапазону значень v , а також у напівлогарифмічному масштабі $n = f(\ln v)$. З аналізу побудованих гістограм витікає, що розподіл швидкостей вітру за часом не підпорядковується закону Гауса, як припускають при розрахунку очікуваної місячної виробки енергії, а носить скоріше логнормальний характер.

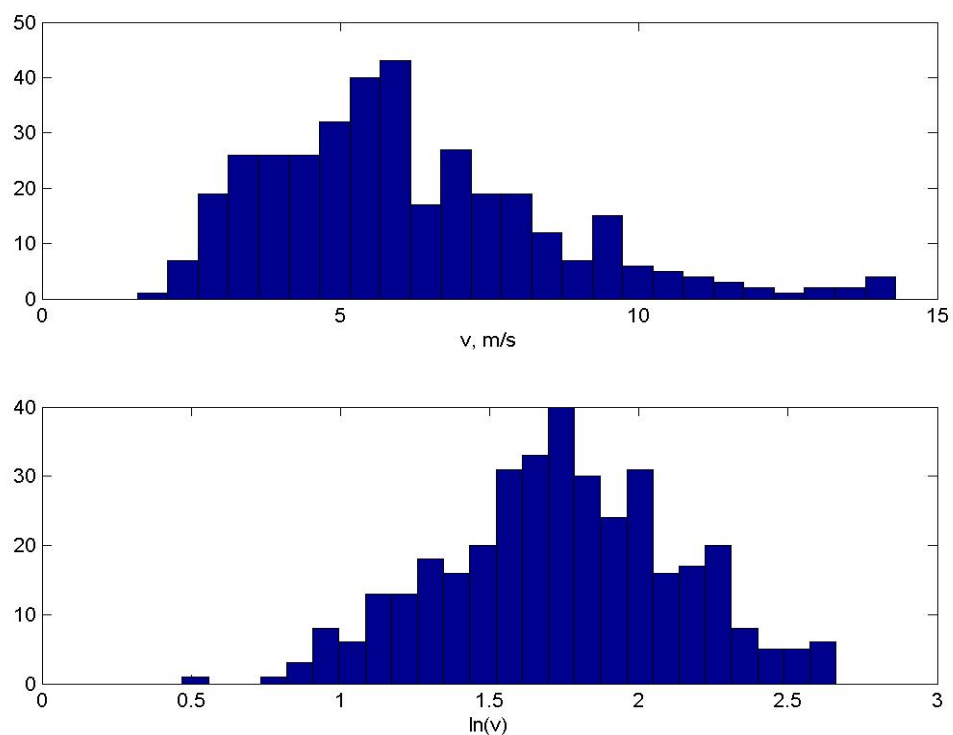


Рис. 4.5 – Гістограми повторюваності швидкості вітру по градаціям як функції швидкостів вітру v та $\ln v$. Одеса, р-н аеропорту.

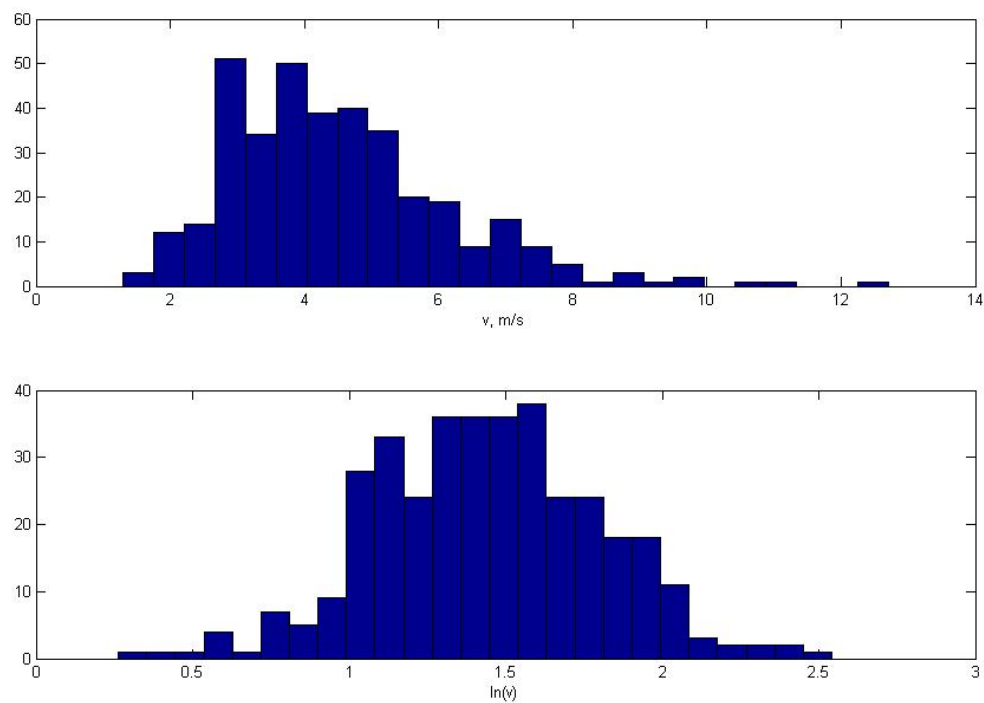


Рис. 4.6 – Гістограми повторюваності швидкості вітру по градаціям як функції швидкостів вітру v та $\ln v$. Кілійський р-н.

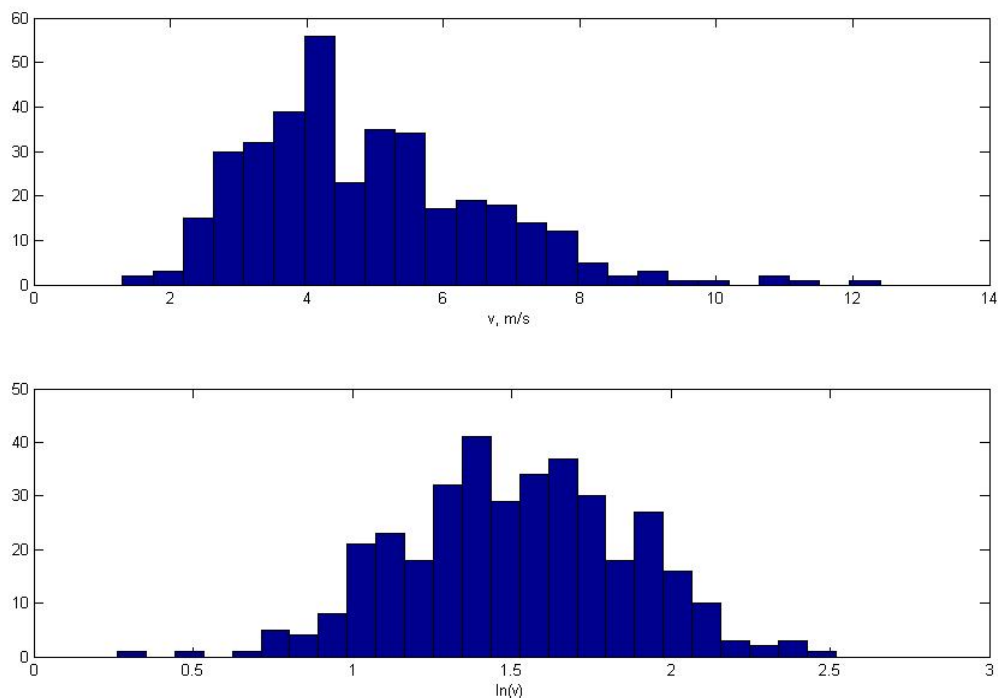


Рис. 4.7 – Гістограми повторюваності швидкості вітру по градаціям як функції швидкостів вітру v та $\ln v$. Татарбунарський р-н.

При виборі місця розташування вітропристрою необхідно урахувати вплив дотичних напруг і підтиску горизонтального вітрового потоку, який проходить над поверхнею землі. Ця напруга виникає при малих швидкостях вітру поблизу підстильної поверхні, на висоті швидкість вільного потоку збільшується. Відносна залежність швидкості вітру від висоти була наведена нами у таблиці 3.1. Слід зауважити, що проведені нами оцінки розподілу середньої енергії вітру над територією Одеської області мають лише приблизний характер, оскільки більшість даних щодо швидкості вітру були виміряні у поверхні землі. Дотичні напруги вітрового потоку i , як наслідок, виробок енергії залежать від шорсткості поверхні, від споруд, дерев, кількості оточуючих вітродвигунів та інших перешкод.

Окрім того для перешкоди взаємному впливу сусідніх ВЕП необхідно забезпечити достатній рівень відстані між ними. За результатами експериментів, проведених у Швеції в аеродинамічній трубі, було визначено,

що мінімальна відстань повинна дорівнювати 6 діаметрам вітроколеса, згідно інших даних навіть 8 -12 діаметрів.

Умови для місця установки ВЕП: достатня середньорічна швидкість вітру, відсутність високих, громіздких перешкод з вітряної сторони на відстані, що визначається вистою перешкоди, плоска вершина, плато (з пологими схилами), на плоскій рівнині чи островах озер чи морів і т. ін.

4.2 Прогнозна оцінка використання вітрової енергії Одеської області

Залежність потужності ВЕП від швидкості вітру, яка є стохастичною величиною, переводять процес виробки енергії вітроколесом у цю категорію, внаслідок чого будь-які прогностичні дані щодо виробки енергії вітроколесом, зроблені за усередненими значеннями швидкості вітру, носять приблизний характер. Ще один фактор, який необхідно урахувати при прогнозуванні можливого виробку енергії, є стартова швидкість при якій вітроколесо починає рухатись і виробляти енергію, тобто існування нижньої границі за швидкостями, яке для більшості ВЕП становить 3,5м/с. Існування верхньої границі за швидкостями, при якій може відбутися руйнування ВЕП, є несуттєвим для нашого регіону, оскільки за існуючими оцінками ця швидкість вітру сягає 45-50м/с.

Для дослідження впливу вище зазначених факторів на прогностичні оцінки отримання електроенергії за допомогою вітроенергетичних пристроїв, нами були проведені розрахунки можливого місячного та річного виробку енергії ВЕП з вітроколесами різних діаметрів для зазначених районів Одеської області за різними методиками.

Розрахунок потужності ВЕП проводився з використанням формули (3.23), яка, на відміну від формули, що за звичаєм використовується для подібних розрахунків, ураховує, що максимальне використання енергії вітру можливе при швидкості вітроколеса, яка дорівнює половині швидкості вітрового потоку

$$P = C_p \frac{\rho S V^3}{4} \quad (4.1)$$

Тут

C_p – коефіцієнт потужності турбіни, який представляє собою добуток коефіцієнту вітровикористання на коефіцієнт корисної дії генератора і трансмісії, який найчастіше складає 0,8 – 0,9. Вважаючи значення коефіцієнту вітровикористання нижчим за максимальне теоретичне і рівним 0,5, нами при розрахунках було прийняте для C_p значення 0,4;

ρ – густина повітря (стандартне значення $\rho = 1.225 \text{ кг/м}^3$);

V – швидкість вітру (м/с);

$S = \frac{\pi d^2}{4}$ – обмахувана вітротурбіною площа.

За питомою потужністю ВЕП, розрахованою за наведеними даними про швидкість вітру за формулою

$$\frac{P}{S} = C_p \frac{\rho V^3}{4}, \quad (4.2)$$

нами була проведена прогнозна оцінка щомісячного та річного виробку енергії (кВт-год), що може бути отримана від ВЕП з різними діаметрами вітроколеса, призначених як для використання в окремих власних господарствах, так і для отримання енергії у промислових масштабах. Результати розрахунків, проведених за щоденними даними про швидкість вітру у відповідному регіоні з урахуванням забезпеченості робочої швидкості вітру, яка приймалася рівною 3,5 м/с, представлені в таблиці 4.1 та (для ВЕП з діаметром вітроколеса $d = 6,2 \text{ м}$) на рис. 4.8 – 4.10 (ряд 2).

Для порівняння та оцінки втрат енергії при швидкості вітру нижче робочої на діаграмах також представлені значення енергії, розраховані за щоденними показниками швидкості вітру без урахування обмежень за робочою швидкістю (ряд 1).

Таблиця 4.1

Щомісячний та річний прогнозний виробок енергії за щоденною вітровою обстановкою в Одесі, Кілійському та Татарбунарському районах.

Місяць	Виробок енергії , кВт-год.								
	Одеса (р-н аеропорту)			Кілійський р-н			Татарбунарський р-н		
	$d = 2,5\text{м}$	$d = 6,2\text{м}$	$d = 54\text{м}$	$d = 2,5\text{м}$	$d = 6,2\text{м}$	$d = 54\text{м}$	$d = 2,5\text{м}$	$d = 6,2\text{м}$	$d = 54\text{м}$
1	231	1415	107311	109	665	50457	111	678	51431
2	140	859	65127	64	392	29699	71	434	32926
3	89	547	41508	71	437	33108	72	440	33376
4	231	1415	107311	90	552	41863	105	641	48575
5	63	389	29494	37	224	16978	39	237	17975
6	74	456	34569	31	187	14186	36	221	16728
7	94	573	43479	45	278	21062	53	323	24523
8	113	694	52642	35	214	16199	59	363	27561
9	135	830	62930	34	208	15741	59	360	27299
10	280	1713	129911	43	260	19751	84	514	38964
11	148	907	68792	22	137	10354	48	292	22118
12	275	1687	127902	95	579	43886	104	634	48061
За рік	1875	11487	870976	674	4132	313286	839	5137	389536

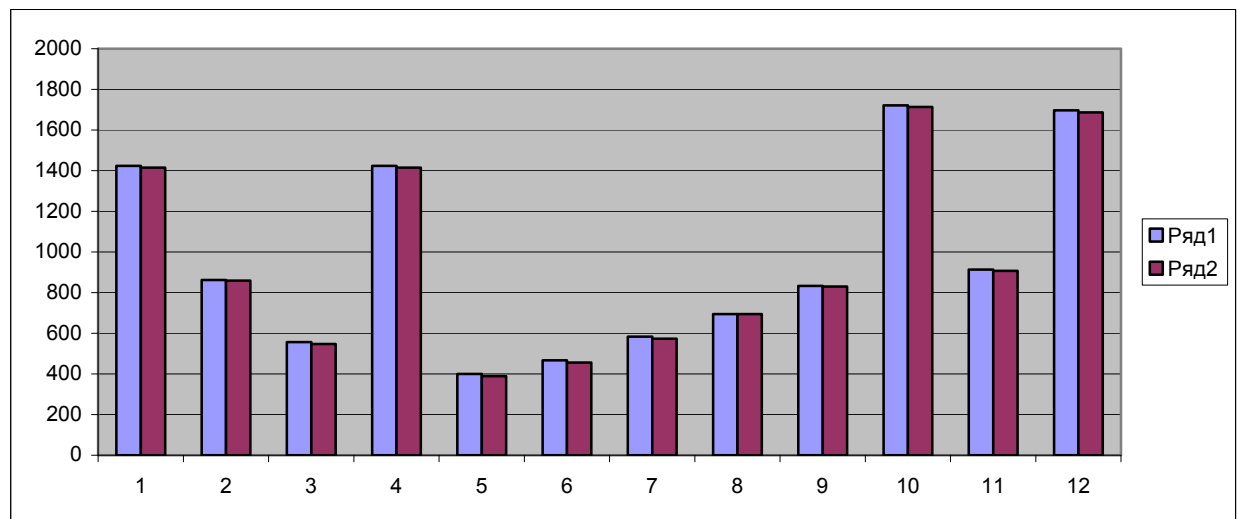


Рис.4.8 – Прогнозний щомісячний виробок енергії для ВЕП з діаметром вітроколеса $d = 6,2$ м за щоденними показниками швидкості вітру (ряд 1) та з урахуванням обмежень за робочою швидкістю (ряд 2). м. Одеса (аеропорт).

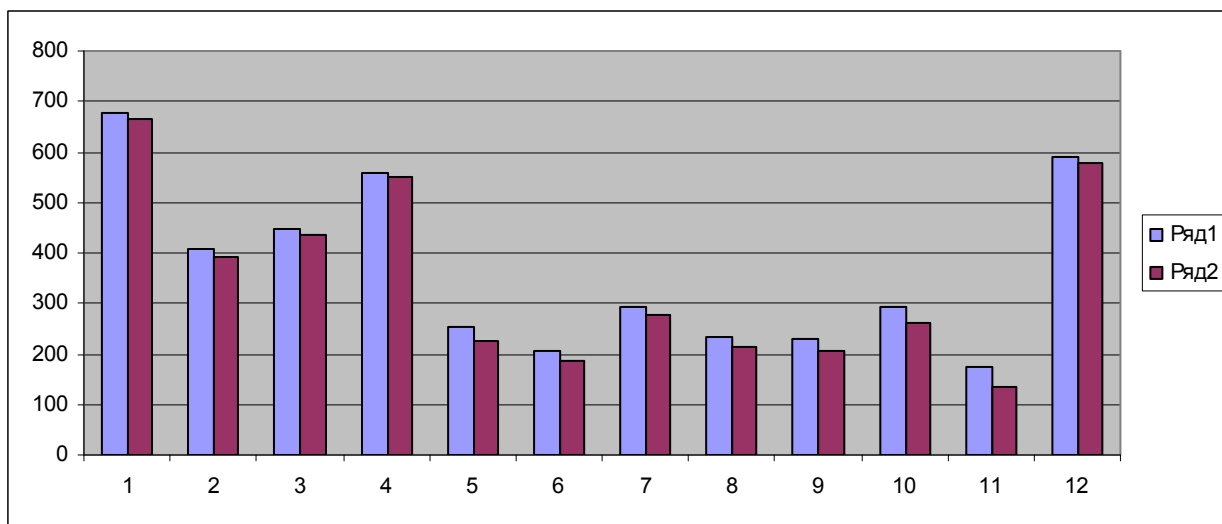


Рис.4.9 – Прогнозний щомісячний виробок енергії для ВЕП з діаметром вітроколеса $d = 6,2$ м за щоденними показниками швидкості вітру (ряд 1) та з урахуванням обмежень за робочою швидкістю (ряд 2). Кілійський район.

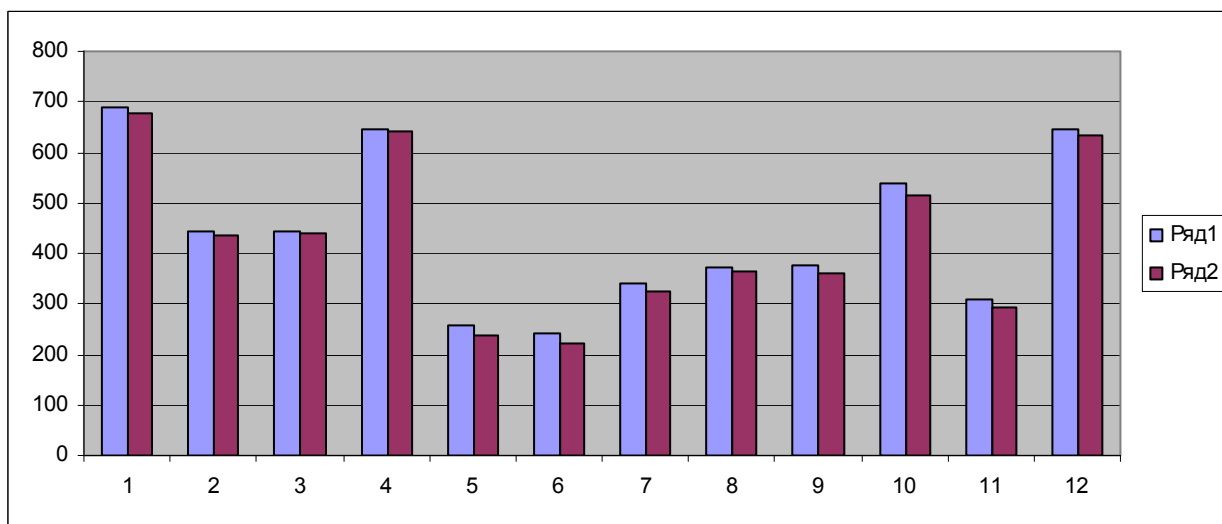


Рис.4.10 – Прогнозний щомісячний виробок енергії для ВЕП з діаметром вітроколеса $d = 6,2$ м за щоденними показниками швидкості вітру (ряд 1) та з урахуванням обмежень за робочою швидкістю (ряд 2). Татарбунарський район.

Отже, як витікає з розрахунків, представлених відповідними діаграмами, існування нижньої границі робочої швидкості вітру вітродвигунів суттєво не впливає у розглянутих районах на величини щомісячного виробку енергії. Але не слід забувати, що це означає

відсутність виробку та постачання енергії на протязі декількох днів (іноді до 10 днів і більше) і потребує паралельного використання інших джерел електроенергії (сонячних батарей і т. ін.) та потужних акумуляторів електроенергії.

Для оцінки результатів різних методів розрахунку виробку енергії нами було проведено порівняння даних щомісячного та річного виробку енергії для вітродвигуна з діаметром вітроколеса $d = 6,2\text{м}$ за щоденною вітровою обстановкою (з урахуванням забезпеченості робочої швидкості вітру), наведених в таблиці 4.1, з розрахунками, виконаними з урахуванням повторюваності швидкості вітру по градаціям (з інтервалом швидкостей у 2м/с) та за середньомісячними значеннями швидкості вітру, наведеними в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Середньомісячні значення швидкість вітру (м/с) по регіонам

Місяць	Район		
	Одеса (аеропорт)	Кілійський	Татарбунарський
1	6.9	5.2	5.3
2	6.2	4.9	5.0
3	5.4	5.1	5.1
4	6.2	5.3	5.5
5	4.8	4.2	4.2
6	5.1	4.0	4.2
7	5.2	4.2	4.5
8	5.9	4.2	4.8
9	6.2	3.9	4.6
10	7.3	4.1	5.1
11	6.4	3.7	4.5
12	7.6	5.2	5.4

Результати розрахунків представлені в таблиці 4.3, де в колонці А наведені значення енергії за результатами щоденно вимірних значень швидкості з таблиці 4.1; у колонці В - значення енергії, обчислені з урахуванням повторюваності швидкості вітру по градаціям; у колонці С - значення енергії за середньомісячними значеннями швидкості вітру.

Таблиця 4.3.

Прогнозна оцінка виробку енергії для вітродвигуна з діаметром вітроколеса $d = 6,2\text{м}$ за різними методиками її розрахунку

Місяць	Виробок енергії, кВт-год. ($d = 6,2\text{м}$)								
	Одеса (р-н аеропорту)			Кілійський р-н			Татарбунарський р-н		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	1415	1489	902	665	777	386	678	768	409
2	859	858	591	392	434	292	434	410	310
3	547	635	432	437	418	364	440	416	364
4	1415	1050	633	552	548	396	641	683	442
5	389	409	304	224	254	203	237	243	203
6	456	432	352	187	222	170	221	258	197
7	573	614	386	278	278	203	323	344	250
8	694	692	564	214	270	203	363	429	304
9	830	831	633	208	249	158	360	419	259
10	1713	1690	1068	260	357	189	514	573	364
11	907	893	697	137	206	135	292	286	242
12	1687	1701	1068	579	593	386	634	642	432
За рік	11487	11294	7631	4132	4606	3085	5137	5471	3776

Як свідчать результати, оцінки, зроблені по тим самим даним за результатами щоденних вимірів швидкості вітру та за значеннями швидкості, розподіленими по градаціям, яка є загальноприйнятою, незначно розрізняються між собою. Оцінювання виробку енергії за середньомісячними

даними дає суттєво нижчий результат (що, як зрозуміло, є наслідком кубічної залежності потужності вітродвигуна від швидкості вітру) і не може вважатися адекватним. Діаграми, які наочно представляють розбіжність результатів, отриманих при розрахунках, представлені на рис. 4.11 - 4.13.

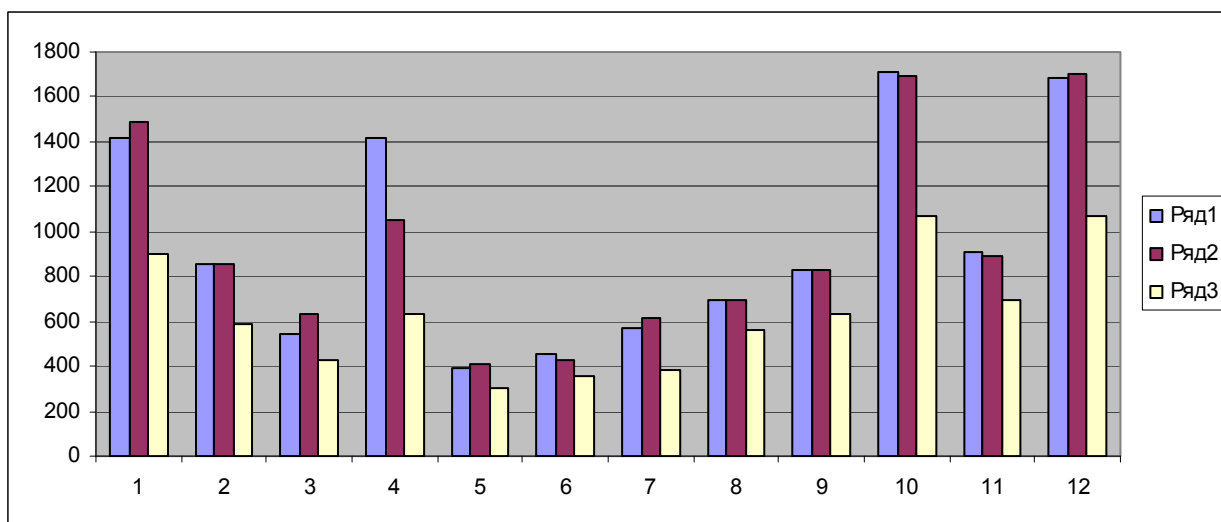


Рис.4.10 – Прогнозний щомісячний виробок енергії для ВЕП з діаметром вітроколеса $d = 6,2$ м за таблицею 4.3. (А – ряд 1; В – ряд2; С – ряд 3). Одеса (аеропорт).

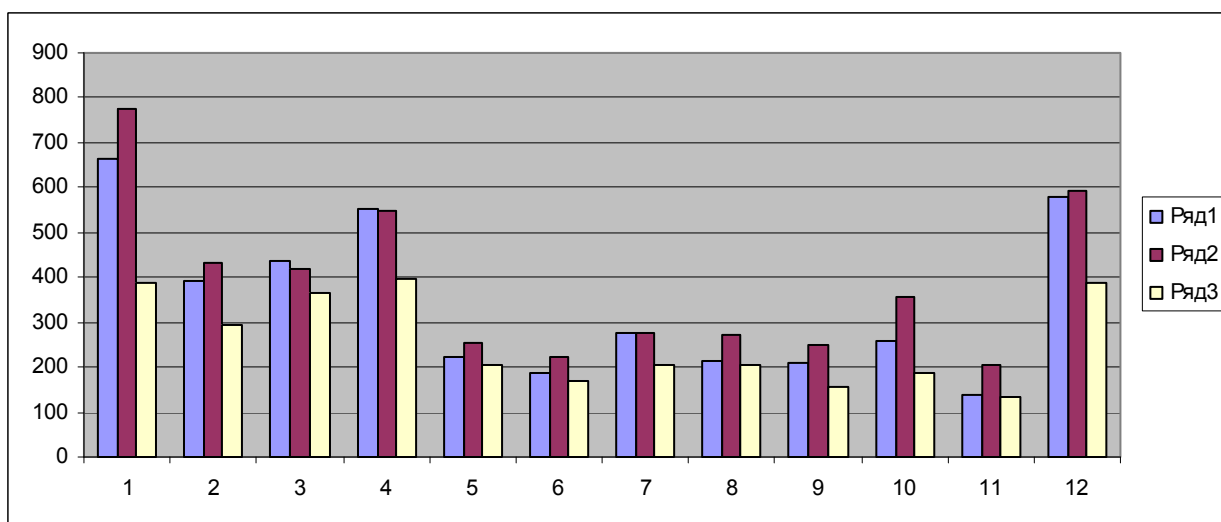


Рис.4.11 – Прогнозний щомісячний виробок енергії для ВЕП з діаметром вітроколеса $d = 6,2$ м за таблицею 4.3. (А – ряд 1; В – ряд2; С – ряд 3). Кілійський район.

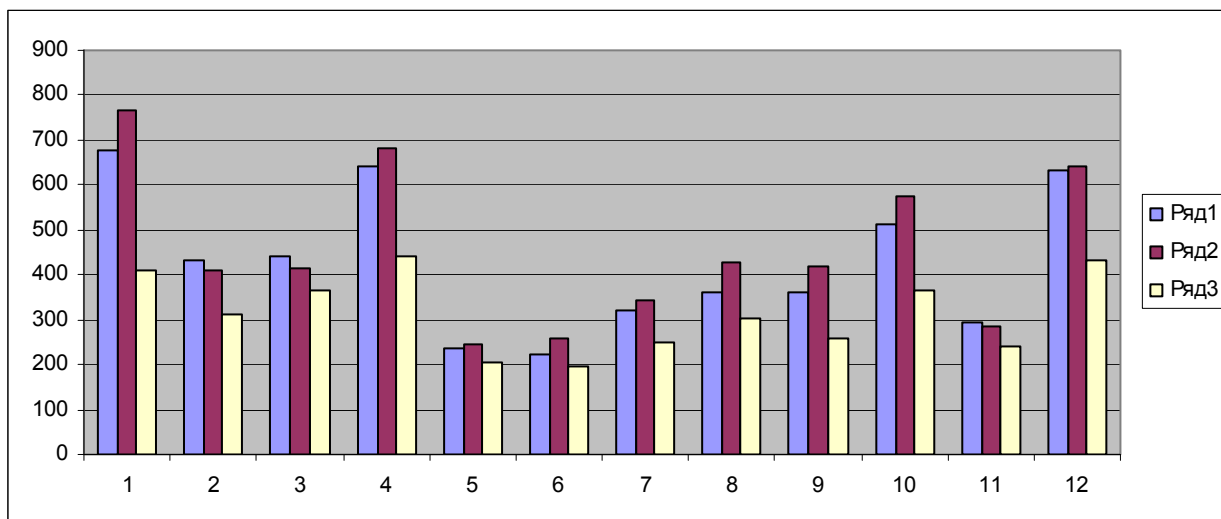


Рис.4.12 – Прогнозний щомісячний виробок енергії для ВЕП з діаметром вітроколеса $d = 6,2$ м за таблицею 4.3. (А – ряд 1; В – ряд2; С – ряд 3). Татарбунарський район.

Проведені оцінки наочно демонструють вплив місцевості на можливості використання вітрової енергії: якщо за метеорологічними даними щодо швидкості вітру оцінки, отримані для Кілійського та Татарбунарського районів, не дуже відрізняються між собою, прогнозні значення енергії за результатами вимірювань в районі Одеського аеропорту (відкрита місцевість, близькість моря) мають удвічі більші значення.

Загальним фактором, який є спільним для будь-якої місцевості, являється суттєвий сезонний вплив на виробок енергії, пов'язаний зі зміною вітрового режиму. За результатами, представленими в таблиці 4.3 нами було проведено оцінювання можливого виробку енергії за сезонами. Незалежно від абсолютних значень прогнозного виробку енергії, для будь-якого з розглянутих районів сезонні коливання енергії є дуже значними і становлять до двох і, навіть, майже трьох разів. Найбільший виробок електроенергії очікувано припадає на зимовий період, найменший – на літо (див. таблицю 4.4; рис. 4.13).

Таблиця 4.4.

Сезонна оцінка виробку енергії для вітродвигуна з діаметром
вітроколеса $d = 6,2\text{м}$

Сезон	Виробок енергії, кВт-год. ($d = 6,2\text{м}$)		
	Одеса (р-н аеропорту)	Кілійський р-н	Татарбунарський р-н
Зима	4048	1804	1821
Весна	2174	1220	1343
Літо	1740	770	1031
Осінь	3219	812	1279

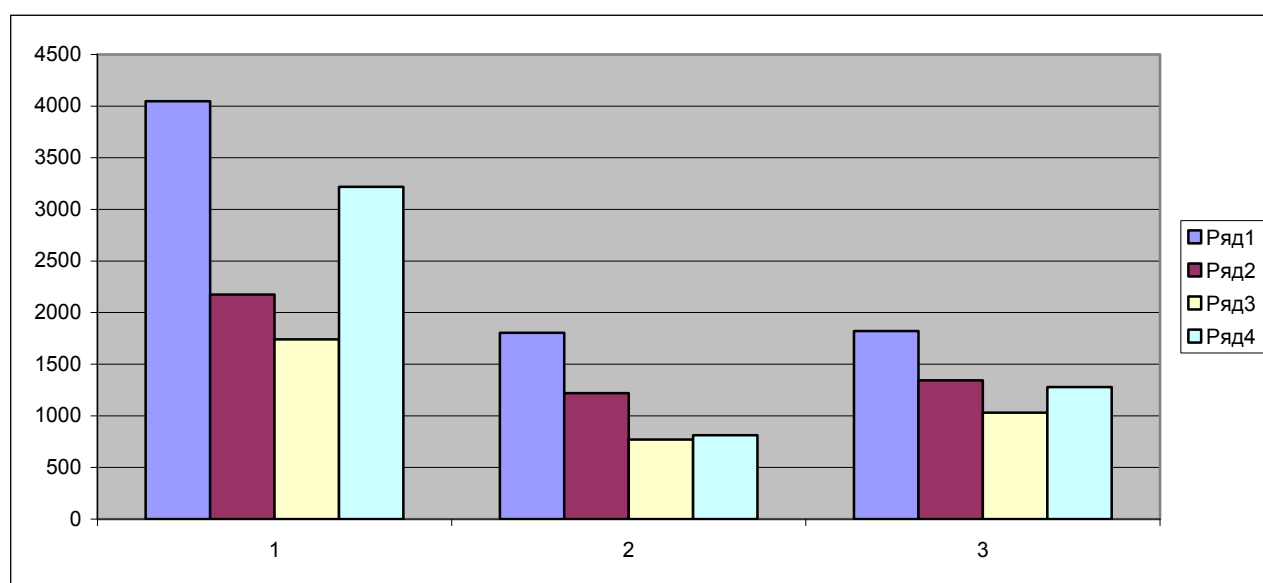


Рис.4.12 – Прогнозний виробок енергії за метеоданими про швидкість вітру для Одеси (район аеропорту) – 1; Кілійського району – 2; Татарбунарського району – 3 за сезонами (зима – ряд 1; весна – ряд 2; літо – ряд 3; осінь – ряд 4).

Отже, настільки великі сезонні, місячні та, навіть, щоденні коливання значень вітрової енергії не гарантують її стабільного постачання споживачам і потребують комплексного використання енергії вітру разом з іншими альтернативними джерелами. У нашому регіоні це, в першу чергу, сонячні

батареї, за рахунок яких може бути скомпенсована нестача енергії, що виробляється ВЕП, саме в літній період. З іншого боку, зрозуміло, що будь-який вітроенергетичний комплекс повинен супроводжуватися акумуляторною станцією великої потужності як для накопичення надлишкової електроенергії, що виробляється при сприятливих погодних умовах, так і для компенсації її нестачі у протилежному випадку.

Отримані нами оцінки потужності вітрових пристроїв дозволяють зробити висновок, що використання енергії вітру може стати суттєвою складовою в енергетичному балансі як окремих власних господарств, так і в промисловому масштабі в Одеському регіоні.

Незважаючи на приблизний характер оцінок вітрової енергії, який обумовлюється нестійкою динамікою вітрових потоків, проведений нами аналіз вітрового потенціалу Одеської області показує можливість ефективного використання вітроенергоресурсів з метою збалансування структури енергосистеми регіону і включення його до енергобалансу країни.

Одеський регіон є одним з перспективних з використання енергії вітрових потоків і технологій відновлюваних джерел .

ВИСНОВКИ

1. Питання ефективної оцінки та використання альтернативних джерел енергії в сучасних схемах енергобалансу вже минуло межу мало-масштабності і навіть є позицією державних планів забезпечення енергетичного сектору країни(посилання).

Між іншим, розрахунки очікуваних величин вітрової енергії у більшості випадків виконуються на підставі співвідношень, які не враховують цілу низку факторів, що суттєво впливають на реалістичність відповідних оцінок.

2. В роботі розглянуті як прості оцінки, так і моделі вітрогенераторів із урахуванням очевидних невизначеностей у понятті швидкість вітрового потоку, яка визначає потужність генератора.

3. Встановлено, що взаємозв'язок між емпіричними картами, що визначають діаграми вітрових потоків і параметрами, які фігурують у модельних формулах, що параметризують роботу вітрогенератора не існує простих зв'язків. Показано, що прогностні значення енергії суттєво залежать від методики розрахунку. В той же час обмеження інтервалу швидкостей, в якому мають робитися відповідні оцінки очікуваної потужності ВЕП (причому, скоріше імовірнісні, ніж детерміновані), як знизу, так і верхньою границею, не впливають суттєво на результати прогнозу вітрової енергії, по меншій мірі, для Одеського регіону.

4. Оброблено значний за об'ємом емпіричний матеріал, який з урахуванням вищесказаного дозволяє оцінити перспективи вітрової енергетики, конкретно, на регіональному рівні.

5. Отримані оцінки потужності вітрових установок дозволяють зробити висновок, що використання енергії вітру може стати суттєвою складовою в енергетичному балансі альтернативних джерел енергії в Одеському регіоні.

Запропоновано враховувати отримані дані, при оцінці перспектив вітроенергетики як на рівні регіонів, так і у державному масштабі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посіб. / Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: ТЕС, 2018. 228 с.
2. Декларація Ріо-де-Жанейро щодо навколишнього середовища та розвитку від 16.06.1992 року // База даних «Законодавство України» / ВР України.
URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_455 (дата звернення 15.01.2017).
3. Закон України Про ратифікацію Паризької угоди від 14.07.2016 № 1469-VIII // База даних «Законодавство України» / ВР України.
URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1469-19#n2> (дата звернення 15.01.2017).
4. Сидорович В. Мировая энергетическая революция. Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир / Альпина Паблишер, 2015. 208с.
5. Халатов А. Энергетика України сучасний стан і найближчі перспективи // НАН України. 2016. № 6. С. 53-61.
6. Закон України Про Схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” від 18 серпня 2017 р. № 605-р // База даних «Законодавство України» / ВР України.
URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (дата звернення 23.08.2017).
7. Закон України Про альтернативні джерела енергії від 2003 року, № 24, ст.155 // База даних «Законодавство України» / ВР України.
URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15> (дата звернення 13.01.2017).

8. Васильев Ю. С., Хрисанов Н. И. Экология использования возобновляющихся энергоисточников / Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. 343 с.
9. Додаток 2 до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» від 18 серпня 2017 р. № 605-р // База даних «Законодавство України» / ВР України.
URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456> (дата звернення 23.08.2017).
10. BP Statistical Review of World Energy 2015 // Електронний ресурс
URL:<https://biomasspower.gov.in/document/Reports/BP%20statistical%20review-2015.pdf> (дата звернення 23.09.2016).
11. BP Statistical Review of World Energy June 2014 // Електронний ресурс
URL:https://www.bp.com/content/dam/bpcountry/de_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf (дата звернення 24.09.2016).
12. World Nuclear Association Report // Електронний ресурс
URL: <http://www.world-nuclear.org/> (дата звернення 24.09.2016).
13. Півняк Г., Шкрабець Ф. Нойбергер Н., Ципленков Д. Основи вітроенергетики: підручник / М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с
14. Grubb, M.J. and Meyer, N.I. Wind Energy: Resources, Systems and Regional Strategies. In: Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N. and Williams, R.H., Eds., Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity, Island Press, Washington DC, 1993, p.157-212.
15. OPEC Annual Statistical Bulletin 2015 // Електронний ресурс
URL:https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2015.pdf (дата звернення 24.09.2016).
16. Закон України Про електроенергетику від 06.10.1997 № 575/97 /

База даних «Законодавство України» / ВР України.

URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>

(дата звернення 23.08.2017).

17. Закон України Про внесення зміни до Закону України "Про електроенергетику" щодо коефіцієнтів "зеленого" тарифу для електроенергії, виробленої з використанням альтернативних джерел енергії від 22.12.2016 № 1804-VIII, діє з 01.01.2017 / База даних «Законодавство України» / ВР України.

URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1804-19#n2> (дата звернення 23.08.2017).

18. Закон України Про ринок електричної енергії від 13.04.2017 № 2019-VIII Із змінами і доповненнями, внесеними Законом України від 2 жовтня 2018 року N 2581-VIII / База даних «Законодавство України» / ВР України.

URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/T172019.html(дата звернення 02.12.2018).

19. Д. де Рензо, Зубарев В.В, Франкфурт М.О. / под редакцией Я.И. Шефтера. Вітроенергетика / М.: Энергоатомиздат, 1982, 270с.

20. Шкала Бофорта// Електронний ресурс

URL: <https://meteo.ua/vocabulary/shkala-boforta-539>(дата звернення 12.11.2018).

21. E-126 ENERCON// Електронний ресурс

URL:<https://www.enercon.de/en/products/ep-8/e-126>(дата звернення 10.11.2018).

22. [<http://saee.gov.ua/ae/windenergy>]

23. Ветроэнергетическая установка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.help-rus-student.ru/text/13/377.htm/>. – Загл. с экрана.]

24. Fifth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. Tashkent, Uzbekistan. - P. 279-284 (481) MATHEMATICAL MODEL OF WINDMILL Mungsyszbaï T.M.
25. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України// Електронний ресурс 22
URL: <http://saee.gov.ua/ae/windenergy> (дата звернення 07.07.2018).
26. НВПІП «ЕКО-СТ» // Електронний ресурс
URL: http://ecost.lviv.ua/ua/osnov_parametr.html (дата звернення 07.07.2017).
27. Гумен О. М., Довгалюк В. Б., Мілейковський В. О., Визначення інтенсивності турбулентності потоків з великомасштабними вихорами на основі геометричного та кінематичного аналізу макроструктури / Lviv Polytechnic National University Repository № 844, 2016.
28. Архів прогнозу погоди Одеської області // Електронний ресурс
URL: <https://www.gismeteo.ru/diary/4982/> (дата звернення 07.07.2017).
29. Фомічева М.В. Моделювання енергоємності і енергобаланса соціальних конгломератів на прикладі України. Матеріали наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ (02-08 травня 2018. Одеса: ТЕС –с.152].

ДОДАТОК А

Таблиця А.1

Частка найбільших країн в світових запасах викопного палива

Нафта		Газ		Вугілля	
Країна	Запаси, млрд. тонн	Країна	Запаси, трлн.м ³	Країна	Запаси, млн. тонн
Венесуела	46,6	Росія	49,5	США	237,3
Саудівська Аравія	36,7	Іран	34,0	Росія	157,0
Канада	27,9	Катар	24,5	КНР	114,5
Іран	21,7	Туркменістан	9,9	Австралія	76,4
Ірак	20,2	США	9,6	Індія	60,6
Росія	14,1	Саудівська Аравія	8,5	Німеччина	40,5
Кувейт	14,0	ОАЕ	6,1	Україна	33,9
ОАЕ	13,0	Венесуела	5,6	Казахстан	33,6
США	5,9	Нігерія	5,1	ЮАР	30,1
Лівія	5,3	Україна	0,9	Індонезія	28,0
Інші країни	48,5	Інші країни	47,4	Інші країни	79,6
Всього	239,8	Всього	201,14	Всього	891,5

ДОДАТОК Б

Усереднені за добу значення восьмирічної системи збору даних швидкості вітру за 2017 рік в Одесі (район аеропорту), Кілійському та Татарбунарському районах.

Таблиця Б.1

Середньодобова швидкість вітру м. Одеса (район аеропорту)

День	Середньодобова швидкість вітру по місяцям, м/с											
	Місяць											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4,7	4,9	6,3	4,7	4,0	5,5	7,2	3,6	5,6	8,9	9,4	5,5
2	5,5	2,8	4,0	3,1	3,5	5,4	4,2	3,6	7,7	5,6	5,7	9,4
3	5,8	5,8	3,3	3,6	4,8	3,5	8,1	3,0	6,2	4,0	6,2	13,5
4	9,5	4,2	5,6	2,7	4,3	3,2	9,8	6,2	6,5	7,4	4,5	9,6
5	5,7	4,0	8,3	2,6	4,2	2,4	4,9	5,5	5,3	8,1	5,6	6,7
6	14,3	3,8	8,6	4,3	3,8	2,9	3,0	5,2	3,2	9,8	7,3	8,9
7	13,1	10,5	4,7	7,5	3,0	3,3	7,1	7,1	4,6	8,8	5,8	7,4
8	3,9	11,5	6,1	10,6	5,2	4,7	3,4	7,9	3,9	9,7	6,5	9,7
9	6,0	10,4	4,7	9,3	5,1	5,7	5,2	7,1	4,3	3,3	5,8	9,9
10	6,1	8,1	6,0	4,7	7,1	4,9	4,7	6,1	7,1	2,6	3,2	10,0
11	9,5	7,9	4,3	6,8	7,1	7,6	3,7	7,2	5,9	4,1	7,2	7,4
12	6,3	6,8	6,1	3,7	8,6	5,3	8,7	3,9	7,9	5,6	6,2	8,6
13	6,9	5,8	7,7	4,8	6,1	7,2	2,7	4,9	5,8	12,2	6,7	10,4
14	10,0	7,9	8,1	5,2	7,6	5,7	5,2	7,3	6,3	9,0	5,7	5,7
15	5,1	9,7	4,9	5,2	7,2	9,3	3,8	7,7	4,9	5,1	6,8	7,1
16	6,1	4,0	5,7	6,0	3,1	5,9	4,6	7,7	4,3	6,7	5,5	8,6
17	11,2	5,2	4,0	8,6	6,8	6,8	5,5	4,7	4,2	4,8	6,0	5,2
18	11,4	4,8	7,0	13,8	3,9	5,5	5,3	4,6	5,2	3,8	7,9	3,8
19	7,7	2,3	5,9	6,8	3,8	5,3	4,2	4,5	7,9	5,3	4,6	7,5
20	5,2	6,1	5,8	13,6	3,9	5,2	1,6	9,6	5,9	5,4	5,9	9,2
21	6,6	5,7	2,7	9,6	5,0	4,7	4,2	3,9	6,3	3,2	5,8	6,7
22	4,2	6,6	3,6	7,4	4,7	7,8	3,8	5,9	3,5	10,5	4,2	3,1
23	2,7	7,0	3,0	4,3	3,6	6,1	3,6	6,3	6,0	8,7	3,3	2,6
24	3,4	7,4	5,9	7,3	2,7	6,0	3,9	5,6	3,5	4,6	3,6	5,3
25	8,3	6,3	4,7	6,9	3,5	3,7	2,9	4,4	6,2	9,5	6,9	3,1
26	9,7	5,8	2,9	5,7	2,9	4,8	4,9	5,4	11,2	4,5	8,9	3,2
27	6,2	3,5	6,2	5,3	4,0	2,4	8,6	8,1	10,9	6,7	11,4	8,0
28	4,2	5,8	6,1	4,6	5,3	3,6	5,2	6,7	9,2	13,8	8,5	6,8
29	5,1		4,8	5,0	2,8	5,3	10,2	8,2	8,7	12,5	10,8	12,2
30	6,1		7,4	2,2	5,0	4,1	5,3	6,0	6,7	13,9	7,2	13,1
31	3,3		4,5		5,4		4,7	5,6		9,3		6,9

ДОДАТОК В

Таблиця В.1

Середньодобова швидкість вітру Одеська область, Кілійський район

День	Середньодобова швидкість вітру по місяцям, м/с											
	Місяць											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4,0	3,8	5,8	3,1	4,4	3,9	6,6	3,3	4,5	4,4	4,1	3,1
2	4,0	2,1	4,6	3,5	3,2	3,5	5,1	3,2	4,1	3,4	3,0	7,2
3	3,6	6,4	2,1	3,7	4,1	3,7	7,3	2,2	3,7	2,1	3,1	8,0
4	4,7	3,4	5,5	3,5	3,1	3,8	7,5	4,1	4,7	4,2	2,7	4,8
5	4,1	1,8	7,4	2,9	3,1	3,1	3,0	4,0	3,3	6,1	3,2	3,8
6	12,7	2,8	7,0	4,3	2,7	2,8	3,8	4,4	2,1	7,1	3,6	5,3
7	10,6	5,3	4,0	7,3	3,0	2,6	4,2	4,7	3,6	4,2	3,0	5,0
8	6,5	9,1	6,4	8,9	4,1	3,3	2,5	4,7	2,7	7,0	4,1	6,2
9	4,6	7,4	4,8	7,6	4,5	4,5	3,6	5,4	3,7	2,6	3,2	4,6
10	6,0	5,8	5,0	3,8	4,8	4,3	4,5	3,5	5,1	2,5	2,4	6,1
11	6,4	6,0	5,6	6,2	5,6	5,2	4,1	5,3	3,6	2,7	4,6	4,6
12	4,3	5,3	5,9	4,5	6,9	3,8	7,1	3,4	6,2	2,6	3,3	5,2
13	4,9	5,0	7,8	4,0	4,4	4,9	2,9	3,7	4,2	4,3	4,3	7,7
14	6,3	6,0	7,9	4,1	7,3	3,7	4,8	3,8	2,9	4,6	3,0	4,1
15	3,8	8,0	3,8	4,3	5,3	5,4	3,2	6,3	2,8	3,3	3,8	5,5
16	5,5	3,4	5,6	5,4	3,3	4,0	3,6	5,6	3,4	3,4	4,0	5,7
17	8,7	5,0	5,1	7,5	6,7	3,7	5,8	4,5	2,6	3,1	3,6	3,5
18	8,5	3,5	6,1	6,9	3,5	4,5	5,4	4,0	2,5	1,9	4,7	1,6
19	6,2	3,4	4,9	5,0	3,8	5,0	3,8	4,3	5,2	3,1	2,7	4,3
20	3,6	4,8	3,8	8,7	3,8	4,1	1,5	6,3	2,7	4,8	2,9	7,2
21	4,6	5,2	2,9	9,7	5,4	3,0	1,3	4,2	3,1	2,4	3,4	5,4
22	3,0	5,2	4,1	5,8	3,9	6,3	2,9	4,0	1,8	6,0	2,7	2,7
23	1,8	6,7	3,4	4,2	3,6	4,7	2,2	3,1	1,8	3,3	2,3	3,1
24	2,8	5,5	4,9	5,1	3,2	5,1	2,9	2,7	2,1	3,1	2,9	3,7
25	5,7	4,7	4,6	6,9	4,3	2,5	3,7	2,9	3,9	6,3	4,6	3,2
26	7,1	4,8	3,2	5,7	3,2	4,4	3,9	2,7	7,0	2,3	4,5	3,1
27	5,0	2,7	5,5	5,0	3,2	3,1	5,3	5,6	6,9	3,1	3,1	4,4
28	2,8	5,2	5,0	4,9	5,0	2,7	4,2	4,5	6,4	7,5	5,1	4,7
29	2,8		3,6	5,0	3,4	5,5	5,7	4,8	5,8	6,0	6,5	9,9
30	4,4		7,0	2,4	3,8	4,2	3,8	3,6	4,5	6,8	6,8	11,3
31	2,6		4,4		2,7		4,2	3,9		4,2		6,1

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1

Середньодобова швидкість вітру Одеська область, Татарбунарський район

День	Середньодобова швидкість вітру по місяцям, м/с											
	Місяць											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4,2	5,0	5,7	3,5	4,5	4,5	7,0	3,4	4,9	5,4	5,7	3,6
2	4,0	2,0	4,2	3,7	3,3	3,4	4,2	2,9	6,4	3,4	3,9	7,2
3	3,9	4,4	2,1	3,9	3,8	3,3	7,3	2,6	4,6	2,8	3,7	8,9
4	5,5	3,8	5,8	3,1	3,0	3,5	7,6	6,3	5,1	5,0	3,3	5,9
5	4,5	2,2	7,8	2,8	3,7	2,9	3,4	4,4	4,4	7,5	3,8	4,3
6	12,4	2,8	7,0	4,1	3,0	2,7	3,2	4,6	2,8	7,9	4,5	5,6
7	10,9	7,6	4,1	7,5	3,0	2,8	4,3	5,3	3,9	6,2	3,6	4,6
8	5,1	9,0	5,7	10,1	3,7	3,8	5,9	6,0	3,3	8,3	4,9	6,7
9	4,4	7,2	4,3	6,7	4,7	4,9	4,4	6,4	3,9	3,2	4,2	6,2
10	6,1	5,9	5,2	4,1	5,0	4,1	4,5	4,1	6,2	2,5	3,1	7,0
11	6,9	5,7	5,3	6,4	5,8	5,6	3,8	6,0	4,2	3,2	5,4	5,5
12	5,1	4,8	5,3	4,1	7,3	4,3	7,1	3,8	7,2	3,4	4,3	6,2
13	5,3	4,6	7,6	4,9	5,0	4,9	3,1	4,2	4,9	5,7	5,1	7,8
14	6,7	6,0	7,9	4,6	6,8	4,2	4,1	5,8	4,4	6,2	3,8	4,0
15	4,1	7,7	4,0	4,4	5,9	6,4	3,6	6,9	3,0	3,6	4,4	5,6
16	4,4	2,8	5,9	5,1	3,2	4,3	3,2	6,5	4,2	4,4	4,3	6,2
17	8,6	4,9	4,8	6,9	5,8	3,8	5,2	4,5	3,2	3,8	4,2	3,7
18	8,4	3,5	6,2	7,7	3,0	4,8	4,6	4,3	3,5	2,5	5,5	2,4
19	5,8	2,6	5,4	5,1	3,6	4,8	3,7	3,9	6,2	4,1	2,9	5,0
20	3,7	5,2	4,3	11,1	4,0	4,7	1,3	7,7	2,1	5,6	3,4	6,9
21	5,4	5,4	2,9	9,0	5,2	3,6	2,3	4,6	3,7	2,8	4,4	5,0
22	2,8	5,7	4,2	5,7	4,1	6,8	3,8	4,4	1,6	7,7	3,0	2,2
23	2,2	7,1	3,7	4,2	3,7	4,6	3,1	3,7	2,7	6,0	2,4	2,8
24	3,0	7,4	5,2	5,5	3,5	5,3	4,0	3,8	2,5	2,8	3,3	3,3
25	6,6	4,9	4,5	6,9	4,2	2,7	3,2	3,7	4,6	7,0	5,4	2,7
26	7,1	5,2	2,6	6,3	3,2	4,9	3,9	4,1	8,4	2,9	5,7	2,9
27	4,9	2,6	5,8	5,2	3,8	3,0	6,7	6,6	8,0	6,7	6,4	4,9
28	2,5	5,4	5,4	5,2	5,1	3,2	4,3	5,1	7,0	8,0	5,8	5,1
29	3,0		3,8	5,0	3,3	5,5	7,5	5,7	6,4	7,1	7,4	9,6
30	4,6		6,7	2,4	4,2	3,8	4,2	4,0	5,3	8,6	7,9	10,9
31	3,1		4,2		2,8		4,2	4,1		4,9		5,6