МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
за освітньо-професійним рівнем «магістр»

«ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕУ ТА НОВИЙ ПОГЛЯД НА ВІДНОВЛЮВАНУ ЕНЕРГЕТИКУ»

Виконала студентка 2 курсу, групи НФ-61
Шамес О. Г.
Спеціальність
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма: Прикладна фізика енергетичних систем.
Керівник: Кулик О.П.

Рецензент: Подшивалова О.В.

Харків - 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет _____фізико-енергетичний_____
Кафедра __ фізики нетрадиційних енерготехнологій і екології_____
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) _магістр____
Напрям підготовки_____105 прикладна фізика та наноматеріали_____
Спеціальність _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.І. Ткаченко_
підпис ініціали, прізвище

"____" _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Шамес Орина Геннадіївна
(прізвище, ім'я, по-батькові студента)

1. Тема роботи: «Технічні характеристики ВЕУ та новий погляд на відновлювану енергетику»__

Керівник роботи Кулик Олександр Петрович, канд. фіз.-мат. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від _____ 2019 року №_____

2. Строк подання студентом роботи _____ 2019

3. Перелік питань, які потрібно розробити: ознайомитися з літературними даними про сучасний стан розвитку вітроенергетики в Україні та світі; провести аналітичний огляд технічних характеристик традиційних вітрових енергетичних установок (ВЕУ) встановленою потужністю до 10 кВт та проаналізувати коефіцієнти використання встановленої потужності ВЕУ на прикладі однієї зі Східноєвропейських країн; проаналізувати концепцію малої ВЕУ з концентратором повітряного потоку, її переваги та недоліки у порівнянні з традиційними ВЕУ подібного класу; дослідити шляхи удосконалення розглянутої ВЕУ та перспективи її використання з аеродинамічною системою типу крила.

4. План роботи

№/п	Назви етапів роботи
1	Аналіз даних про розподіл вітрового потенціалу та стан розвитку вітроенергетики у світі та в Україні
2	Аналітичний огляд технічних характеристик традиційних вітрових енергетичних установок (ВЕУ) встановленою потужністю до 10 кВт на прикладі Хорватії
3	Проведення оцінки коефіцієнтів використання встановленої потужності малих ВЕУ на прикладі Хорватії
4	Аналіз концепції малої ВЕУ з концентратором повітряного потоку, її переваг та недоліків у порівнянні з традиційними ВЕУ подібного класу
5	Дослідження шляхів удосконалення розглянутої ВЕУ та перспектив її використання з аеродинамічною системою типу крила. Висновки.

5. Дата видачі завдання _____ 2019

Студент _____ О.Г. Шамес___
підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ О. П. Кулик_____
підпис ініціали, прізвище

Реферат

Шамес Орина Геннадіївна «Технічні характеристики ВЕУ та новий погляд на відновлювану енергетику» (дипломна робота магістра). – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2019 – 68 с.

Робота складається з вступу, 3 розділів і висновків; містить 24 рисунка, 7 таблиць, 5 графіків, 2 гістограми, 1 кругову діаграму, список використаних джерел з 18 найменувань.

На основі розробленої вітроенергетичної установки закритого типу з концентратором повітряного потоку досліджено концепт малої ВЕУ з аеродинамічною системою типу крила. Удосконалення турбіни ВЕУ за рахунок зменшення кількості лопатей дозволило збільшити її швидкохідність і забезпечити роботу з оптимальною ефективністю. Запропонована модернізація конструкції розглянутої ВЕУ з використанням надлегких і міцних сучасних конструкційних матеріалів показала перспективність її використання з аеродинамічною системою типу крила у приповерхневих шарах атмосфери.

Ключові слова: вітрова енергетика, вітрова електроустановка малої потужності, «летюча» ВЕУ, підйомна сила, гондола турбіни, відновлювана енергетика, електрогенератор постійного струму.

Abstract

Shames Oryna "Technical characteristics of wind turbines and a new look at renewable energy" (master's t degree graduation work). - : V. N. Karazin Kharkov National University, 2019 - 68 p.

The work consists of an introduction, 3 chapters and conclusions; contains 24 figures, 7 tables, 5 graphs, 2 histograms, 1 pie chart, a list of sources used with 18 names.

The concept of a small wind turbine with a wing type aerodynamic system was investigated on the basis of the developed closed-type wind power plant with an air flow concentrator. Improvement of the wind turbine by reducing the number of blades made it possible to increase its speed and ensure optimal efficiency. The proposed modernization of the design of the considered wind turbine with the use of ultra-lightweight and durable modern structural materials showed the prospect of its use with the aerodynamic wing-type system in the surface layers of the atmosphere.

Keywords: wind power, low power wind power, volatile wind turbine, lift, turbine gondola, renewable energy, direct current generator.

ЗМІСТ

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1 9

СУЧАСНИЙ СТАН ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ..... 9

1.1 Загальний огляд вітроенергетичного потенціалу 9

1.2 Класифікація ВЕУ за потужністю і їх внесок в енергетичну галузь України…. 17

1.3 ВЕУ встановленою потужністю до 10 кВт 25

1.4 Малі аеродинамічні системи типу аеростату..... 30

РОЗДІЛ 2 33

МАЛА ВЕУ З КОНЦЕНТРАТОРОМ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ..... 33

2.1 Аеродинамічні особливості конструкції гондоли 34

2.2 Електрогенератор постійного струму..... 40

2.3 Результати натурних та модельних досліджень ВЕУ з конфузором…… 42

РОЗДІЛ 3 47

КОНЦЕПТ ВЕУ З АЕРОДИНАМІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ТИПУ КРИЛА 47

3.1 Удосконалення ВЕУ з конфузором..... 47

3.2 Аналіз коефіцієнта використання встановленої потужності 55

3.3 Аналіз залежності швидкості вітру від висоти..... 60

3.4 Аеродинамічна ефективність «летючої» ВЕУ 61

ВИСНОВКИ..... 66

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 67

ВСТУП

Пошук альтернативних джерел енергії – основне завдання сучасної сучасної енергетичної галузі в усіх розвинених країнах світу. Копалини, які які зберігаються в земних надрах, і стрімкими темпами використовуються у використовуються у якості джерел енергії, близькі до виснаження. Економічний розвиток промислових галузей і комфортне існування людини людини залежить від пошуку і розробки нових поновлюваних джерел енергії. енергії. Одним з таких джерел безперечно є вітер, а одним з господарсько-господарсько-еконономічних напрямків діяльності людини, спрямованих на спрямованих на отримання енергії з вітру, є вітроенергетика.

Використання вітроенергетики в генерації електрики є зараз поширеним поширеним явищем в технологічно розвинених країнах світу. Повітряним Повітряним масам притаманна певна кінетична енергія, що перетворюється перетворюється вітровими генераторами. Чим більші їх лопаті і площа охоплення повітряного простору, тим потужніше і ефективніше установка. установка. Основна перевага такого пристрою полягає в невичерпності ресурсу, адже вітер на Землі буде існувати стільки, скільки буде світити Сонце. Сонце. Вітер виникає від нерівномірного нагріву поверхні Землі Сонцем, через Сонцем, через що виникає неоднаковий розподіл тиску на поверхні, повітряний потік буде рухатися від місць з великим тиском, в напрямку, де де тиск менше.

Вітер – це чисте, вільне та доступне відновлюване джерело енергії. Щодня по всьому світу вітрогенератори захоплюють енергію вітру та переробляють її на електроенергію. Кількість вітроенергетичних установок установок продовжує зростати у всьому світі. За даними Глобальної ради з ради з вітроенергетики, в кінці 2014 року встановлено понад 360 000 МВтпотужностей по всьому світу. До провідних країн належать Китай, США

США та Німеччина. Потенціал морського вітру продовжує зростати, займає лідируючі позиції з відміткою в 91% встановлених офшорних потужностей. Попит на такий вид вітроелектростанцій зростає в міру вдосконалення технологій та зниження витрат.

До 2050 року попит на енергію може подвоїтися або навіть потроїтися в міру зростання світового населення та розширення країн, що розвиваються. Все життя на землі залежить від енергії та кругообігу вуглецю. Доступні енергоресурси мають важливе значення для економічного та соціального розвитку, а також для виробництва продуктів харчування, забезпечення водопостачання та сталого здорового життя. Щоб уникнути довготривалого несприятливого та потенційно незворотного впливу збору енергоресурсів, ми повинні вивчити всі аспекти виробництва та споживання енергії, включаючи енергоефективність, способи отримання енергії від відновлюваних джерел енергії, зв'язок видобутку вичерпних джерел з проблемами клімату та загалом способи їх вирішення.

Пріоритетом національної політики є орієнтація на збереження та зростання ефективності енергетичних джерел, а другим пріоритетом є необхідність переходу від викопного палива до відновлюваної енергії. Кількість країн, що розвиваються з кожним роком зростає, тож незабаром викиди парникових газів будуть ще більшими, таке використання викопних палив не може довго тривати, адже це зможе призвести до катастрофи всесвітнього масштабу.

Основною зміною в сучасному світі стало велике щорічне збільшення використання енергії вітру. На кінець 2012 року на вітроелектростанціях встановлено близько 180 000 вітрових турбін, встановленою потужністю 282 ГВт, було використано близько 900 000 малих вітрових турбін(до 100 кВт) потужністю 850 МВт. Енергія вітру стала частиною рішення щодо переходу на відновлювані джерела енергії, особливо для зменшення використання викопного палива.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

1.1 Загальний огляд вітроенергетичного потенціалу

Вітроенергетика – одна з найбільш швидко зростаючих технологій відновлюваної енергії. Її використання зростає у всьому світі, частково через зниження витрат. Глобальна встановлена потужність виробництва вітру на суші та на березі моря зросла майже в 75 разів за останні два десятиліття, піднявшись з 7,5 гігават (ГВт) у 1997 році до 564 ГВт до 2018 року, згідно з останніми даними IRENA [1]. Виробництво вітрової електроенергії вдвічі збільшилося між 2009 та 2013 роками, а в 2016 році вітроенергія становила 16% електроенергії, виробленої відновлюваними джерелами енергії. Багато куточків світу мають високі швидкості вітру, але найкращі місця для отримання енергії вітру іноді віддалені. Вітряна енергетика на березі моря пропонує величезний потенціал.

Вітрові турбіни вперше з’явилися більше століття тому. Після винаходу електричного генератора в 1830-х роках інженери почали намагатися використовувати енергію вітру для виробництва електроенергії. Виробництво вітрової енергії відбулося у Великобританії та США у 1887 та 1888 роках, але вважається, що сучасна вітроенергетика вперше була розроблена в Данії, де в 1891 році були побудовані вітрогенератори з горизонтальною віссю та 22,8-метровий вітрогенератор почав роботу у 1897 році.

Вітрогенератор (вітрова електроустановка, далі ВЕУ) – це пристрій для перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну енергію обертання ротора з подальшим її перетворенням в електричну енергію.

При проходженні вітру через турбіну, лопаті, за рахунок кінетичної енергії, починають обертатися, це приводить до обертання внутрішній вал, який з'єднаний з редуктором. Редуктор збільшує швидкість обертання валу, коли він при цьому підключений до генератора. Ротор генератора обертаючись виробляє трифазний змінний струм, який необхідно перетворити. З цією метою в конструкції передбачений контролер. Він перетворює змінний струм в постійний, від якого заряджаються акумуляторні батареї. Проходячи через них струм надходить на інвертор, де набуває характеристик, прийнятних для роботи електроприладів. З постійного він знов стає змінним, але вже з іншими показниками: однофазним з напругою 220 Вт і частотою 50 ГЦ.Кількість потужності, яку можна зібрати від вітру, залежить від розміру турбіни та довжини її лопатей. Вихід пропорційний розмірам ротора і кубу швидкості вітру. Теоретично, коли швидкість вітру подвоюється, потенціал вітрової енергії збільшується у вісім разів.

Потужність вітрогенератора з часом зросла. У 1985 році типові турбіни мали номінальну потужність 0,05 мегават (МВт) і діаметр ротора 15 метрів. Сьогодні нові проекти вітроенергетики мають турбінну потужність близько 2 МВт на суші та 3-5 МВт на морі.Наявні у продажу вітрогенератори досягли потужності 8 МВт, діаметром ротора до 164 метрів.

За період, починаючи з 1980 року по 2004 рік одинична потужність серійних установок зросла з 50 кВт до 5000 кВт, відповідно збільшилися й габарити установок: діаметр ротора з 15 м до 124 м, а висота башти з 15 м до 120 м. Зі збільшенням діаметрів ротора відповідно зменшується швидкість його оберту: від 140-92 об/хв, для малих ВЕУ до 15-13 об/хв. для ВЕУ потужністю трьох і більше МВт. Зниження швидкості обертів обумовлено необхідністю обмежити швидкість кінця лопаті, яка створює аеродинамічний

шум і є джерелом вібрації лопаті. Динаміка змін основних параметрів ВЕУ зображена в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Динаміка основних параметрів ВЕУ

Параметр/Рік	**1980**	**1985**	**1990**	**1995**	**2000**	**2005**	**2007**
Номінальна потужність, кВт	30	80	250	600	1500	5000	7000
Діаметр ротора, м	15	20	30	46	70	115	164
Висота маточини, м	30	40	50	78	100	120	135
Річне виробництво електроенергії, ГВт*ч	0,35	0,95	0,40	1,25	3,5	17,0	24,1

Різні компанії почали виготовляти вітроустановки від 1 до 4,5 МВт з функцією змінювання швидкості обертання для того, аби збільшити використання енергії вітру на 10-15%. Це стало можливим завдяки застосуванню так званих асинхронизованих генераторів та відповідних перетворювачів частоти [2].

Вітроенергетика наразі є важливим джерелом для вироблення енергії у всьому світі, глобальна потужність якої сягала понад 600 ГВт у 2018 році. Будівництво нової вітроенергетики змінюється з року в рік та залежно від регіону; наприклад, Європа побачила скорочення потужності вітру на 32% порівняно з 2017 роком.

Проаналізуємо 10 країн, які мають найбільшу потужність в вітроенергетиці:

1) Китай – встановлена потужність 221 ГВт. Китай сьогодні є світовим лідером у галузі вітроенергетики, маючи понад третину встановлених потужностей світу. Адже він може представити світу найбільшу світову вітроелектростанцію в провінції Ганьсу, яка має потужність 7 965

МВт, вона зображена на рисунку 1.1, що в п'ять разів перевищує її найближчого конкурента. В даний час ферма працює лише на 40% своєї потужності, а в подальшому буде встановлено13000 МВт, що призведе до загальної суми в 20 000 МВт (20 ГВт) в 2020 році. Очікується, що це розширення обійдеться в $ 17,5 млрд[3].



Рис. 1.1 – Комплекс ВЕС Ганьсу, Китай

2) США – встановлена потужність 96,4 ГВт. США займають друге місце з встановленою потужністю 96,4 ГВт і особливо сильні у вітровій енергії на узбережжі. Шість з 10 найбільших морських вітрових ферм базуються саме в США. До них відносяться вітровий енергетичний центр "Альта" в Каліфорнії, друга за величиною в світі прибережна вітроелектростанція потужністю 1548 МВт, Shepherd’s Flat Wind Farm, що розташована в штаті Орегон (845 МВт) і вітроелектростанція Роско в Техасі (781,5 МВт).Тільки штат Техас виробляє чверть енергії вітру США з 24,9 ГВт, забезпечуючи

більше енергії вітру, ніж 25 інших штатів США разом, зображена на рисунку 1.2 [3].



Рис. 1.2– Вітроелектростанція Роско, Техас

3) Німеччина – встановлена потужність 59,3 ГВт. Німеччина має найвищу встановлену потужність вітру в Європі з 59,3 ГВт. Найбільшими його морськими вітроенергетичними осередками є вітрові зброї Gode (фаза 1 та 2), що мають загальну потужність 582 МВт. У Німеччині також знаходиться вітровий парк Nordsee One Offshore, що має потужність 382 МВт та забезпечує енергією понад 400 000 будинків. Вона представлена на рисунку 1.3. За даними Wind Europe, Європа встановила 11,7 ГВт вітрової енергії у 2018 році. Саме тому Німеччина посіла лідируючі позиції з 29% цієї потужності в цілому трохи менше 3,4 ГВт, при цьому 2,4 ГВт цього наземні, і трохи менше – 1 ГВт офшорні вітроелектростанції [3].



Рис. 1.3– Nordsee One Offshore, Німеччина

4) Індія – встановлена потужність 35 ГВт. Ця країна має другу за швидкістю потужність вітру в Азії і є єдиною східною країною, окрім Китаю, яка внесла цей список, загальною потужністю 35 ГВт. В Індії є за величиною наземні вітроелектростанції, що посідають 3 та 4 місце у світі, вітряна компанія Muppandal у Таміл Наду, Південна Індія (1500 МВт) та вітровий парк Джайсалмеру в штаті Раджастан, Північна Індія (1064 МВт).Індійський уряд поставив мету встановити 60ГВтенергії вітру до 2022 року, враховуючи те, що 25ГВт буде встановлено протягом наступних трьох років [3].

5) Іспанія – встановлена потужність 23ГВт. Дана країна є потужним виконавцем енергії вітру, потужністю 23 ГВт покриває 18% електропостачання Іспанії. Ця країна займає п’яте місце у світі, хоча жодна з

морських або наземних вітроелектростанцій не входить у топ-20 за величиною та за потужністю. За останні кілька років вітроенергетика в Іспанії насправді сильно занепала. Тільки 104 МВтбуло додано до своєї енергетичної суміші у 2016-2017 роках після того, як у 2015 році нічого не було додано. Кількість робочих місць в секторі також зменшилася з приблизно 41 500 в 2008 році до приблизно 22 500 людей [3].

6) Великобританія – встановлена потужність 20,7 ГВт. Великобританія є третьою європейською країною у списку, вона особливо примітна в офшорній вітроенергетиці, з 6 з 10 найпотужніших вітроенергетичних проектів в світі. Одним з таких є проект Walney біля узбережжя Камбрії, Північно-Західна Англія. Це найбільший морський вітровий проект у світі: Walney 1 & 2 (367МВт) та Walney Extension (659МВт), рисунок 1.4, утворюють загальну суму 1026 МВт. Установка Walney буде охоплена проектом 1,218 МВт Hornsea One в Північному морі після її завершення в 2020 році [3].



Рисунок 1.4 – Walney Extension, Північно-Західна Англія

7) Франція –має встановлені 15,3 ГВт потужностей. Франція займає сьоме місце в списку 10 найпотужніших країн вітроенергетики за потужністю. Наразі вона відходить від ядерної енергетики, яка раніше доставляла 75% енергетичних потреб країни, і заповнить прогалину, збільшивши її поновлюваний бюджет до 71 млрд. євро на період 2019-2028 років. Це дозволить йому втричі збільшити потужність наземних вітроелектростанцій до 2030 року [3].

8) Бразилія – встановлена потужність 14,5 ГВт. Бразилія має найбільшу потужність вітру в Південній Америці – 14,5 ГВт і значно розширює свої потужності. Останні дані показують, що в лютому 2019 року енергія вітру зросла на 8,9% у річному обчисленні. Енергія вітру займає четверте місце в загальній енергетичній сумі Бразилії, утворюючи близько 8% загальної енергетичної потужності Бразилії – 162,5 ГВт [3].

9) Канада – встановлена потужність 12,8 ГВт. Потужність відновлюваної енергії в Канаді становить 12,8 ГВт, а в 2018 році було додано 566 МВт нових встановлених потужностей. Ця енергія виробляється в цілому 299 вітровими електростанціями з 6596 турбінами. Онтаріо має найбільшу кількість енергії вітру, з встановленою потужністю трохи більше 5 ГВт. До них відносяться вітропарк в регіоні Ніагара потужністю 230 МВт і вітропарк в амарант потужністю 199,5 МВт на північ від Торонто.Найбільша вітроелектростанція в Канаді - це проект Rivière-du-Moulin в Квебеку, загальна потужність якого становить 300 МВт. Вітрова енергія забезпечує близько 5% поставок відновлюваної енергії в Канаді, а гідроенергетика випереджає 67,5% [3].

10) Італія – встановлена потужність 10,1 ГВт. На десятому місці знаходиться Італія, яка в 2018 році досягла трохи більше 10 ГВт за потужністю вітроенергетики. До недавнього часу енергія вітру в Італії повністю генерувалась за допомогою вітру на суші, але в цьому місяці німецький виробник вітряних турбін Senvion підписав угоду з Renexia про будівництво

першої прибережної ферми біля узбережжя Апулії на півдні Італії. Вітрова промисловість Італії в основному зосереджена на півдні і на островах. Наприклад, вся вітрова потужність італійської енергетичної компанії ERG розташована на південь від Риму, а найбільшими ринками збуту є Апулія (248,5 МВт) і Кампанія (246,9 МВт) [3].

1.2 Класифікація ВЕУ за потужністю і їх внесок в енергетичну галузь України

Існує два принципово різних типу вітрових електростанцій – це конструкції з горизонтальною або вертикальною віссю оберту. Вітроустановки з горизонтальною віссю складають близько 98% всіх вітрових установок. Перевагою турбіни з вертикальною віссю є той факт, що все інше обладнання, таке як генератор та коробка передач, не обов’язково повинні бути на вершині башти, як це зазвичай буває в генераторах з горизонтальною віссю.

Найбільш поширеними установками з вертикальною віссю обертання є вітряки з роторами Дар’є, Савоніуса, Масгрува, Еванса та чашкові ротори. Обертальний момент в таких роторах створюється підйомною силою, яка досягає максимуму, коли лопать з великою швидкістю перетинає повітряний потік, що набігає. Приклади таких роторів зображені на рис. 1.5, 1.6, 1.7.



Рис. 1.5 – Ротор Савоніуса



Рис. 1.6 – Ротор Дар’є



Рис. 1.7 – Чашковий ротор

По рівню ефективності перші позиції займають вітрогенератори з горизонтальною віссю обертання, тому що вони отримують повну енергію вітряного потоку, що діє на всю площину лопатей. Аби знижувати фронтальне навантаження на щоглу потрібно обмежувати кількість лопатей, адже при великих розмірах ВЕУ тиск на крильчатку, що обладнана великим числом лопатей перевищить допустиму межу, і щогла зламається. Приклад ВЕУ з горизонтальною віссю обертання зображено на рис. 1.5.



Рис. 1.5 – ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

Класифікація ВЕУ за потужністю та іншими основними параметрами зазначена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація ВЕУ та їх основні параметри

Клас ВЕУ	**Діапазон потужностей, кВт**		**Діапазон діаметрів вітроколеса, м**		**Діапазон швидкостей обертання вітроколеса, об/хв.**	
Дуже малі	0,025	1	0,5	2,5	2000	500
	1,5	10	3,0	9,0	500	200
Малі	20	60	10	15	140	92
	75	150	18	24	60	40
Середні	200	300	26	30	40	40
	400	500	35	40	35	30
Великі	600	750	43	48	30	30

	900	1300	50	64	32	20
Дуже великі	1500	3000	70	90	20	15
	4000	5000	105	124	15	13

Найпотужніша вітрова електроустановка SiemensSWT-7.0-154, вона має площу обмітання 186000 м^2 та генерує максимальну потужність 7МВт коли вітер досягає швидкості в 13-15 м/с, діаметр її ротора з лопатями складає 154 м. Даний вітряк починає працювати коли швидкості вітру сягають 3-5 м/с, при швидкостях 25 м/с робота генератора зупиняється. Лопаті обертаються приблизно 5-12 разів за одну хвилину, в залежності від швидкості вітру.

Україна займає 25 місце у світі та 14 в Європі за обсягами виробництва вітрової електроенергії і вважається лідером Східної Європи. Вітровий потенціал України становить – 16-24 ГВт, найбільш перспективними регіонами є південний та південно-західний, де середньорічна швидкість вітру на висоті 80 метрів перевищує 7,5 м/с. Взагалі, оптимальна швидкість вітру для економічно-вигідного використання вітроелектростанцій знаходиться в діапазоні від 4 до 25 м/с, це цілком відповідає середнім швидкостям вітру по Україні. Наша країна має досвід використання енергії вітру ще з тридцятих років минулого сторіччя. Станом на 2019 рік встановлено вітроелектростанцій загальної потужності 777 МВт.

У 2012 році компанія ДТЕК побудувала найбільшу в Україні вітроелектростанцію – Ботієвська ВЕС, потужністю 200 МВт. До 2020 року компанія має в планах завершити будівництво Приморської ВЕС, потужністю 200 МВт та Орловської ВЕС на 100 МВт. Розглянемо найбільші вітроелектростанції України детальніше.

Ботієвська ВЕС**.** Дана ВЕС є найпотужнішою наземною станцією, що виробляє енергію з вітру в Україні, також вона входить в топ-5 найбільших наземних ВЕС Східної та Центральної Європи. Вона розташована в Запорізькій області, в Приазовському районі, біля села Приморський Посад. Будівництво було здійснено у 2 етапи: в 2012 році в грудні були запущені в роботу 30 вітряків, і в квітні 2014 року ще 35. На електростанції встановлено

65 турбін датської компанії Vestas,модель – V112–3/0. Характеристики турбін зазначені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Робочі характеристик турбіни Vestas

Робочі характеристики:	**Значення:**
Номінальна потужність	3 000 кВт
Мінімальна швидкість вітру	4 м/с
Номінальна швидкість вітру	12 м/с
Критична швидкість вітру	23 м/с
Швидкість вітру зупинки	25 м/с
Діапазон робочих температур	від -20° до +35° С

Діаметр ротора становить 112 м, площа, що охоплюється – 9 852м^2 Номінальні обороти:13,8 об/хв., робочий інтервал: 8,1 – 19,0 об/хв. Частота 50 Гц, генератор з постійним магнітом. Висота турбіни становить 94 м, а загальна висота конструкції 149 м. Довжина однієї лопаті становить 55 м. Підвищувальний трансформатор, розташований у гондолі, підвищує напругу із 650 В до 35 кВ і через високовольтні кабелі, розміщені у вежі вітрової турбіни, електричний струм передається в розподільчий пристрій у нижній секції вежі[4].

За даними спостереження середня швидкість вітру, що була зареєстрована на висоті 70 метрів становила 7,3-7,7 м/с [5]. Кількість енергії, що повинна видавати електростанція має бути на рівні 686 млн кВт*год електроенергії в рік. Наразі дана вітроелектростанція забезпечує електроенергією південь Запорізької області, а раніше частину АР Крим (до його анексії). Дані по виробленню електроенергії з 2013-2018 рр. зазначені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Генерація електроенергії на Ботіївській ВЕС

Рік	**Генерація електроенергії, млн. кВт*год.**
2013	267,7
2014	651,5
2015	634

2016	608,4
2017	634,1
2018	665,6

Фото Ботієвської електростанції представлено на рисунку 1.6.



Рис. 1.6 – Ботієвська ВЕС

Приморська вітрова електростанція. Діюча ВЕС, що знаходиться в селі Борисівка Приморського району Запорізької області, загальної потужності 200 МВт, зображена на рис. 1.7. Даний вітропарк складається з 2 черг будівництва, кожна по 26 вітротурбін, по 100 МВт на кожну чергу. Запуск першої черги Приморська ВЕС–1 був в лютому 2019 року, станцію було підключено до Об'єднаної енергетичної системи України [6].



Рис. 1.7 - Приморська вітрова електростанція

Станом на 1.04.2019 цими турбінами вже було вироблено 12,3 млн кВт*год. Будівництво Приморської ВЕС–2 планують завершити восени 2020 року. Основні характеристики Приморської ВЕМ представлені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Характеристики Приморської ВЕС

Характеристика	**Параметр**
тип ВЕС	наземна
генеруюча потужність, МВт	200
середньорічне виробництво, млн. кВт*год	650-700
кількість і марка генераторів	65×Vestas V112
потужність генераторів, МВт	3,8

Розвиток вітроенергетики в Україні наразі знаходиться в активному стані. Представимо дані розвитку вітроенергетики по областях станом на 2018 рік на діаграмі на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 –Розвитку вітроенергетики по областях України станом на 2018 рік

За даними 2018 року встановлена потужність вітроелектростанцій становить 394,7 МВт. Це займає 18,6 % від частки встановлених потужностей відновлюваних джерел енергії. Генерація вітроелектроенергії – 1181,077 млн. кВт*год. Генерація електроенергії – 42,3% частки від відновлюваних джерел енергії [6].

1.3 ВЕУ встановленою потужністю до 10 кВт

До категорії малих ВЕУ відносяться вітроустановки потужністю до 10 кВт. Їх головна ціль – забезпечення електроенергією віддалені райони та селища, об’єкти різного народногосподарського призначення, наприклад, зарядка акумуляторів, електроживлення дачних ділянок, малих сільськогосподарських об’єктів, заправок, об’єктів МЧС, військових відділень та інших об’єктів, які потребуються в електропостачанні [2].

Загальна встановлена потужність малих ВЕУ досягла 443,3 МВт на кінець 2010 року. Середня встановлена потужність по країнам склала: Китай – 0,37 кВт, Великобританія – 2,0 кВт, США – 1,24 кВт [7].

До головних вимог для малих ВЕУ відносять:

- низька питома вартість одного кіловату встановленої потужності, отже доступна ціна;
- висока кількість виробленої енергії в районах з відповідною середньорічною швидкістю;
- вироблена електроенергія має відповідати встановленим стандартам якості;
- проста в технічному обслуговуванні та монтажі;
- не потребує великих площ для встановлення;
- шум, що створює вітроелектроустановка не повинен перевищувати встановлених значень;
- вітроелектроустановка має мати функцію спільної роботи разом з додатковим електроустаткуванням, що зможе розширити функціональні можливості та головне забезпечити безперебійне живлення електроенергією споживачів[7].

Класична компоновка вітроустановки малої потужності зображена на рисунку 1.9.

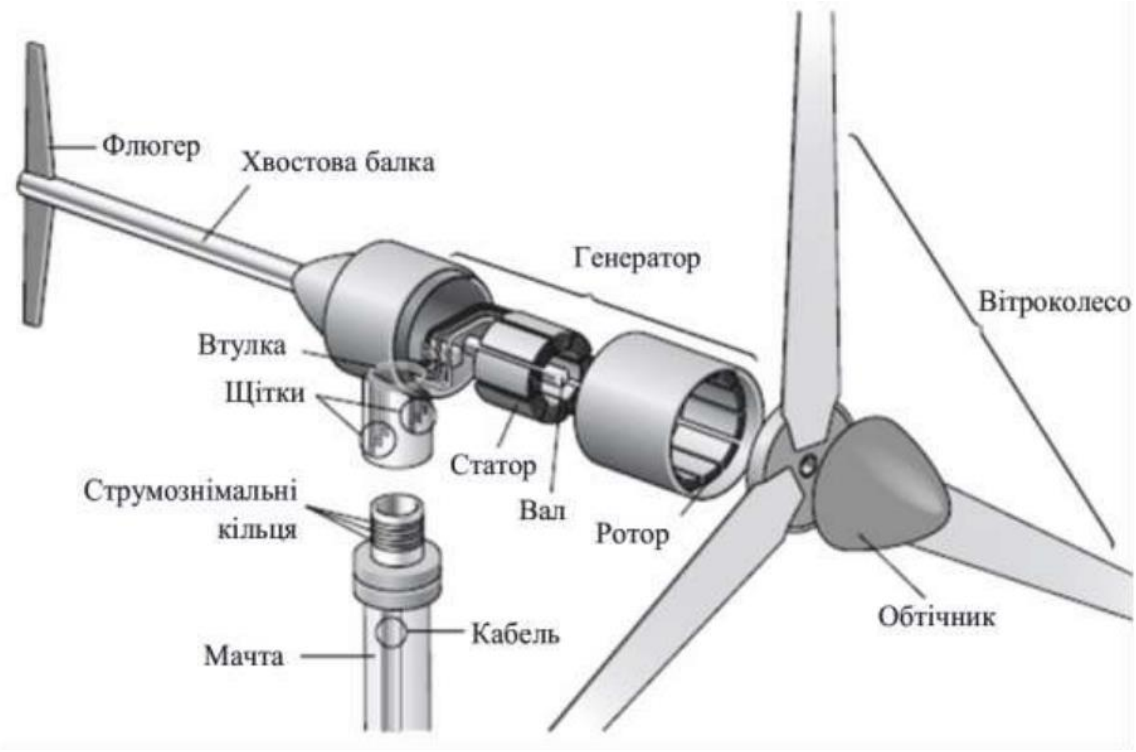


Рис. 1.9 – ВЕУ малої потужності

Однією з відмінних особливостей такої установки є відсутність потужної гондоли, адже в ній фактично розташований лише генератор. Для того, аби установка була розташована на вітер використовується флюгер. В даних вітрогенераторах передача електроенергії від генератора, що розташований вгорі в гондолі, до випрямляча, розташованого внизу, здійснюється кабелем через контактні кільця з щітковим апаратом [7].

Установки мають генератор змінного струму з постійними магнітами, тож енергія що виробляється перетворюється зі змінного струму в постійний за допомогою випрямляча. У таких ВЕУ швидкість обертання, а значить і частота на виході генератора може змінюватися в широких межах, вони не містять редукторів. Як правило, такі ВЕУ використовуються для зарядки

акумуляторів з підключенням до нього електроприладів на постійному струмі, напругою 12 або 24 В. Широко також використовуються генератори постійного струму з напругою на виході 12 або 24 В [7].

Вітроустановки з потужністю 5 кВт та більше в більшості випадків використані трифазні генератори змінного струму. Також вони мають механічні регулятори, які забезпечують сталість швидкості обертання вітроколеса та частоти струму. В вітроустановках малої потужності в комплекті можуть бути встановлені генератори на дизель або бензині, які будуть підтримувати енергопостачання при відсутності вітру [7].

Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) для діючих ВЕС наразі становить в середньому 20%. Головна причина низького КВВП – нестійкість вітру. Тобто, аби зробити ВЕС більш привабливими для інвесторів, слід кардинально підвищити КВВП. Відомо, що з висотою швидкість вітру збільшується. Тому останнім часом спостерігається зростання будівництва ВЕС на щоглах-опорах, що досягають висоти 150 метрів, з діаметром ротора 80-120 м, при потужності близько 20 МВт. Мабуть, це граничні габаритні, та й енергетичні характеристики. Істотним недоліком горизонтальних (крильчастих) ВЕС, поряд зі значними габаритами і вагою (а значить і вартістю), є буремна межа по швидкості вітру 25 м/сек. При занадто великих швидкостях вітру їх робота просто зупиняється автоматичною гальмівною системою, щоб уникнути поломки. Для менш поширених вертикальних вітроагрегатів буремна межа становить 50 м/сек. З урахуванням цього деструктивного фактору зростає значення використання вертикальних ВЕС з вітряними турбінами турбореактивного типу з відносно малим діаметром ротора і великим числом лопаток, для яких такої межі в принципі не існує [11].

Існує безліч технічних засобів, що дозволяють сконцентрувати повітряний потік. Серед перспективних напрямків є використання конструкцій, що відтворюють ідеї сопла Лаваля. Наприклад, компанія Mass Megawatts Wind Power розробила проект ВЕС з багато осьовими турбінами (Multi-Axis Turbosystem; MAT) і так званою системою інтенсифікації, що

дозволяє збільшити швидкість вітру, що надходить до турбін, на 70% і потроїти вихідну потужність електростанції. Однак застосування наземних концентраторів не усуває проблему мінливості сили і напрямків вітру [11].

Розуміючи обмежені можливості існуючих вітроагрегатів, останнім часом дослідники і проектувальники все частіше звертають увагу на «літаючі», «такі, що ширяють» ВЕС різних конструкцій. Вирішальне значення тут має не стільки сила вітру (її можна підвищити в різного роду концентраторах повітряних потоків), скільки сталість, адже, як уже говорилося, важливо підвищити КВВП ВЕС [11].

На висоті 500 м сила вітру в один і той же момент часу вдвічі вище, ніж на висоті флюгера (10 м), оскільки з висотою знижується сила тертя повітря об земну поверхню. Це означає, що середньорічні значення вітрів на даній висоті як мінімум подвоюються і наближаються до кордону рентабельного виробництва електроенергії для наземних ВЕС. Переважна більшість створених практичних зразків і проектів вільно літаючих і прив'язних ВЕС орієнтоване на використання енергії вітру на висоті близько 500 м.

Наведемо приклади «літаючих» надувних ВЕС. У Канаді створено експериментальний вітряк-дирижабль MARS (Magenn Power Air Rotor System) з КВВП 40-50%, представлений на рисунку 1.10. Даний дирижабль, реалізує ефект Магнуса, що забезпечує підвищену стійкість конструкції. Гранична сила вітру, що вловлює такий вітрогенератор, становить 90 м/с. Виробляється енергія передається на землю по кабелю, де встановлено майданчик з лебідкою і трансформаторна станція.



Рисунок 1.10 – Вітряк-дирижабль MARS

Прикладом вітряних турбін турбореактивного типу може служити запропонована Flo Design технологія, заснована на захопленні вітру вітряної турбіною, розміщеною на дирижаблі, через невеликий отвір, що робить таку турбіну, яка виглядає як реактивний двигун, приблизно в 4 рази ефективніше горизонтальних ВЕС. Поряд з при поверхневою частиною тропосфери (рівнем тертя),становить інтерес і використання вітрових енергоресурсів зони. Тропопауза, що знаходиться на висоті 8-10 км, для якої характерно стійке наявність вітру (з повторюваністю 80-90%) з високою швидкістю (20-30 м/с). Таким чином, КВВП істотно підвищується, приблизно до 80%. У зимовий період швидкість вітру збільшується, а висота знижується приблизно на 1,5 км, що також корисно для енергетичного використання вітру. В даному шарі вже немає необхідності використовувати додаткову підйомну силу крила і слід обмежитися добре обтічними, округлими формами.

В якості основи для побудови схеми конструкції ВЕС для шару до 1 тис. м може бути розглянутий проект російської фірми «СКІФ». У даній «паряться» ВЕС застосований ряд повітроводів з повно поворотними повітрозабірними пристроями на кінцях (сопла Лаваля), що сходяться до загального конфузор і, далі, – в робочий канал. Повітроводи виконані у вигляді частини конструкції змія-дирижабля або наповненого воднем пнемо-крила для збільшення підйомної сили, а сама турбіна розміщена всередині корпусу. Застосування поворотною паралельно-послідовної системи сопел Лаваля дозволяє досягти близько звукової швидкості потоку на лопатях турбіни. При захоплюваної площі обертання лопатей вітрогенератора 10 м^2 (діаметр – 5 м), швидкості вхідного повітряного потоку 5 м/с, при п'яти вхідних повітроводах, що подається на генератор потужність вітру становить 48 МВт. Випробування експериментальної установки підтвердили перспективність нового підходу. Оцінки фахівців ТОВ «СКІФ» показують низьку вартість встановленої потужності – не більше 0,6 дол./Вт; собівартість 1 кВт*год. електроенергії, що виробляється оцінюється не більше 0,01 дол. На думку розробників, дана конструкція дозволяє в 5-6 разів знизити матеріаломісткість енергоустановки, а значить і її вартість.

1.4 Малі аеродинамічні системи типу аеростату

Пристрій аеростата. В основі польоту лежить гідростатичний закон. Дія цього закону, який застосовується для повітряного середовища, обумовлює принцип польоту повітряної кулі. Гаряче повітря, володіючи меншою щільністю, ніж холодне, піднімається вгору, захоплюючи за собою оболонку

аеростата і прив'язний до неї кошик. Повітря нагрівають за рахунок спалювання газу (пропану і бутану) у пальнику, підвішеною між кошиком і безпосередньо кулею. Газ подається з балонів, закріплених по кутах кошика. Регулюючи за допомогою пальника температуру повітря, що нагрівається, можна змінювати висоту польоту. Парашутний клапан, розташований у верхній частині оболонки, випускає тепле повітря. Піднімає і опускає клапан пілот повітряної кулі, керуючи його становищем з кошика за допомогою спеціального фала. Майстерність пілота полягає в тому, щоб зловити на необхідній висоті потрібне течію повітря (вітер на різних висотах часто дме в різних напрямках). Механізм роботи аеростату зображений на рисунку 1.10

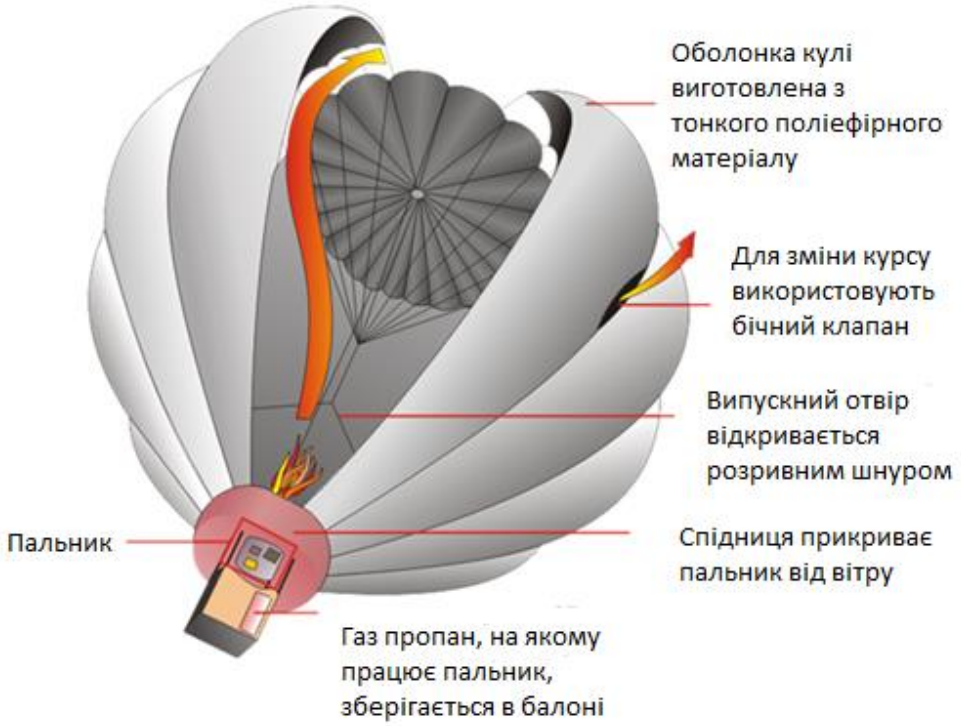


Рисунок 1.10 - Механізм роботи аеростату

Льотні характеристики такої конструкції представимо в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Льотні характеристики аеростату

Льотні характеристики аеростату	
Максимальна висота підйому, м	До 5000
Час вільного польоту, год.	1-3
Швидкість вітри при експлуатації, м/с	Вільний політ: не більше 7; прив'язний режим: не більше 5
Температура повітря, ◦ С	Від -20 до +40
Джерело тепла	здвоєний блок газових пальників
Кількість балонів пропан - бутанової суміші	2-4
Ресурс	По технічному стану
Строк служби	10 та більше років

Техніко-технічні характеристики теплового аеростату представлені в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Техніко-технічні характеристики теплового аеростату

Характеристики теплового аеростату	Клас аеростату по FAI		
	AX - 7	AX - 8	AX - 9
	Тип повітряного судна		
	AUS-N-7	AUS-N-81	AUS-N-83
Обсяг оболонки, м куб.	2190	2550	2900
Діаметр оболонки, м	16,8	17,6	18,8
Маса аеростата в комплекті, кг	260	270	290
Кількість пасажирів, чол.	2 -3	3 - 4	4 - 5
Максимальне корисне навантаження, кг	до 350	до 430	до 500
Габаритні розміри: діам./висоту, м	16,8/20	17,6/22	19,1/23

РОЗДІЛ 2
МАЛА ВЕУ З КОНЦЕНТРАТОРОМ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

Промислове вироблення електроенергії на вітрових енергетичних установках доцільно при швидкостях вітру, починаючи з 5 м/с, але на більшій частині території України середня швидкість становить 4-5 м/с, а для Харківської області – 4.5 м/с [8]. при таких умовах і швидкостях вітру доцільно використовувати ВЕС для індивідуального або мобільного енергозабезпечення. При цьому для установок номінальною потужністю 1 кВт розмір ВЕУ становить 3-3,5 м. Однак для отримання такої потужності потрібно вітер зі швидкістю 10 м / с, що спостерігається в приземних шарах досить рідко. Крім того транспортування електроенергії кінцевим споживачам супроводжується втратами, величина яких для Харківської області за 2009 рік склала 17,5%, або половину від 1976 ГВт*год, які спожило населення [9].Розподіл генерації за допомогою ВЕС малої потужності дозволять, таким чином, знизити втрати енергії в мережах. Підвищення ефективності освітлювальних та інших електроприладів знижують загальне споживання електрики і збільшують інтерес до малопотужних генераторів, особливо у віддалених і гірських районах [10].

Використання концентраторів різних видів дозволяє вирішити кілька проблем, властивих традиційним ВЕУ:

- зменшити габарити;
- знизити шум лопатей;
- знизити кінцеві втрати.

Однак для отримання значної потужності в таких системах необхідно мати потік повітря відповідних параметрів. Крім збільшення захоплюваної площі можна збільшити знімається потужність, використовуючи підйом ВЕУ

на висоту більше 100 метрів, де швидкість вітру в 2 .... 2,5 рази вище, ніж у поверхні землі. Такий підйом можна здійснити, наприклад, за допомогою парашутних систем або аеростатів.

2.1 Аеродинамічні особливості конструкції гондоли

Спочатку доцільно детально розглянути принцип дії крила, та виникнення рушійної сили під тиском потоку повітря. Першим це зробив німецький фізик А. Бец, він розглянув лопать крила, що встановлена під кутом φ до площини обертання (див. Рис. 2.1.)

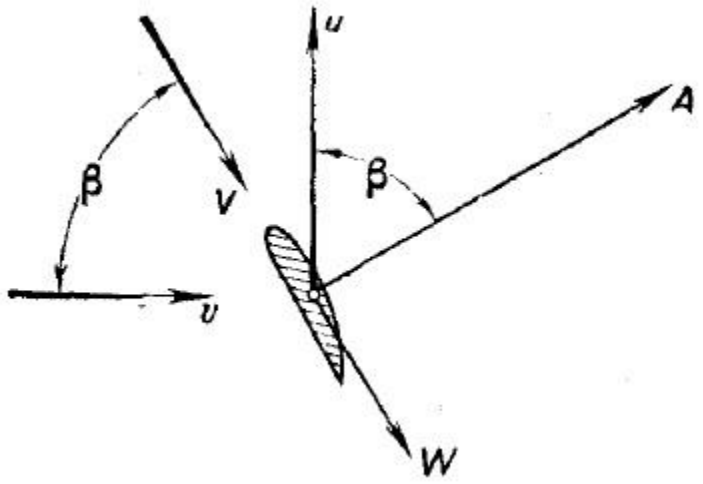


Рис. 2.1. – Векторна діаграма швидкостей та сил, що діють на крило

Напрям швидкості вітру відносно крила є геометричною сумою швидкості набігання вітру $\vec{v}$ та швидкістю руху крила у повітрі $\vec{\mathrm{u}}$, взятій зі знаком мінус $\mathrm{V} = \sqrt{v^2 + \mathrm{u}^2}$. Сила $\vec{\mathrm{A}}$, що рухає крило, в такому випадку буде спрямована перпендикулярно до V, і складатиме з напрямом руху кут β. Інша

сила $\overrightarrow{W}$ буде викликана наявністю лобовогу опору крила до напряму потоку. Вона спрямована паралельно $\vec{\mathrm{V}}$. Корисну роботу буде виконувати та компонента сили, що співпадає за напрямом з швидкістю руху крила $\vec{\mathrm{u}}, \overrightarrow{\mathrm{T}_1} = \vec{\mathrm{A}}\cos\beta$. Інша компонента $\overrightarrow{\mathrm{T}_2} = \overrightarrow{W}\sin\beta$ буде виявляти опір. Тому, в напрямку руху крила, буде діяти загальна сила $\vec{\mathrm{T}} = \overrightarrow{\mathrm{T}_1} - \overrightarrow{\mathrm{T}_2} = \vec{\mathrm{A}}\cos\beta\,(1 - \varepsilon\tan\beta)$, де $\varepsilon = \frac{W}{A}$ – обернена аеродинамічна якість крила. Ця величина, зазвичай, є дуже невеликою (від 0,02 до 0,1). В такому випадку, корисна робота за 1свизначається наступною формулою

$$L_N = \vec{T} \cdot \vec{u} = Au\cos\beta\,(1 - \varepsilon\tan\beta) \qquad (2.1)$$

де L_N – корисна робота,

$\vec{T}$– сумарна сила, що діє на крило,

$\vec{u}$– швидкість руху крила у повітрі,

A– сила, що рухає крило,

β– кут між швидкістю руху крила і силою, що рухає крило,

ε –обернена аеродинамічна якість крила.

З рівняння (2.1) отримують, що коефіцієнт корисної дії крила є $\eta_1 = \frac{1-\varepsilon*\frac{u}{v}}{1+\varepsilon*\frac{v}{u}}$, тобто відношення корисної роботи до наявної. ККД буває дуже малим тільки, коли відношення швидкості руху крила до швидкості потоку $\frac{u}{v}$, або дуже мале, або дуже велике.

На базі Науково-виробничого комплексу «Відновлювані джерела енергії та ресурсозберігаючі технології» (НВК «ВДЕРТ» [13]) ННЦ ХФТІ був створений вітрогенератор малої потужності. Це була базова модель

ефективного вітрогенератора, що має великий ККД та малі ваго-габаритні параметри.

Була розрахована та виготовлена легка (19 кг) гондола, що забезпечує ефективне фокусування повітряного потоку на вході і де-фокусування на виході. Гондола зображена на рисунку 2.2 [13].



Рисунок 2.2 – Профіль гондоли

Були розраховані та створені відцентрована турбіна, зображена на рисунку 2.3, поздовжній профіль якої відповідає найшвидшому протоку повітря через внутрішню область гондоли [13].



Рисунок 2.3 – Відцентрована турбіна

Створений безарматурний електрогенератор на основі високо коерцитивних магнітів, рисунок 2.4.

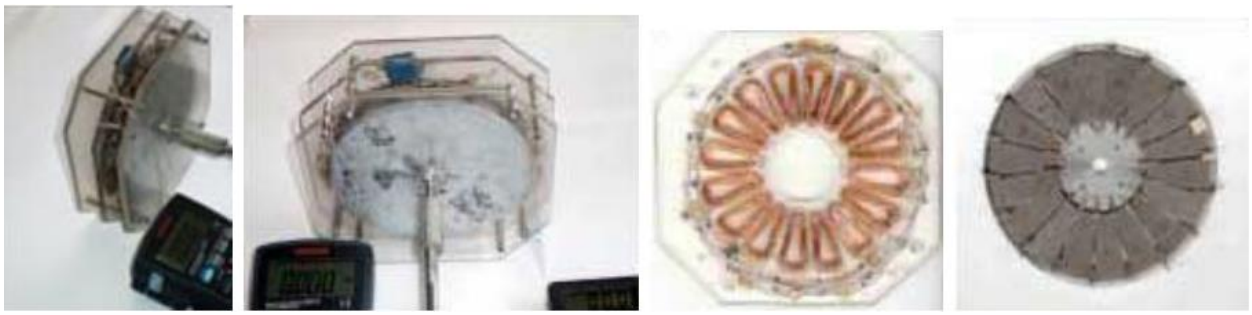


Рисунок 2.3 –Електрогенератор

На даний момент описана вітроенергетична установка використовується для лабораторних досліджень на кафедрі фізики нетрадиційної енергетики та екології університету.

В роботі ставилося завдання пошуку можливих шляхів удосконалення існуючої моделі малої ВЕУ з конфузором та оцінювання перспектив її використання у поєднанні з аеродинамічною системою.

Конфузор взагалі представляє собою поступовий перехід від труби з більшим діаметром до труби з меншим для того, аби зменшити втрати

натиску. По шляху руху потоку відбувається зменшення площі перерізу і, як наслідок, зменшення середніх швидкостей, це сприяє збільшенню швидкостей потоків. Один із різновидів ВЕУ з конфузором представлений на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – ВЕУ з конфузором

До головних переваг ВЕУ з конфузором можна віднести наступні: менша маса ВЕУ; збільшений діапазон робочих швидкостей вітру; зменшення шуму, що виробляється; збільшена потужність турбіни за рахунок поділу повітряного потоку на струмені; за конфузором утворюється розряджена область, коли дме вітер, що втягує повітря з отворів конфузора, і буде збільшувати швидкість повітряного потоку, сприяючи додатковій потужності на лопатях турбіни.

Головні недоліки конструкції з конфузором полягають в тому, що при великих швидкостях вітру у конфузорі утворюватиметься момент сили, навколо осі, перпендикулярної до вертикалі., це буде сприяти руйнуванню установки; також така ВЕУ залишається відкритою для птахів.

Щоб запобігти прояву зазначених недоліків, конструкція експериментальної установки була видозмінена. Внутрішній профіль (див. Рис. 2.4) сконструйовано так, що в розтині він є наближеним до лінії найшвидшого спуску – брахістохроми. Зовнішній – подібний до зовнішнього

профіля авіатурбіни. Гвинт встановлений всередині конфузора, в найвужчу область, де швидкість наскрізного потоку вітру є найшвидшою. За гвинтом встановлений електрогенератор, що являє за формою конус, коаксіальний з конфузором. Довжина турбіни 884 мм, діаметр поперечного перерізу спереду – 531 мм, а ззаду – 370 мм. Відповідні площі вхідного і вихідного отвору дорівнюють 0,22 м^2 і 0,11 м^2. Діаметр в найвужчій частині, де встановлений гвинт – 185 мм, площа – 0,03 м^2. Довжина відсіку, де встановлений генератор становить 330 мм. Його ж діаметр у задній частині, основі конуса, – 110 мм. Таким чином ширина кільцевого отвору, через який повітря виходить з турбіни, становить 80 мм, площа – 0,075 м^2.

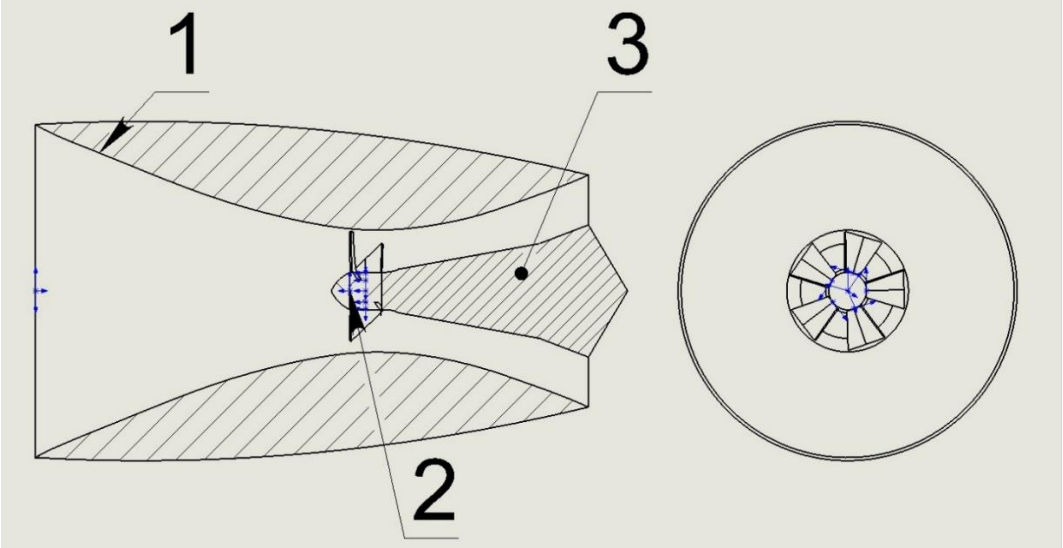


Рис.2.4 – Схема експериментальної установки: 1 – внутрішній профіль. 2 – гвинт. 3 – область встановлення генератора.

2.2 Електрогенератор постійного струму

Модель електрогенератора експериментальної вітрової установки, що досліджується, була винайдена і запатентована науковцями НПК ВДЕРТ (Ткаченко В. І., Москвітін О. В., Казарінов Ю. Г., Шахова О. М.). Електрогенератор постійного струму складається з ротора з 2 паралельними дисками, які містять постійні магніти, що чергуються своїми полюсами, причому протилежні полюси магнітів на дисках ротора різні, вони закріплені на валу, між ними розташований диск статора, виконаний з діелектричного матеріалу що містить розміщені з постійним кроком електромагнітні котушки без сердечників. Обмотки електромагнітних котушок та постійні магніти мають трапецієподібну форму, кількість їх парна, але кількість магнітів більше на 2 ніж котушок, диски ротора виготовлені з магнітом'якого матеріалу, а електромагнітні котушки підключені до багатофазного випрямляча [12].

Ця корисна модель пристосована для використання у ВЕУ для вироблення електроенергії, зокрема в установках з осьовим розташуванням основного магнітного потоку в немагнітному зазорі [12].

Схема моделі електрогенератора зображена на рисунку 2.5.

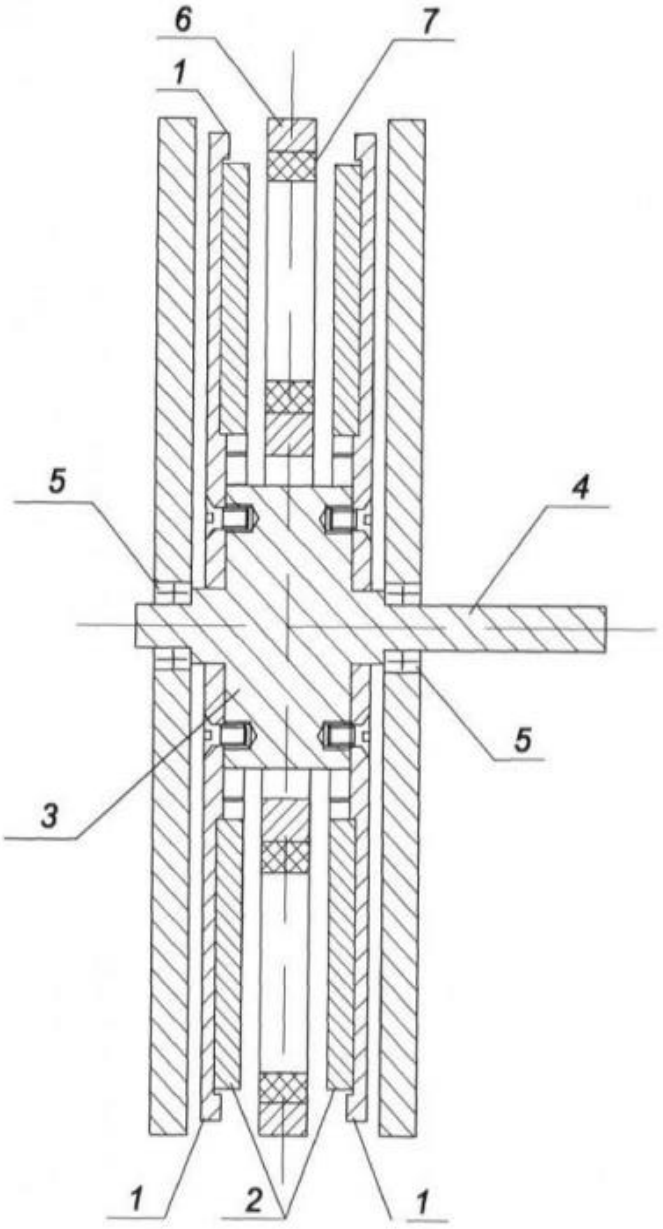


Рис.2.5 – Загальний вид електрогенератор постійного струму в розрізі: 1 – ротор; 2 – магніти; 3 – циліндровий виступ; 4 – приводний вал; 5 – підшипники; 6 – статор; 7 – котушка.

Електрогенератор працює наступним чином. При обертанні ротора 1 відбувається зміна магнітного потоку через електромагнітні котушки 7 статора 6, що викликає виникнення 40 синусоїдальною електрорушійної сили (ЕРС) у витках обмоток котушок 7. Щоб забезпечити необхідний робочий зазор у роторі 1 використовується циліндровий виступ 3, який є частиною приводного

вала 4, закріпленого підшипниками 5. Парність кількості магнітів 2 і електромагнітних котушок 7 приводить до того, що в парі електромагнітних котушок, лежачих на одному діаметрі, збуджуються протилежні по фазі ЕРС. Кожна така пара підключена до навантаження через 4-5 чотири випрямні елементи, що формують мостовий двопівперіодний випрямляч, підключений до навантаження. Підсумовування струмів, зміщених по фазах, для формування вихідного струму з низьким рівнем пульсацій забезпечується кутовими зрушеннями між парами електромагнітних котушок 7 і магнітів 2 в навантаженні. Електрогенератор може бути забезпечений акумулятором і блоком автоматичного50 зарядного пристрою. Конструкція запропонованого електрогенератора постійного струму забезпечує високий ККД і високу питому потужність. При цьому електрогенератор працює з низьким рівнем шуму і малою амплітудою пульсацій вихідної напруги [12].

2.3 Результати натурних та модельних досліджень ВЕУ з конфузором

Експериментальні дослідження проводилися на вище описаній ВЕУ, що складається з обтічника з турбіною і електрогенератором, розташованими всередині обтічника як показано на рисунку 2.6. Внутрішній профіль обтічника має форму гіперболоїда, з мінімальним діаметром 18,5 см. Закріплений на поворотних струмознімачах з рульовою пластиною для орієнтування у напрямку вітру обтічник встановлений на даху будівлі висотою 35 м. Вимірювання швидкості вітру здійснювалася чашковим анемометром метеостанції «WS -1600» , а дані про швидкість вітру і електричних

параметрах генератора записувалися у вигляді текстового файлу в IBM - PC с використанням АЦП типу «перетворювач напруга частота» та власного ПО.

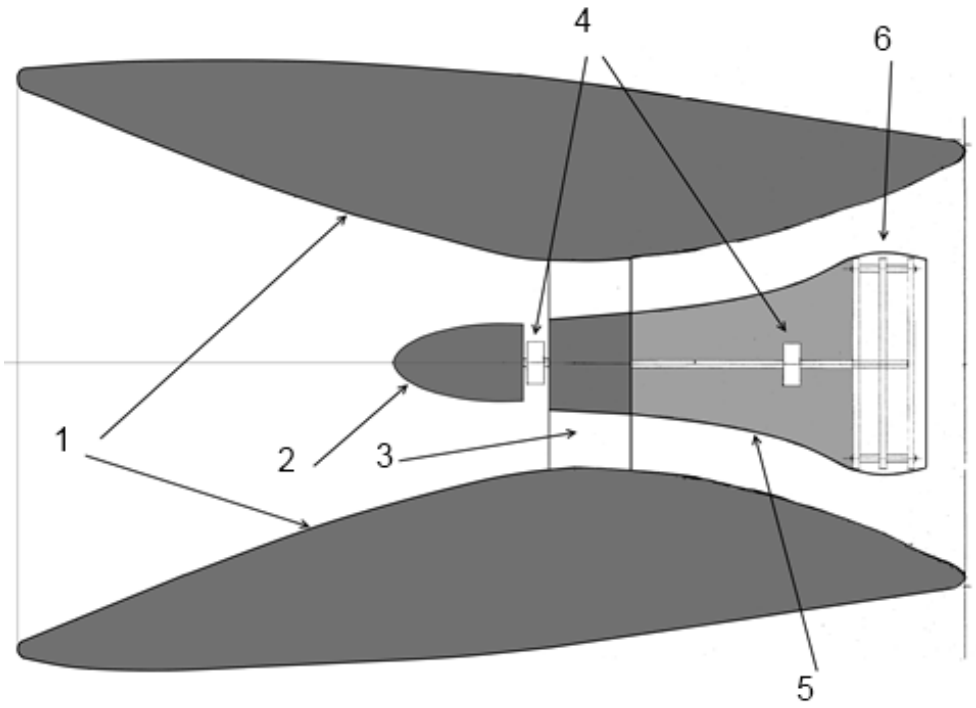


Рис. 2.6 – Схема ВЕУ і розташування вузлів: 1 – концентратор (конфузор); 2 – носовий обтічник; 3 – турбіна; 4 – підшипники турбіни; 5 – обтічник генератора; 6 – генератор.

Експерименти проводилися з турбіною, що має 20 лопатей. Турбіна безпосередньо обертала саморобний генератор постійного струму з доданими багатофазним випрямлячем на постійних NdFeB магнітах і котушках без сердечників [12]. Частота обертання ротора не перевищувала 900-1000 об / хв. У якості навантаження використовувалися резистори опором від 75 до 235 Ом.

Напруга на навантаженні в залежності від частоти обертання ротора визначалася наступним чином:

$$U = \frac{4\pi \cdot f \cdot N \cdot n \cdot \Phi - 2U_d}{1 + 2\left(R + 2\pi \cdot f \cdot N \cdot L\right) / R_L} = \\ = \frac{3.35 \cdot f - 1.31}{1 + \left(6.7 + 0.144 \cdot f\right) / R_L} \quad (2.1)$$

де f – частота обертання ротора в Гц,

N – число полюсів магнітної системи ротора,

L – індуктивність обмотки,

Ф – модуль магнітного потоку,

U_f – падіння напруги на діодах випрямляча,

R – опір обмотки,

R_L – опір навантаження.

Числові значення у даному виразі були одержані з аналізу експериментальних залежностей, які отримували в результаті стендових випробувань генератора.

На рисунку 2.7 показані експериментальні результати роботи вітроенергетичної установки з 20-ма лопатями.

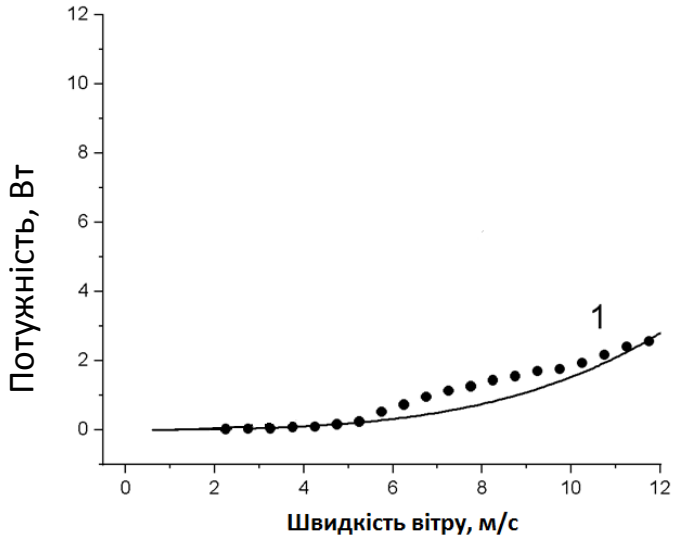


Рисунок 2.7 – Залежність потужності ВЕУ при резистивному навантаженні генератора з використанням турбіни з 20 лопатями: точки – експеримент, лінія – розрахунок.

Зазначимо, що навантаження турбіни в експерименті здійснювалося генератором, вихідною характеристикою якого була величина напруги, яка описується виразом (2.1). В свою чергу, навантаження генератора забезпечувалося омічним навантаженням за допомогою резисторів. Така схема навантаження відповідає ситуації, коли при сталій швидкості вітру частота обертання турбіни збільшується доки її потужність не зрівняється з потужністю генератора.

Значення коефіцієнта потужності за даними рис. 2.7 складає близько 12%, що дозволяє забезпечити відбір потужності у 2 Вт при швидкості вітру 10 м/с. Потужність ВЕУ з даною турбіною дуже мала для практичного використання. Щоб з'ясувати причини і визначити шляхи удосконалення турбіни, було виконане моделювання роботи ВЕУ з використанням програмних комплексів FlowER і ANSYS.

Результати моделювання вихідної турбіни з 20 лопатками за допомогою FlowER показало, що в лопатках використовується тільки вузька область поблизу вхідної кромки. Крім того має місце факт формуванням вихрових зворотних течій в конфузорі із-за надмірного опору турбіни потоку повітря.

Виходячи з цього, для підвищення ефективності можна скоротити число лопатей або зменшити ширину лопаті. Оскільки для вузьких лопатей зростають вимоги механічної міцності використовуваних матеріалів, був обраний варіант скорочення числа лопатей.

Виконати побудову залежностей потужності від частоти обертання ротора при постійній швидкості потоку на основі розрахунків FlowER достатньо складно, тому ці залежності були отримані з використанням пакета

ANSYS. Отримані значення для 5 значень швидкості потоку показані на рисунку 2.8.

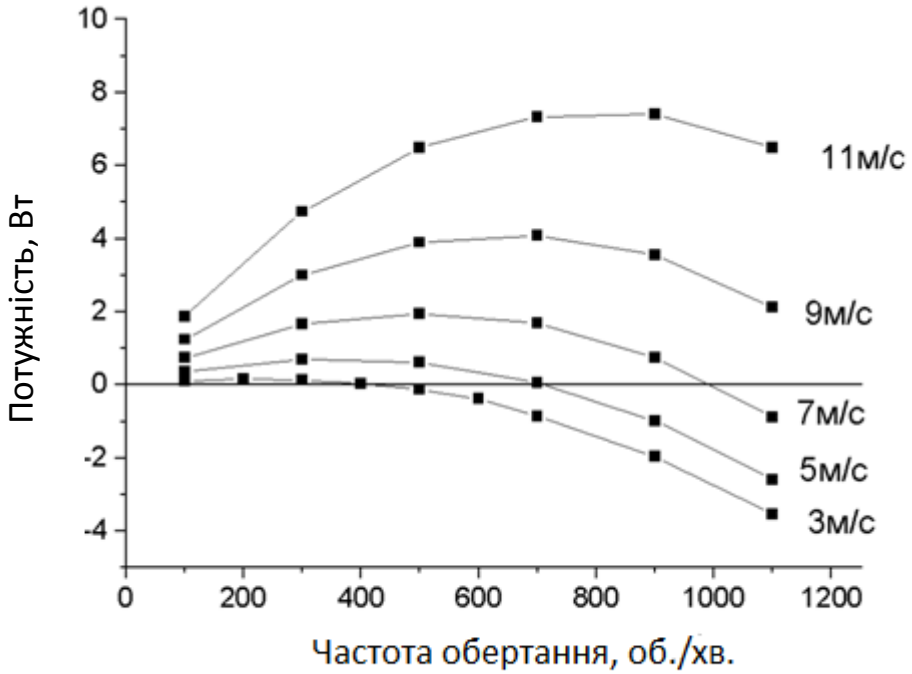


Рисунок 2.8 – Залежність потужності турбіни (20 лопатей) від частоти обертання для різних швидкостей потоку на вході ВЕУ

Отже, можемо зазначити, що турбіна з 20 лопатями починає виробляти потужність в 2 ВТ при швидкостях вітру, що дорівнюють 7 м/с. І виходить на номінальну потужність у 8 Вт при швидкостях 11 м/с. Результати моделювання вказують на те, що потенційно така турбіна здатна генерувати потужність з ефективністю у 32%.

Разом з тим очевидним є факт неефективного використання енергії низько швидкісних потоків (менше 5 м/с). Виходячи з цього, для підвищення ефективності необхідно скоротити число лопатей або зменшити ширину лопаті. Оскільки для вузьких лопатей зростають вимоги механічної міцності матеріалів, що використовуються, був обраний варіант скорочення числа лопатей.

РОЗДІЛ 3
КОНЦЕПТ ВЕУ З АЕРОДИНАМІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ТИПУ КРИЛА

3.1 Удосконалення ВЕУ з конфузором

Удосконалення турбіни проводилася через зменшення кількості лопатей за 20 (рисунок 3.1) до 5 (рисунок 3.2), частота обертання турбіни обмежена генератором на рівні 900-1000 об/хв, довжина хорди лопатки в місці кріплення близько 3 см, це необхідно для забезпечення достатньої міцності лопатей, що виготовлені зі склопластику.

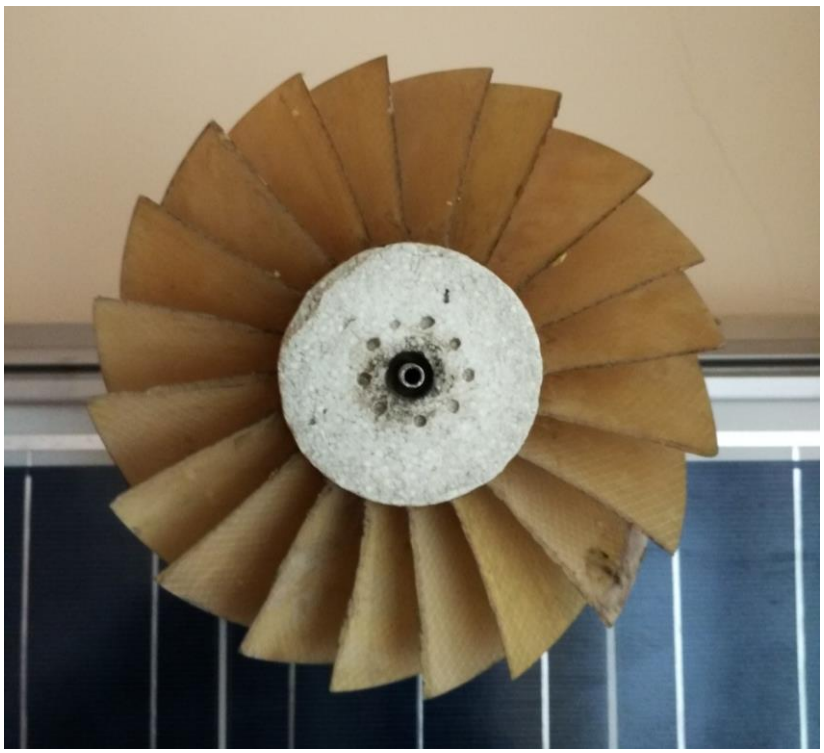


Рисунок 3.1 – 20-лопатева турбіна



Рисунок 3.2 – 5-лопатева турбіна

Дані залежності потужності турбіни для 20 лопатей були перераховані для установки з 5 лопатями в залежності ефективності ВЕУ від швидкохідності турбіни (див. рисунок 3.3). Для вирішення цієї задачі у якості змінної величини було обрано кути нахилу передньої і задньої кромок лопаті. Від величини цих кутів однозначно залежить форма і кут атаки лопаті. Для отриманої найбільш оптимальної форми лопаті виконувався розрахунок залежності потужності від частоти обертання турбіни. У якості параметру виступала швидкість потоку на вході в турбіну. Отримані залежності потужності турбіни від частоти її обертання мали вигляд, аналогічний представленим на рисунку 2.7.

Оскільки усі значення коефіцієнта використання енергії вітру (КВЕВ) конкретної ВЕУ в залежності від швидкохідності її турбіни змінюються монотонно і описуються гладкими кривими, можна очікувати, що розраховані значення підкоряються загальній закономірності.

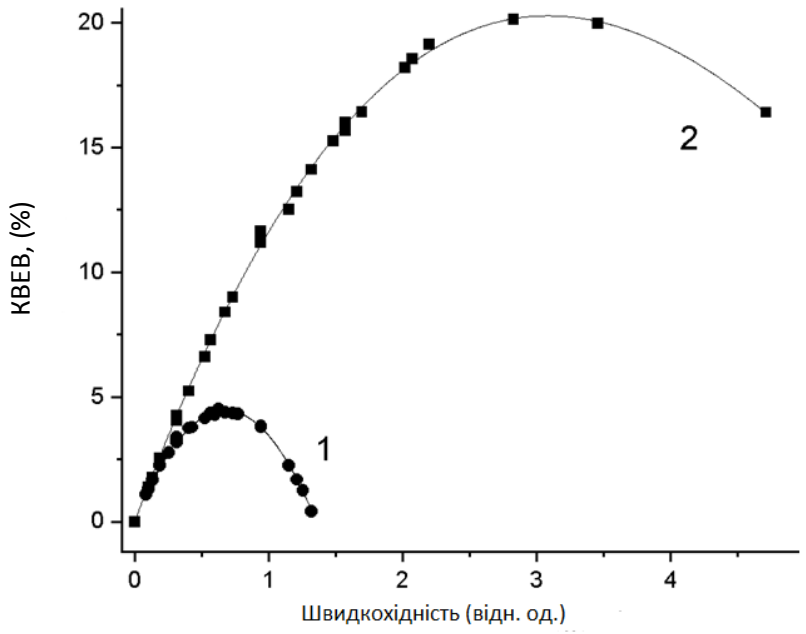


Рисунок 3.3 – Залежність ефективності ВЕУ від швидкохідності турбіни: 1– 20 лопатей, 2 – 5 лопатей

Аналіз кривих демонструє, що удосконалення турбіни привело до підвищення ефективності та значному розширенню діапазону максимальної ефективності. Разом з тим, для роботи ВЕУ з оптимальною ефективністю, необхідно, по-перше, щоб була можливість забезпечити швидкохідність турбіни на рівні не менше ніж 2,5. А по-друге, подальше збільшення аеродинамічної потужності ВЕУ можливе за рахунок збільшення діаметру вітрового колеса турбіни, а заодно і пропорційне збільшення лінійних розмірів гондоли. Ця задача пов’язана з масштабуванням ВЕУ і є досить складним інженерним рішенням, але певні якісні висновки можна зробити в результаті нескладних розрахунків на основі методу розмірностей.

Візьмемо за основу турбіну з гондолою (конструкція з 5 лопатями). Приймемо до уваги криву потужності ВЕУ з урахуванням даних про оптимальну швидкохідність ($z^* \approx 3{,}1$).

Треба розрахувати в скільки разів зміниться потужність ВЕУ, що відбирається, аби швидкохідність не змінилася, якщо ми замінимо вітроколесо та гондолу подібними, але зі збільшеними в L раз розмірами. Відмітимо, що

обидві ВЕУ знаходяться в однакових умовах: густину ρ, динамічну в'язкість η та температуру повітря будемо вважати однаковими, швидкість потоку, що набігає – постійною величиною.

З міркувань розмірності, що потужність, що відбирається виражається :

$$P = \rho \cdot l^5 \cdot w^3 \cdot f(Re = \frac{l^2 \cdot w \cdot \rho}{\eta}) \quad (3.1)$$

Так як густина і в'язкість повітря в обох випадках однакова, то значення функції $f(\frac{l^2 \cdot w \cdot \rho}{\eta})$ та коефіцієнт при ній залежить тільки від $l^2 \cdot w$.

Швидкохідність вітрового колеса:

$$z = \frac{w \cdot l}{2 \cdot V} \quad (3.2)$$

Для того, аби вона залишилась незмінною, треба виконати такі умови:

$$\frac{w_1 \cdot l_1}{V_1} = \frac{w_2 \cdot l_2}{V_2} \rightarrow \frac{w_2}{w_1} = \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{V_2}{V_1},$$

$$\text{тоді } \frac{P_2}{P_1} = \frac{l_2^5}{l_1^5} \cdot \frac{w_2^3}{w_1^3} \cdot \frac{f_1\left(\frac{{l_1}^2 \cdot w_1 \cdot \rho}{\eta}\right)}{f_1\left(\frac{{l_2}^2 \cdot w_2 \cdot \rho}{\eta}\right)} = (\frac{l_2}{l_1})^5 \cdot (\frac{w_2}{w_1})^3 =$$

$$= (\frac{l_2}{l_1})^5 \cdot \left[(\frac{l_1}{l_2})^2\right]^3 = L^5 \cdot \frac{1}{L^6} = \frac{1}{L}, \text{ тобто} P_2 = \frac{P_1}{L}$$

Отже, для того, аби швидкохідність вітрового колеса не змінилася, треба виконати такі умови:

- зменшити швидкість потоку в L раз;
- зменшити потужність, що відбирається в L раз.

Перевіримо як при цьому зміниться сила опору гондоли:

$L = \frac{1}{2}\rho c_L s V^2 = c' l^2 V^2$, коли $l -$ характерний розмір гондоли

$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 = L^2 \frac{1}{L^2} = 1$ це говорить про те, що сила опору не зміниться, тому потрібно міняти швидкохідність колеса.

Приймемо, що $\frac{l_2}{l_1} = L, P_2 = P_1, V = const$. Тоді ми отримаємо, що $\frac{w_2}{w_1} = \frac{l_1^2}{l_2^2} = \frac{1}{L^2}$,і $z = \frac{wl}{2V}$, отже $\frac{z_2}{z_1} = \frac{1}{L}$ таким чином $z_2 = \frac{z_1}{L}$.

На основі проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:: для того, аби зберегти потужність, треба зменшити швидкохідність в L разів (при заданій швидкості потоку). Для того, аби швидкохідність не міняти, треба зменшити потужність, що відбирається за рахунок зменшення швидкості вітру. Для того, аби зберегти потужність, що відбирається, треба зменшити швидкохідність. Отже, аби збільшити потужність, що відбирається, треба збільшити і швидкохідність. Тобто розрахунки вказують на те, що вибраний шлях у напрямку збільшення швидкохідності вітрового колеса є вірним.

Швидкохідність можна збільшити, ще зменшивши кількість лопатей, наприклад з 5 до 3. За отриманими даними, що представлені на рисунку 3.1 ми можемо стверджувати, що зменшення лопатей з 20 до 5 дозволить збільшити швидкохідність з 0,7 до 3,1 – тобто більш аніж в 4 рази. Отже по аналогії можна очікувати, що для 3-лопатевої турбіни швидкохідність буде ще більшою приблизно в 1,7 рази. Але разом з тим, як неважко переконатись, таке удосконалення призведе до частот обертання турбіни, що у рази перевищує частоти доступні для генератора, що використовується в базовій ВЕУ. Тому цю задачу потрібно вирішувати одночасно із збільшенням діаметру вітрового колеса турбіни.

Збільшення діаметру вітрового колеса турбіни (D) дозволяє очікувати підвищення відбору потужності пропорційне D^2. Цей шлях передбачає відповідних змін розмірів гондоли, переробки генератора і складних аеродинамічних інженерних досліджень, пов’язаних з процесом

масштабування існуючої конструкції ВЕУ. Очевидно, що розв'язання цих задач виходить за межі кола завдань, окреслених в даній магістерській роботі.

Експериментальні результати роботи ВЕУ з п'ятьма лопатями показані маркерами на рис. 3.4.

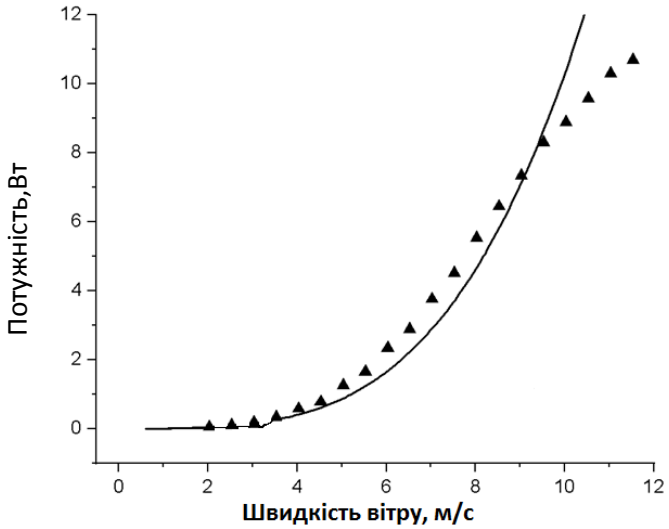


Рисунок 3.4 – Залежність потужності ВЕУ при резистивному навантаженні генератора з використанням турбіни з 5 лопатями: точки – експеримент, лінія – розрахунок.

Видно, що така ВЕУ при швидкостях вітру у 10 м/с здатна генерувати потужність 9 Вт. Побудова розрахункових залежностей потужності від швидкості вітру, які на рис 3.4 мають вигляд суцільних ліній було виконане наступним чином. Залежність КВЕВ від швидкохідності з рис. 3.3 бали апроксимовані поліномами третього ступеню. Після апроксимації числовими методами розв'язувалося рівняння відносно частоти обертання ротора:

$$\frac{(4\pi f N n\Phi - 2U_d)^2}{R_L + 2(R + 2\pi f N L)} = (a z^3 + b z^2 + c z)\frac{\rho S v^3}{2}, \tag{3.3}$$

де $z = \frac{\pi D f}{v}$ – швидкохідність;

a, b, c – коефіцієнти апроксимуючого полінома;

ρ – щільність повітря;

S – площа вхідного вікна ВЕУ;

v – швидкість потоку;

f – частота обертання ротора.

З отриманих значень частоти обертання за допомогою рівняння (1) визначені значення потужності на навантаженні в залежності від швидкості вітру. Як видно з рис. 3.4 узгодження результатів розрахунків з результатами експерименту досить добре. Це дозволяє використовувати отримані результати для подальшого удосконалення даної ВЕУ до потужностей 300 Вт і більше.

Перерахунок експериментальних залежностей потужності від швидкості вітру в координати КВЕВ – швидкохідність показав, що турбіна при використанні резистивного навантаження в 150 Ом для даного генератора працювала в режимі низької швидкохідності, що не відповідає оптимальній ефективності. Як видно з рис. 3.3 для 5-тилопатевої турбіни максимальний КВЕВ у 20% досягається при z = 3,1 тоді як реальна швидкохідність не перевищувала 0,66. При цьому КВЕВ складав усього 8%. При оптимальних умовах роботи турбіни за швидкохідністю частота обертання ротора визначається виразом $f = 5{,}45\ v$. Однак уже при швидкості вітру 3 м/с необхідна частота перевищує максимальну.

Підводячи підсумок процесу удосконалення турбіни з п’ятьма лопатями, можна зазначити наступне. Розроблена експериментальна модель малої ВЕУ з концентратором у поєднанні з генератором постійного струму оригінальної конструкції здатна генерувати потужність до 10 Вт на швидкостях потоку близько 10 м/с. Подальше удосконалення даної ВЕУ з оригінальним генератором шляхом збільшення швидкохідності у разі 3-лопатевої турбіни можливе паралельно із збільшенням діаметру вітрового колеса приблизно у

5,5 рази. За оцінками таке збільшення площі охоплення вітрового потоку дозволить при швидкості вітру 10 м/с отримати аеродинамічну потужність близько 300 Вт. Як видно з рис. 3.5, на суходолі територій з такими середніми швидкостями вітру існує дуже мало.

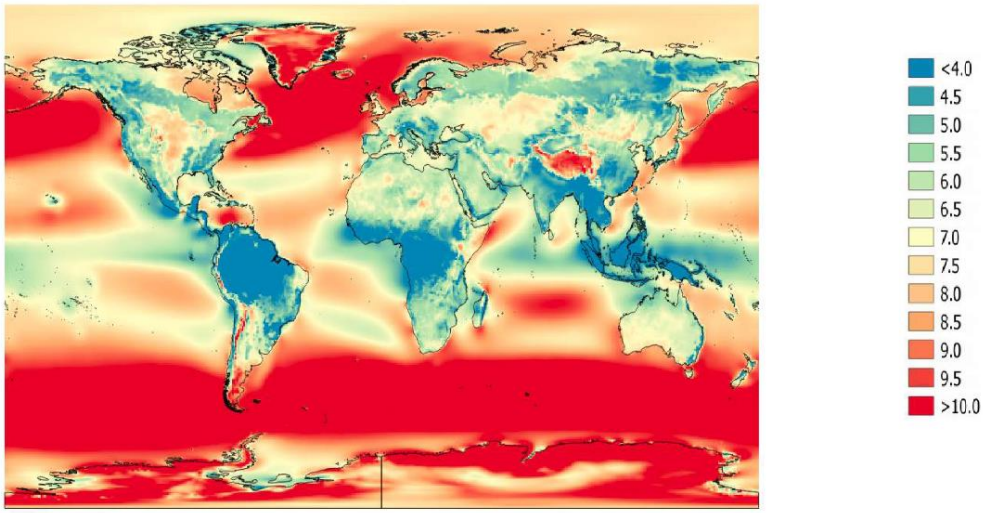


Рисунок 3.5. – Розподіл вітрів за швидкостями поблизу поверхні Земної кулі

Так для території України, середні швидкості вітру в найбільш придатних для використання регіонах не перевищують 5-6 м/с.

Найбільш доцільним практичним використанням малої ВЕУ подібного типу є її експлуатація у шарах атмосфери на висотах з достатньою частотністю вітрів, здатних забезпечити роботу турбіни з встановленою потужністю. Для територій України це шари атмосфери на висотах до 500 м.

Такий шлях перспективного використання малої ВЕУ з конфузором передбачає з одного боку обґрунтування його доцільності з енергетичної точки зору, а з іншого - аналіз конструкційних матеріалів, та аеродинамічних систем, необхідних для забезпечення роботи «летючої» ВЕУ подібного типу.

3.2 Аналіз коефіцієнта використання встановленої потужності

Для обґрунтування доцільності використання ВЕУ, що відносяться до класу дуже малих, з аеродинамічними системами є сенс проаналізувати ефективність використання традиційних ВЕУ такого класу. Оскільки в Україні системних даних щодо результатів експлуатації ВЕУ такого класу знайти не вдалося, розглянемо це питання на прикладі сусідньої Східноєвропейської країни – Хорватії.

Для аналізу ефективності малих ВЕУ ми взяли дані, що були представлені в роботі [18]. Середні швидкості вітру на території цієї країни за даними вимірювальних станцій, розташованих переважно в міській місцевості, становлять 3,1 м/с. Низькі швидкості вітру не зупиняють місцевих жителів, і вони встановлюють ВЕУ потужністю 2-6 кВт. Наша задача проаналізувати ефективність роботи таких ВЕУ при швидкостях вітру, що відповідають даній країні, зокрема деякі характеристики малих вітряних турбін з номінальною потужністю до 3 кВт з основним акцентом на їх криві установленоъ потужності. Потужності розглянутих турбіни співставлялися з потужністю «ідеальної» турбіни з максимальною теоретичною ефективністю, що встановлена законом Бетца.

Еталонна модель була створена для гіпотетичної малої вітряної електростанції з сіткою, з ідеальною кривою потужності, відповідної коефіцієнту Бетца. З такої кривої потужності, ця вітряна турбіна дозволяє використовувати 59,3% енергії, доступної вітру. Відповідно до закону Бетца, це найвища теоретична частка енергії вітру, яка може бути захоплена турбіною.

Проаналізовані турбіни були згруповані по номінальному відношенню потужності до площі гойдання і піддавалися впливу двох різних режимів вітру (4 м/с і 5 м/с середньорічної швидкості вітру). Річна кількість виробленої

електроенергії і вирівняна вартість електроенергії були розраховані для кожної турбіни і співвіднесені з їх ставленням потужності до площі. Важливим питанням є максимізація виробництва енергії з найменшими витратами енергії. Розрахунки системних витрат враховують капітальні витрати, заміну, експлуатацію та обслуговування, паливо і відсотки.

Середньорічні швидкості вітру були виміряні для середньої висоти, що має назву висоти флюгера, і відповідає 10м. Ці дослідницькі хорватські лабораторії розташовані в міській місцевості, де швидкості вітру становить 3.1 м/с, але вважається, що в сільських віддалених районах швидкості вітру дещо вище. Середньомісячні значення швидкості вітру показані на рисунку 3.6. На рисунку 3.7 показана функція розподілу ймовірностей з дискретними значеннями для бункерів 0,5 м / с і відповідна їй величина Вейбулла (k ¼ 1,43, с ¼ 4,36 м/с).

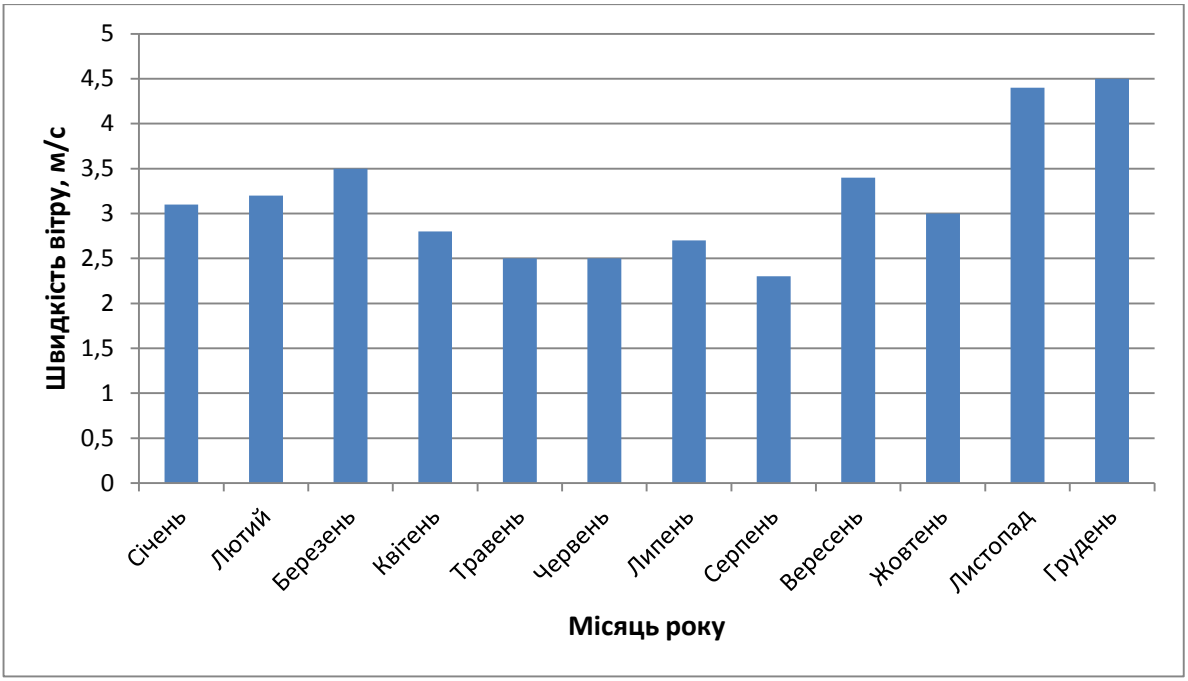


Рисунок 3.6 – Середньомісячна швидкість вітру в Хорватії

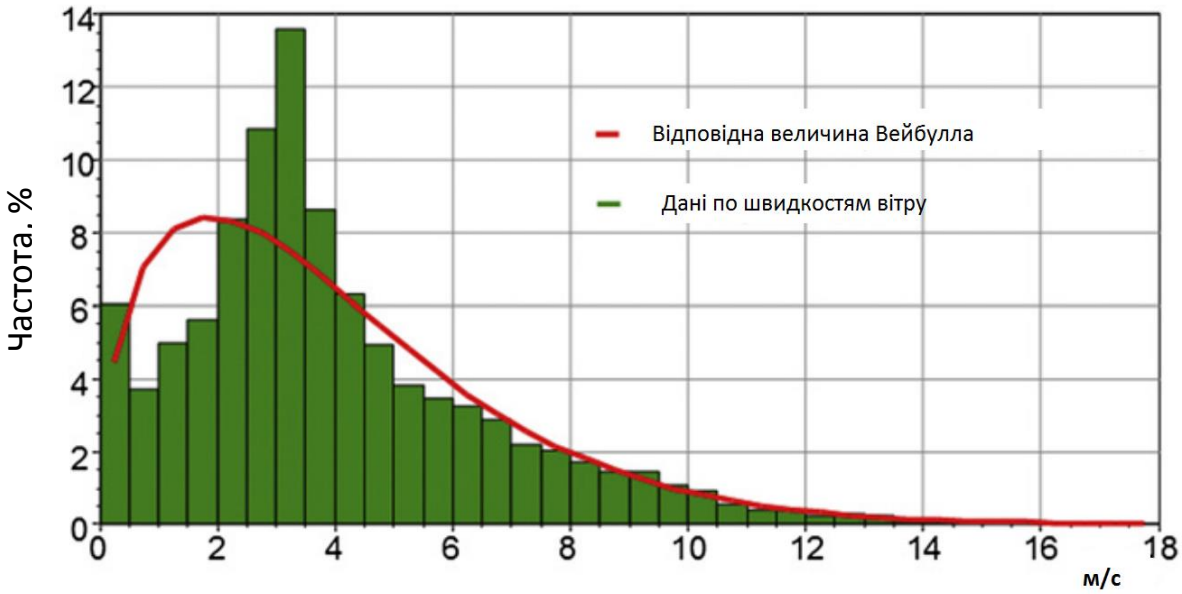


Рисунок 3.7– Функція розподілу ймовірностей з дискретними значеннями для бункерів 0,5 м / с і відповідна їй величина Вейбулла (k ¼ 1,43, c ¼ 4,36 м/с)

Однією з найбільш важливих характеристик вітротурбіни є її крива потужності, яка описує залежність вироблюваної електричної потужності від швидкості вітру. На графіку, що зображений на рисунку 3.8 представлені проаналізовані криві потужності. Основна ціль такої оцінки – порівняти різні невеликі вітряні турбіни, і тому для стислості опущена докладна інформація про кожну турбіні. Дані були отримані з різних джерел, включаючи базу даних HOMER, звіти NREL та дані, що були надані різними постачальниками. Аналіз включає в себе турбіни, незалежно від їх межи Бетца, щоб показати екстремальні зміни, що відбуваються на ринку малих вітряних турбін. Номінальна потужність для всіх розглянутих турбін становить від 2 до 3 кВт.

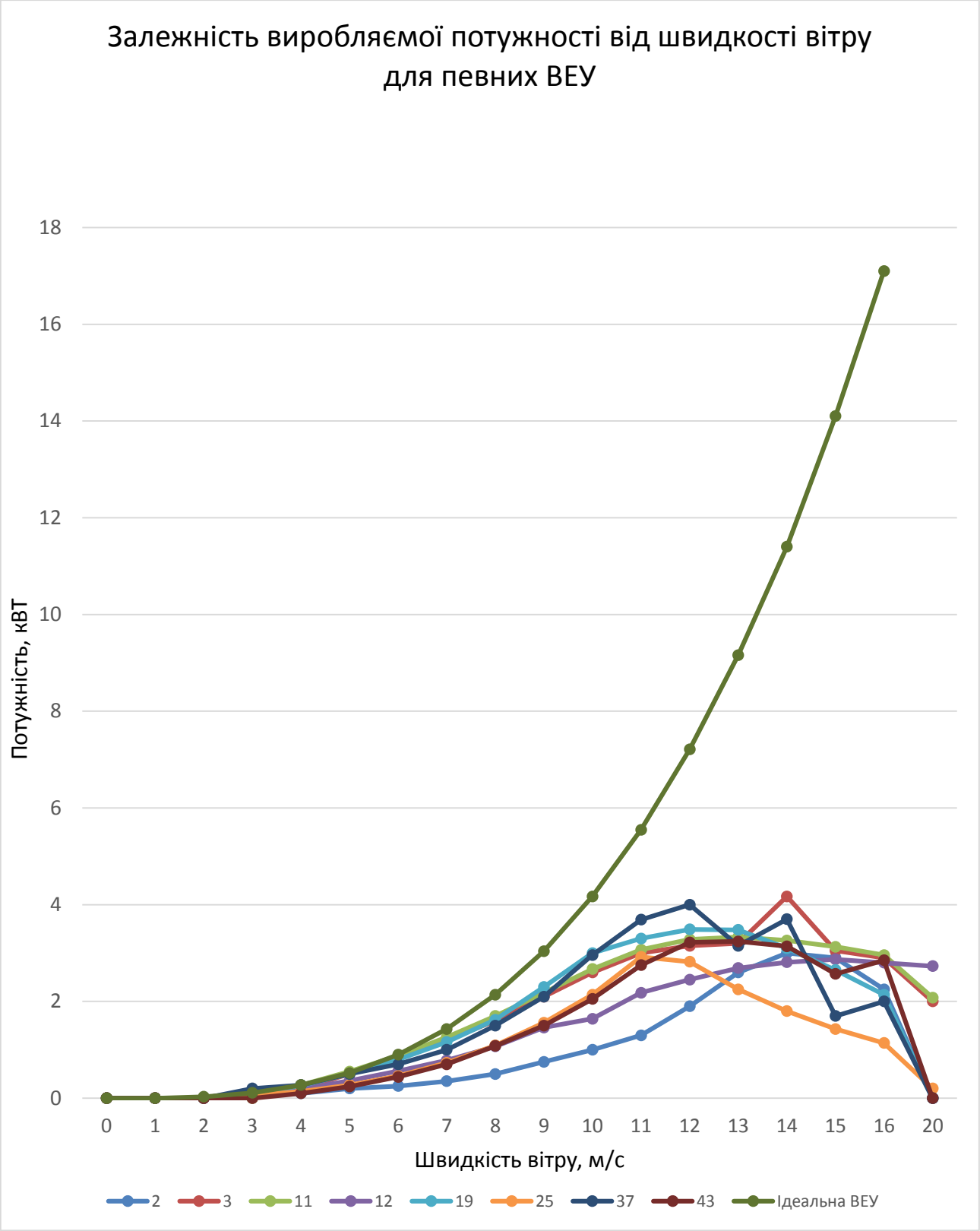


Рисунок 3.8 – Криві потужності для обраних ВЕУ малої потужності; по номінальної потужності: №2 – 2 кВт, №3 – 3 кВт, №11 – 3кВт, №12 – 2.5 кВт, №19 – 3кВт, №25 – 2кВт, №37 – 3кВт, №43 – 3кВт, Ідеальна ВЕУ 3 кВт, що працює за законом Бетца

Аби проаналізувати ефективність даних ВЕУ прорахуємо коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП). Він розраховується як відношення генерації ВЕУ по факту до номінальної потужності. Генерація, що виробляє ВЕУ по факту розраховується за формулою:

$$P_{\text{генерації за фактом}} = \sum P_i \times \nu_i \tag{3.4}$$

де P_i – потужність, що виробляється при відповідній швидкості$

ν_i – частотність вітру з даною швидкістю.

Для розрахунку ми обрали ВЕУ, що розміщений на графіку на рис. 3.8 під номером 43, з номінальною потужністю 3 кВт. Дані про частоту вітру взяли з рис. 3.7. І в результаті обчислень отримали значення:

$$P_{\text{генерації}} = 0{,}174 \text{ кВт}$$

Отже, КВВП для даної установки буде складати:

$$\text{КВВП} = \frac{0{,}174 \text{ кВт}}{3 \text{ кВт}} = 0{,}058 = 5{,}8\%$$

Підводячи підсумок, можна зробити висновок, що коефіцієнт використання встановленої потужності ВЕУ, що експлуатуються за умов, коли середня швидкість вітру складає 3.1 м/с, дуже низький КВВП= 5,8% . Зазвичай при ефективному використанні малих ВЕУ він знаходиться в межах 17-23%.

По іншому виглядає ситуація з розподілом швидкостей вітру з висотою, де суттєво зменшується вплив, так званої «шорсткості» поверхні Землі на швидкість повітряного потоку.

3.3 Аналіз залежності швидкості вітру від висоти

У дослідженнях, присвячених вивченню зміни швидкості вітру з висотою яскраво простежується проблемний (предметний) підхід і зв'язок з розв'язуваної завданням. Це обумовлює вибір і вихідних даних (термінові, добові і місячні середні, максимальні швидкості), і методів їх кліматологічної обробки. Зокрема, до них відносяться проблема врахування впливу мезомаштабних явищ на розвиток процесів тепло- і вологообмін, турбулентного тертя, що відбуваються в прикордонному шарі атмосфери.

Питання пов'язані з математичним описом режиму середніх швидкостей вітру на різних висотах приземного шару ще не знайшли остаточної відповіді і наукові пошуки в цьому напрямку тривають. Особливість завдання полягає в тому, що на відміну від синхронних профілів, для яких є цілий ряд варіантів рішення, рівень теоретичної опрацювання питань інтерполяції (екстраполяції) кліматичних характеристик вітру по висоті в приземному шарі атмосфери значно нижче. Пояснюється це, головним чином, складністю і різноманіттям фізичних процесів, що формують вертикальні розподілу кліматичних параметрів, які назвати профілями, через їх несинхронність, можна лише умовно. Після вивчення вертикальних профілів швидкостей вітру була отримана інтероляційна формула:

$$\frac{\overline{V_z}}{\overline{V_h}} = (\frac{z}{h})^m \qquad (3.5)$$

де $\overline{V_z}$ та $\overline{V_h}$ - середні швидкості вітру на довільній висоті z і флюгера h метрів.

У стандартах більшості країн Західної Європи параметр m прийнятий рівним 1/7 [14], для рівнинної частини території колишнього СРСР - 0,2. Однак в останні десятиліття спільної думки щодо параметрів m і z не склалося. В

роботі, присвяченій розробці методів оцінки розвитку вітроенергетики США [15] відмічається, що степеневий закон може застосовуватися для усереднення енергії вітру і значення m = 1/7 в цьому випадку достатньо точно обґрунтовано. У ній на підставі даних, отриманих на вежах в чотирьох різних місцевостях США, приймається середнє значення m = 0,23 ± 0,03. Також, данні з телебашти в Філадельфії дають m = 0,34 [16].

В наукових роботах питання про вибір закону зміни швидкості вітру з висотою остаточно не вирішений.

За формулою 3.5 середня швидкість вітру для Хорватії на висоті 500 метрів буде становити 6,78 м/с.

Таким чином, вітровий потенціал при поверхневих шарів атмосфери є значно привабливішим з точки зору використання встановленої потужності традиційних малих ВЕУ. Разом з тим економічна доцільність їх експлуатації не передбачає розбудову щогл, висота яких перевищує 20 метрів, отже перспективними у цьому випадку можуть бути так звані «летючі» ВЕУ.

3.4 Аеродинамічна ефективність «летючої» ВЕУ

Оцінки, наведені у попередньому підрозділі, свідчать про те, що, зокрема, на території харківської області де середні швидкості вітру сягають значення 4,25 м/с, можна очікувати у поверхневих шарах атмосфери середньої швидкості вітру:$\overline{V_t} = 4.25 \times 2.187 = 9.3$ м/с.

Оскільки, аеродинамічна потужність:

$$P = \frac{k \cdot s \cdot \rho}{2} \times V^3 \qquad (3.6)$$

де $k = 0{,}593$ – коефіцієнт Бетца;

s – площа кола;

ρ – щільність повітря;

V – швидкість повітря;

пропорційна кубу швидкості вітру, можна очікувати збільшення встановленої потужності ВЕУ, що досліджується, у 10,5 разів. Підтвердимо це розрахунками:

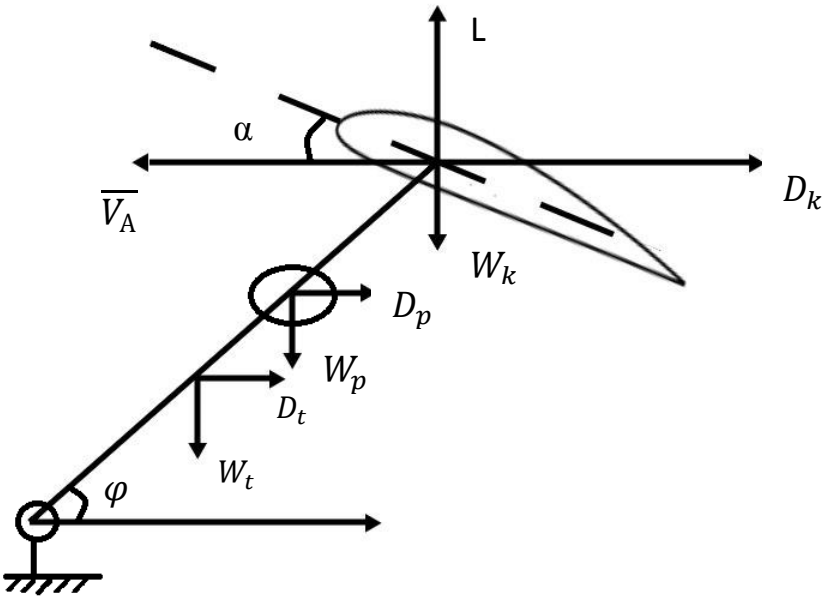
$$(\frac{\overline{V_z}}{\overline{V_h}})^3 = (\frac{9{,}30}{4{,}25})^3 = 10{,}5$$

Перспектива, нічого не змінюючи в конструкції досліджуваної ВЕУ з концентратором, отримати встановлену потужність у 250-300 Вт, є підґрунтям для проведення аналізу перспектив її експлуатації з аеродинамічною системою типу крила. Передусім, необхідний перегляд матеріалів, з яких виготовляється гондола ВЕУ, що передбачалося для натурних досліджень у стаціонарних умовах. Найбільш привабливим матеріалом для виготовлення корпусу гондоли є склопластик, або скловолокно ($\rho = 2.5 \times 10^3 м^3$), що дасть змогу забезпечити її масу в межах 1 кг. Турбіна з генератором, що не передбачають модернізації на першому етапі, мають масу 1,8 кг. Каркас крила також може бути виготовлений із скловолокна і покритий нейлоном RipStop ($\rho = 1.14 \times 10^3 м^3$). За таких матеріалів маса аеродинамічної системи не перевищить 1,2 кг. Маса тросу з провідною частиною також знаходиться в межах 1 кг.

Отже, значна маса летючої ВЕУ з аеродинамічною системою може скласти 5 кілограм.

Для того, щоб підняти летючу ВЕУ на задану висоту, знадобиться повітряна куля багаторазового використання, що приводиться в дію газовою горілкою з визначеним об’ємом газу та/або блоком для дистанційного керування. Конструкція такої повітряної кулі та необхідних для її виготовлення матеріалів детально описано в підрозділі 1.4.

Проаналізуємо баланс сил, що можуть діяти на систему летючої ВЕУ в експлуатаційному режимі з метою оцінки підйомної сили крила, необхідної для утримання ВЕУ на заданій висоті.



α – кут атаки крила;

$\overline{V_A}$ – швидкість крила відносно вітру;

L – підйомна сила крила;

D_k – сила лобового опору крила;

W_k– вага (сила тяжіння) крила;

D_p – сила лобового опору малої ВЕУ з концентратором;

W_p – вага ВЕУ;

D_t–сила опору троса;

W_t–вага тросу;

Т–сила натягу тросу.

Очевидно,

$$L - W = T \sin \varphi$$

$D = T\,cos\,\varphi$, тоді

$$L = W + D \tan \varphi \tag{3.7}$$

де $W = 50\ H$; $D_k = \frac{1}{2} \times \rho \times V_A^2 \times S \times C_D = 600\ H.$

S=10 м^2 – площа крила;

C_D=1,0 – коефіцієнт опору крила;

V_A =10 м/с – швидкість;

$$D_p = \frac{1}{2} \times \rho \times V_A^2 \times S_p \times C_p = 13{,}2\ H$$

S_p – площа максимального перерізу гондоли;

C_p – коефіцієнт опору гондоли.

$$D_t = \frac{1}{2} \times \rho \times V_A^2 \times a \times H \times C_D = 36\ H$$

а = 5мм;

$$H = 200 \text{ м}$$

$$C_d = 0{,}6$$

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times V_A^2 \times S \times C_L = 1{,}4 \times D_k = 840\ H$$

За цих даних на основі рівняння (3.5) встановлюємо, що система летючої ВЕУ може перебувати в стаціонарному стані під кутом до горизонту $\varphi = 50°$.

Зазначимо, що для проведених оцінок ми використали досить песимістичні дані про якість крила $\frac{L}{D_k} = \frac{C_L}{C_D} = 1{,}4$, які зазвичай притаманні звичайним кайтам. У випадку крил, виготовлених промисловим способом з продуванням в аеродинамічній трубі значення якості крила сягають $\frac{L}{D_k} = 20$, що притаманно, наприклад, моделі літака C-5A. За таких кутів видовження тросу складає 1,3 м на кожен метр висоти.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз технічних характеристик традиційних вітроенергетичних установок (ВЕУ), які відносяться до класу дуже малих показав, що в реальних умовах експлуатації одним із головних показників їх ефективної експлуатації є коефіцієнт відбору встановленої потужності (КВВП), який визначається на основі експертних даних про частотний розподіл швидкості вітру в конкретному регіоні та кривої встановленої потужності турбіни.

Один із нових шляхів забезпечення високих значень КВВП малих ВЕУ пролягає через їх використання у поєднанні з аеродинамічними системами різного типу у приповерхневих шарах атмосфери, де середні швидкості вітру в рази більші.

Проведені дослідження щодо вдосконалення розробленої вітроенергетичної установки закритого типу з концентратором повітряного потоку показали, що:

1) зменшення кількості лопатей турбіни з 20 до 5 дозволяє збільшити її швидкохідність і забезпечити роботу з оптимальною ефективністю;
2) після модернізації з використанням сучасних конструкційних матеріалів на основі склопластиків, вуглецевих волокон і нейлонів дана ВЕУ може експлуатуватися з аеродинамічними системами типу крила на висотах до 500 метрів, що дасть змогу забезпечити її стабільну роботу з номінальною потужністю;
3) подальша оптимізація розглянутої ВЕУ і наступне моделювання ВЕУ потужністю 1 кВт можливі з використанням метода масштабування за рахунок пропорційного збільшення лінійних розмірів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики IRENA, REMAP – 2030 Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні до 2030 року // джерело: URL: www.irena.org

2. Безруких П. П., Безруких П. П. (мл.), Грибков С. В. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / Под общей редакцией П. П. Безруких. – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2014. – 304 с.

3. Інтернет-джерело, URL:https://www.power-technology.com/features/wind-energy-by-country/

4. Інтернет-джерело, URL : http://botievskaya.dtek.com

5. Гук І. Вітер в турбінах : [укр.] // Наша газета (корпоративневидання ДТЕК). — квітень 2013. — № 6 (113).

6. УВЕА. Вітроенергетичний сектор України 2018. Огляд ринку.

7. Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. Основи вітроенергетики. Підручник–Дніпро: НГУ, 2015. –335с.

8. Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П. etal. АТЛАС ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ТА НЕТРАДИЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ: Енергія вітру, сонячна енергія, енергія малих рік, енергія біомаси, геотермальна енергія енергія довкілля, енергія скидного енерготехнологічного потенціалу, енергія нетр. Київ: НАН УКРАЇНИ. ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ. ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ. 2001.

9. МАЛЯРЕНКО В.А., ГАЛЕТИЧ І.К., ВЕРГЕЛЕС Ю.І. ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ: СУЧАСНИЙ СТАН, ТЕНДЕНЦІЇ, ПЕРСПЕКТИВИ.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕЭНЕРГЕТИКАЭНЕРГОАУДИТ. 2012no. 7(101), pp. 36–43.

10. Lew D.J. Alternatives to coal and candles: Wind power in China. Energy Policy. 2000, vol. 28, no. 4, pp. 271–86. doi: 10.1016/S0301-4215(99)00077-4.

11. В. Ю. Рогов ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗВИТИЯ АЭРОСТАТНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ // Социально-экономические и общественные науки // №4 (75). -2013. – с. 204-209

12. Ткаченко В. І., Москвітін О. В., Казарінов Ю. Г. та Шахова О. М. Електрогенератор постійного струму :патент UA88420 U МПК (2014.01) H02K 16/00 H02K 3/47 (2006.01) ; Заявл. 08.11.2013 ; опубл. 30.09.1996, Бюл.№5.

13. Інтернет-джерело, URL : https://resst.kipt.kharkov.ua/low-power_wind_generator.html

14. Заварина *М. В.* Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971.– 162с.

15. А. Б. Рыхлов, Закономерности изменения средней скорости ветра с высотой в приземном слое атмосферы на юго-востоке европейской части России для решения задач ветроэнергетики // Ученые записки, № 20, стр. 89-99.

16. Ветроэнергетика:Новейшиеразработки(Подред.Д.деРензо.пер.сангл.).–М.:Энергоатомиздат,1982.–271 с.

17. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. Москва, 2011. –144с.

18. Zdenko Simic – Small wind turbines – A unique segment of the wind power market // Renewable Energy №50, -2013.