

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Г. Є. Монастирський

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності _____ 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

(код і назва)

на тему: **Аеродинаміка закрученого потоку повітря за одиничною
трилопатевою вітроустановкою**

Виконав: студент 4 курсу, групи ФФ-83

_____ Стоян Владислав Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник старший викладач, к.т.н. Панченко Н. А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____

(номер розділу)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент старший викладач, к.ф.-м.н Димитрієва Н. Ф.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Національний Технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий фізико-технічний інститут
Кафедра фізики енергетичних систем

Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський)
Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

В. о. завідувача кафедри

Монастирський. Г. Є.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« 10 » вересня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську роботу студенту

Стояну Владиславу Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

- Тема роботи: Аеродинаміка закрученого потоку повітря за одиничною трилопатевою вітроустановкою,
науковий керівник роботи старший викладач, к.т.н. Панченко Н. А.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від « » 2022 р. №
- Термін подання студентом роботи « » 2022 р.
- Об'єкт дослідження: Аеродинамічні процеси взаємодії потоку вітру з лопотями вітроенергетичної установки
- Предмет дослідження: Ефективність вітроенергетичної установки при середньорічних швидкостях на території України
- Перелік завдань, які потрібно розробити: Змоделювати 3-лопотеве вітроколесо та визначити область взаємодії його з вітром; В програмному продукті ANSYS провести моделювання процесу взаємодії лопотей з трьома різними швидкостями вітру: 3 м/с, 5 м/с та 7 м/с; Виконати аналіз даних та порівняти їх з турбіною GE 1.5 xle.
- Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація — 21 аркуш А4

7 Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

8 Дата видачі завдання « 10 » вересня 2021 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Опрацювання літератури за темою	10.09.2021 - 31.10.2021	
2.	Написання літературного огляду	01.11.2021 - 20.12.2021	
3.	Моделювання геометрії вітроколеса	05.01.2022 - 18.03.2022	
4.	Написання другої частини дипломної роботи	19.03.2022 - 11.05.2022	
6.	Написання третьої частини дипломної роботи	15.05.2022 - 29.05.2022	
7.	Написання висновків	30.05.2022 - 31.05.2022	
8.	Підготовка доповіді та презентації	07.06.2022 - 10.06.2022	
9.	Подання роботи на рецензування	19.06.2022	
10.	Подання роботи до захисту	23.06.2022	

Студент

_____ (підпис)

В. В. Стоян

_____ (В. В. Стоян)

Науковий керівник роботи

_____ (підпис)

Н. А. Панченко

_____ (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи за обсягом становить 50 сторінок містить 11 таблиць, 36 рисунків та 1 додаток. Для дослідження було використано 15 бібліографічних найменувань.

Метою роботи є дослідження ефективності вітрової установки на місцевості з певною швидкістю вітру та порівняння її характеристик з GE 1.5xle. Об'єктом дослідження є процес взаємодії вітру з лопотями установки, що показує ефективність вітротурбіни при різних вітрових навантаженнях.

Виконане моделювання вітроколеса, а саме геометрія лопотей (нестационарна область). Цю область було поміщено у середовище (стаціонарна область) де відбувалась взаємодія лопотей з вітром. Проведено моделювання при трьох різних швидкостях вітру 3.5 м/с, 5 м/с та 7 м/с.

Результати проведеного моделювання були порівнянні з результатами турбіни GE 1.5xle, і показано що симуляція кривої потужності в ANSYS має таку ж тенденцію як і реальні дослідження в аеродинамічній трубці для GE 1.5xle. Також аналіз результату проведеного моделювання показав, що максимальна ефективність турбіни є найбільшим для швидкості вітру 3.5 м/с.

Ключові слова: *моделювання, лопоті, швидкість вітру, вітроколесо, вітротурбіна, коефіцієнт потужності, коефіцієнт швидкості.*

SUMMARY

The diploma work explanatory note includes 50 pages of the text, 11 tables, 36 illustrations and 1 appendix. At the problem modern state analysis, overall 15 references were used.

The aim of the work is to study the efficiency of a wind turbine in the field with a certain wind speed and compare its characteristics with the GE 1.5xle. The object of the study is the process of interaction of wind with the blades of the installation, which shows the efficiency of the wind turbine at different wind loads.

Modeling of a wind wheel, namely geometry of blades (non-stationary area) is executed. This area was placed in an environment (stationary area) where the interaction of the blades with the wind took place. Simulations were performed at three different wind speeds of 3.5 m/s, 5 m/s and 7 m/s.

The simulation results were comparable to those of the GE 1.5xle turbine, and it was shown that the power curve simulation in ANSYS has the same trend as the actual wind tunnel experiments for the GE 1.5xle. Also, the analysis of the simulation result showed that the maximum efficiency of the turbine is the highest for a wind speed of 3.5 m/s.

Key words: *modeling blades, blades, wind speed, windmill, wind turbine, power factor, speed factor.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. Теоретичні засади проблеми	7
1.1. Енергетичний сектор в Україні та у світі в цілому	7
1.2. Вітроенергетичний потенціал в Україні	10
1.2.1. Аналіз місцевості для розташування станцій	12
1.2.2. Переваги перед традиційними джерелами енергії	14
1.3. Види та конструкції вітроенергетичних установок	15
1.3.1. З вертикальною віссю обертання	15
1.3.2. З горизонтальною віссю обертання	18
1.3.3. Установки малої, середньої та великої потужності	20
1.4. Теоретична взаємодія вітрового потоку та лопатей установки	21
1.5. Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. Моделювання роботи вітроенергетичної установки.	27
2.1. Геометрія задачі. Будова розрахункової сітки	27
2.2. Постановка умов задачі	32
2.3. Висновки до розділу 2	34
РОЗДІЛ 3. Результати моделювання. Оцінка ефективності вітротур-	
біни	35
3.1. Результати моделювання	35
3.2. Висновки до розділу 3	42
ВИСНОВКИ.	45
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	47
ДОДАТКИ.	49
Додаток А.	49

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ГЕС — гідроелектростанція
ГАЕС — гідроакумулююча електростанція
СЕС — сонячна електростанція
ВЕС — вітрова електростанція
ОЕС — об'єднана енергетична система
АЕС — атомна електростанція
ВДЕ — відновлювальні джерела енергії
ВЕУ — вітроелектрична установка
ТЕС — теплова електростанція

ВСТУП

Останні 50 років людство використовує в якості енергії високовартісні вуглеводні матеріали. Паралельно шукаючи нові методи здобуття екологічно чистої енергії. Цей пошук пов'язаний з обмеженням природних енергетичних ресурсів, які крім того забруднюють навколишнє середовище. Тенденція на перехід до відновлювальних джерел енергії з кожним роком тільки зростає.

За прогнозом у наступні 5 років у світі, виробництво з відновлюваних джерел енергії збільшиться на 50%, до майже 9 745 ТВт/год, що еквівалентно сукупному попиту на електроенергію Китаю та Європейського Союзу. Загалом, до 2025 року частка відновлюваних джерел енергії в загальному виробництві електроенергії складатиме 33%, що повністю перевершить виробництво електроенергії з вугілля. Ще один цікавий прогноз був опублікований Європейською асоціацією електроенергетики Eurelectric у звіті «Енергетичний барометр» (*англ. Power Barometer*), відповідно до якого, до 2030 року майже 80%, електроенергії в Європі може вироблятися виключно відновлюваними джерелами енергії. Дана тенденція підкріплюватиметься активною відмовою від вугільної генерації. Більше того, до 2030 року 21 європейська країна повністю відмовиться від вугільної генерації (*станом на сьогодні таких країн нараховується 9*).[1]

Основною задачею яка стоїть перед інженерами залишається збільшення коефіцієнту корисної дії установок які використовуються для видобутку електроенергії; використання дешевого матеріалу для енергоустановок; мінімізувати шкідливий вплив на навколишнє середовище та вивчити який тип відновлювальних джерел енергії буде корисним для певної території в залежності від кліматичних умов.

В Україні конкурентно спроможний вид відновлювальної енергії, порівняно з атомними та тепловими електростанціями, є вітрова енергетика.

Коефіцієнт корисної дії якої залежить не тільки від конструкції вітроустановки, а також від місцевості і швидкості вітру.

Мета даної роботи — аналіз вітрової установки з подальшим дослідженням та моделюванням її характеристик на конкретній місцевості.

Завдання полягає у дослідженні ефективності вітрової установки при невеликих швидкостях вітру на території України.

Методом дослідження є моделювання взаємодії вітрового колеса з повітрям у комп'ютерному середовищі ANSYS.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОБЛЕМИ

1.1. Енергетичний сектор в Україні та у світі в цілому

Одним з важливих складових безпеки країни є її енергетична безпека. Дуже важливо мати співвідношення джерел, щоб гарантувати стовідсоткове, надійне електропостачання країни в різних умовах, а саме в день чи в ночі та відповідно літом і зимою. Структурно енергетичний сектор України складається з двох великих підгалузей: паливної та електричної електроенергетики. Підсектор палива складається з 5 основних компонентів: природний газ, нафта, вугілля, паливо з біомаси, транспортування та зберігання природного газу. Підгалузь електроенергетики також складається з 5 основних компонентів: теплову і атомну енергетику, відновлювані джерела електроенергії: гідроенергетику (гідроелектричні станції) і гідроакumuлюючі станції (ГАЕС); сонячні електростанції (СЕС) та вітряні електростанції (ВЕС). В Україні є також інші джерела енергії, але їх вклад в загальну систему енергетичного сектору є не великим. На жовтень 2021 року [2], енергосистема України має таку встановлену потужність (рис. 1.1), а саме 56067.40 МВт:

Але не дивлячись на теплову енергетику і її деградацію, провідне місце посіла атомна енергетика, яка виробляє більше 50% всієї енергії в країні. Навіть якщо цей спосіб відносно екологічний, він також має свої недоліки. Перше – це безпека, цьому приділяється велика увага, але навіть, при тому що атомні станції забезпечують майже на половину всю Україну енергією, все ж потрібне додаткове фінансування для запобігання аварій на таких об'єктах як атомні енергоблоки. Друге – це термін експлуатації блоків. Майже всі атомні енергоблоки загальною потужністю 3000 МВт мають

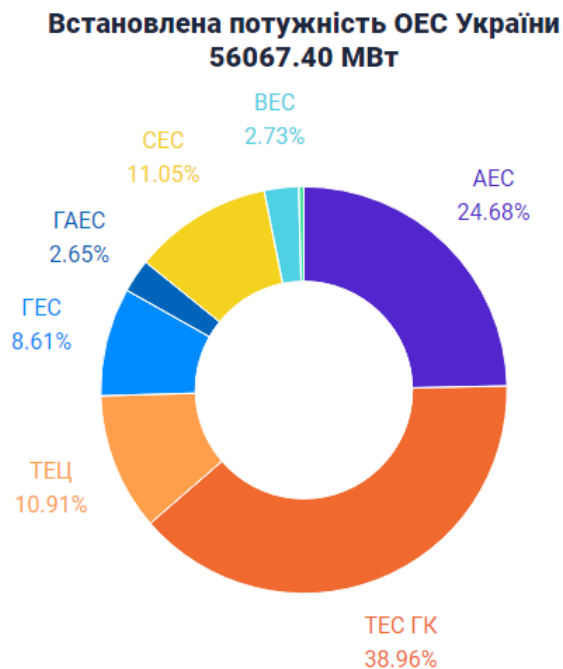


Рис. 1.1. Потужність обладнання ОЕС України

бути виведені з роботи до 2035 року. Це може бути вирішено побудовою нових станцій і нових енергоблоків, але для впровадження нового блоку від процесу побудови до запуску має пройти 5-10 років. Якщо сказати про світ, то частка виробітку електроенергії на АЕС в світі перебуває на рівні 16%. У таких країнах як Швеція, Бельгія, Японія, Південна Корея, що не мають у своєму розпорядженні достатніх запасів органічного палива, АЕС стали основним джерелом електричної енергії.

Іншою ланкою енергосистеми є гідроелектричні станції. Це найбільш екологічний спосіб для отримання електроенергії, не беручи до уваги відновлювані джерела електроенергії, який становить 8% або 4600 МВт від загальної потужності всієї енергосистеми. Загалом ми використовуємо 60% всього потенціалу гідроенергетики, і в основному за рахунок Дніпровської та інших великих ГЕС. Для побудови нових станцій потрібне досить велике фінансування та вирішення проблем із затопленням територій, особливо територій з родючими ґрунтами. За даними організації з використання відновлювальної енергії в країнах, економічно досяжний

потенціал гідроенергії у світі визначено на рівні 7300 ТВт на годину на рік. У таких країнах як Швейцарія та Італія малими є ГЕС з установленою потужністю до 3 МВт, а в інших, в тому числі і в Україні, до 10 МВт. Відділ ООН із промислового розвитку до малих ГЕС також відносять електростанції з встановленою потужністю до 10 МВт (Греція, Ірландія, Португалія, Україна). Комітет ООН із промислового розвитку до категорії МГЕС відносить гідроелектростанції потужністю до 10 МВт [3]. А в США після реформ цю планку було підвищено до 15 МВт. Світовими лідерами по потужностях є Китай – 47 ГВт, Японія – 4 ГВт, та США – 3,4 ГВт.

І остання ланка енергетичного сектору України це – відновлювальні джерела енергії. Встановлені потужності ВДЕ в Україні мають тенденцію до щорічного зростання. Середньорічний темп зростання встановленої потужності ВДЕ складає приблизно 31%. Станом на жовтень 2021 року встановлення потужність ВДЕ складає 7954.6 МВт і поділяється за секторами [2]:

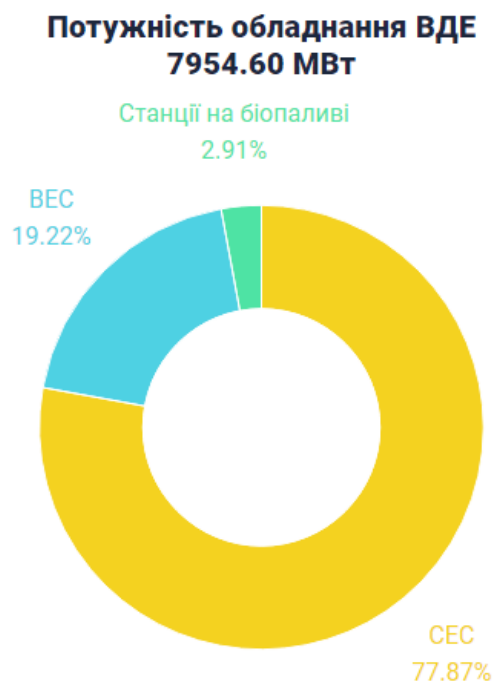


Рис. 1.2. Потужність обладнання ВДЕ

З (рис. 1.2) бачимо що найбільшу частку займають сонячні електро-станції – 77,87%, далі вітрові – 19,22%, і найменше це станції на біопаливі, а саме 2,91% від всієї потужності.

1.2. Вітроенергетичний потенціал в Україні

В даний час вітроенергетика є галуззю яка найшвидше розвивається у світовій електроенергетиці. Вітряна енергія може вироблятися за допомогою великих вітроелектростанцій так і середніх вітрових установок чи малих вітрогенераторів. За оцінками, потужність вітрової електроенергії зросла на 93 ГВт в усьому світі в 2020 році – у тому числі понад 86,9 ГВт на суші, найвищий показник на сьогодні, і майже 6,1 ГВт на березі. Цей рекорд був на 45% вище попереднього, у 2015 році (63,8 ГВт), і майже збільшився на 53% порівняно з установками 2019 року.

Але навіть не дивлячись на глобальні проблеми (економічні та політичні) до кінця року загальна світова потужність вітроенергетики зросла на 14% порівняно з 2019 роком наблизившись до 743 ГВт (707,4 ГВт на суші та решта на березі); Швидке зростання в 2020 році [4] було пов'язано з різким зростанням потужностей у Китаї.

Зараз в Україні спостерігається бурхливий розвиток вітроенергетичної галузі, такий розвиток обумовлений, введенням різних пільг для розробників та споживачів альтернативної енергетики, а також прийняттям певних тарифів, їх називають «зелені тарифи», на електроенергію, отриману з використанням ВДЕ, які є одними з найвищих в Європі. Саме для вітроустановок потужністю понад 2 МВт величина такого «зеленого» тарифу складає близько 11,3 євроцента за 1 кВт за годину. Встановлені «зелені» тарифи діятимуть до 2030 року. Використовуючи дані Української вітроенергетичної асоціації, завдяки прийняттю пільг на виробництво і

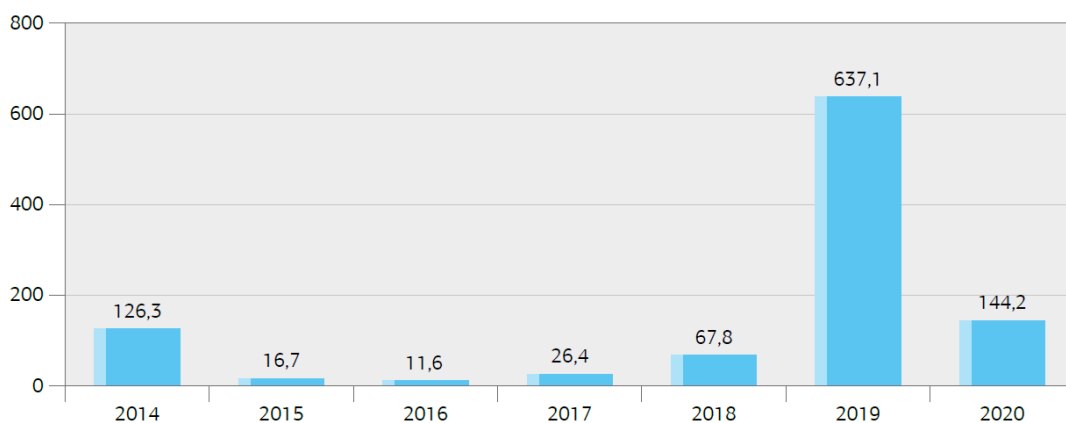


Рис. 1.3. Щорічний приріст вітроенергетичних потужностей, 2014-2020, МВт

ввезення устаткування для виробництва "чистої" енергії, а також дії "зелених" тарифів, тільки за останні півтора роки в Україні була запущена в експлуатацію половина із загальної кількості встановлених ВЕС. Важливо зазначити, що тільки в 2011 році уперше в Україні були встановлені вітротурбіни мегаватного класу. Практично усі нові вітроенергетичні потужності (65,5 МВт), були введені в експлуатацію у рамках розвитку приватних інвестиційних проектів [5]. Можна зробити висновок що завдяки підтримці держави ринок вітроенергетики в Україні стрімко розвивається.

Але в Україні порівняно з 2019 роком ситуація не така як у світі в цілому. Якщо у 2019 році було введено 637,1 МВт потужностей, то у 2020 всього 144,2 МВт (рис. 1.3) у чотирьох областях України. А загальна вітроенергетична потужність України (рис. 1.4) становить 1314,1 МВт.

Навіть незважаючи на те що щорічний приріст зменшився, вітроенергетичний сектор залишається на другій позиції по встановленій потужності, після сонячної. На жовтень 2021 року, загальна потужність вітрових електростанцій становить 19,22% (рис. 1.2)) в секторі ВДЕ, і 2,73% у всьому енергетичному секторі країни. На даний час в Україні знаходиться 31 ВЕС загальною потужністю 1314,1 МВт. 27 з них працюють і постачають Україну енергією, 4 з них знаходяться на тимчасово непідконтрольній території, і не можуть постачати електроенергію до ОЕС України. (Додаток А.1)

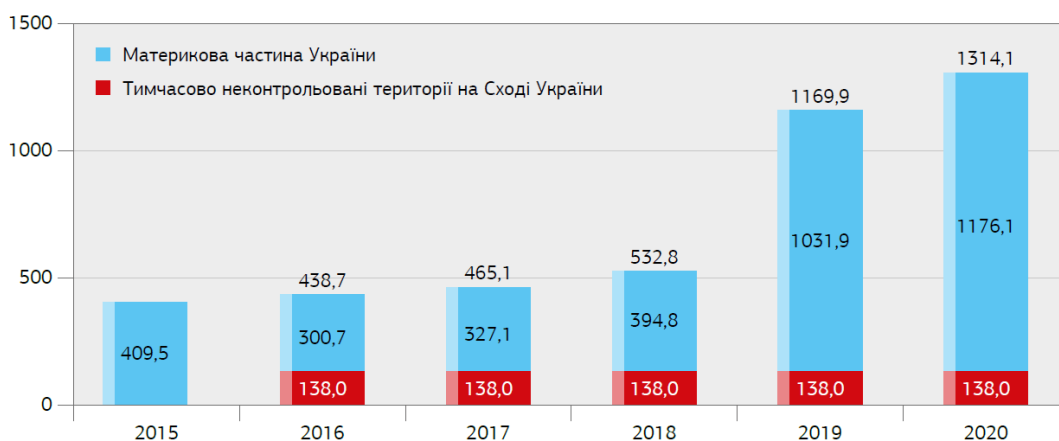


Рис. 1.4. Загальна встановлена потужність вітроенергетичного сектору на материковій частині України та територіях ОРДЛО (без АР Крим) за період з 2015 по 2020 роки, МВт

1.2.1. Аналіз місцевості для розташування станцій

Якщо зробити розбивку по областях України, за потужностями вітроенергетичного сектору, то на першому місці буде Запорізька область – (497,8 МВт), далі Херсонська – 439,1 МВт і Миколаївська – 152,1 МВт.(рис. 1.5)

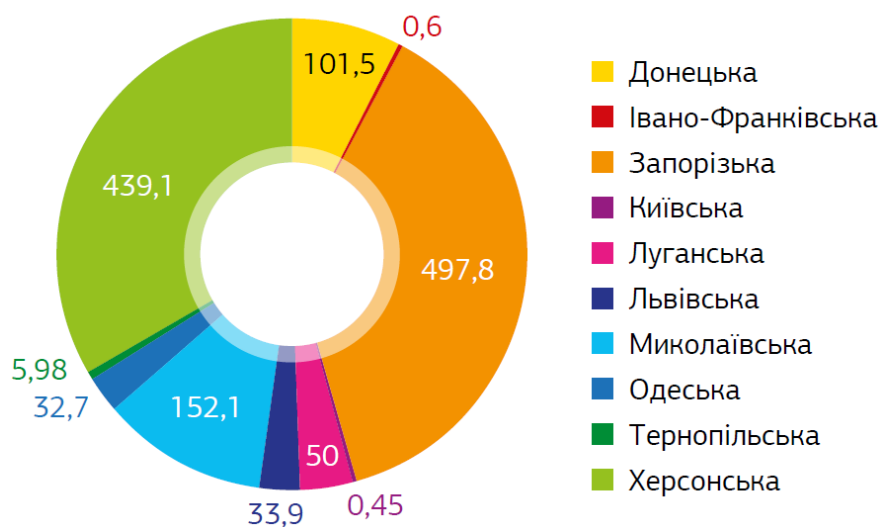


Рис. 1.5. Встановлена вітроенергетична потужність за областями материкової частини України у 2020 році, МВт

З (рис. 1.5) добре видно що не по всій території України встановленні ВЕС, це пояснюється умовами які необхідні для функціонування, а саме

середньорічною швидкістю вітру. Що більша швидкість тим більше енергії можна отримати. За малих швидкостей (менше 1,5 м/с) установки не працюють, а при ураганах (більше 25 м/с) її зупиняються з міркувань безпеки. Щоб відбувалась генерація [1], яка є економічно доцільною швидкість вітру повинна бути не менше 5 м/с. Інша умова це – рівномірність і повторюваність навантажень. З (рис. 1.6) можемо побачити що саме в цих регіонах (рис. 1.5) є доцільно будувати ВЕС.



Рис. 1.6. Середньорічна швидкість вітру в Україні

За минулі роки вітроенергетичний сектор поставив близько 3200 млн кВт/год «зеленої» енергії, або 2,2% від загального обсягу генерації. Навіть незважаючи на наслідки пандемії інвестори і на далі зацікавлені в капіталовкладенні у вітроенергетичні проекти, наприклад у 2020 році обсяг інвестицій склав 154 млн Євро.

1.2.2. Переваги перед традиційними джерелами енергії

Вітрова енергія є досить перспективним напрямком і має велику кількість переваг включаючи енергетичні, економічні та екологічні переваги. Якщо оцінити всю енергію вітру у світі, то вийде число яке у 80 разів більше ніж сумарне енергоспоживання людиною, але технічно може бути використана тільки частка від цього показника. Проте розвиток технологій у цій галузі має величезний потенціал.

Візьмемо переваги для довкілля. Перше – вітер це відновлювальне джерело енергії. При використанні ВДЕ зменшується залежність від викопного палива, а робота одного вітрогенератора потужністю 1 МВт скорочує щорічні викиди в атмосферу 1800 тон CO₂, 9 тонн SO₂, 4 тонн оксидів азоту.

Іншою, і досить вагомою перевагою є економічна складова ВЕС. За останні роки ціна на обладнання, встановлення та обслуговування вітроенергетичних установок значно знизилась. І сприяло тому що навіть кінцевий споживач може дозволити собі встановити вітроенергетичну установку для власних потреб або для продажу в мережу. А в країнах де існують дотації та пільги, «домашній вітряк» це вже не рідкість. Розширення ринку вітроенергетики призвело до падіння цін на вітрову енергію, за останні роки кіловат вітрової енергії подешевшав вдвічі. Побудова нової ВЕС є більш перспективною ніж побудова нових атомних електростанцій. Так, якщо порівняти ціну за кіловат енергії, то кіловат ВЕС значно дорожче ніж кіловат атомної енергії, але побудувати нову атомну станцію з нуля потребує величезних інвестицій після яких кіловат атомної енергії буде коштувати в рази дорожче ніж кіловат енергії ВЕС. Тому на майбутнє доцільніше і вигідніше будувати ВЕС, ніж споруджувати нові АЕС.

Ще однією перевагою вітроенергетики є можливість розміщення турбіни там, де це необхідно. Після проведення досліджень і пошуку ділянок з достатнім вітром експерти можуть розмістити турбіни в потрібних областях. Ці райони, як правило, безлюдні (наприклад, морські вітряні турбіни). Насправді офшорні вітри, як правило, дмуть сильніше і рівномірніше, ніж на суші, забезпечуючи потенціал для збільшення виробництва електроенергії та більш плавну та стабільну роботу, ніж наземні вітроенергетичні системи.

1.3. Види та конструкції вітроенергетичних установок

Вітроенергетичні установки перетворюють кінетичну енергію вітру за допомогою лопатей ротора, які приводяться в дію потоком повітря. За конструкцією такі установки нагадують генератори або турбіни які використовують на ТЕС або АЕС.

Залежно від осі обертання і напрямку вітрового потоку, вітротурбіни поділяються на ВЕУ:

- 1) З вертикальною віссю обертання
- 2) З горизонтальною віссю обертання

1.3.1. З вертикальною віссю обертання

Існує 4 види роторів з вертикальною віссю:

- 1) Ротор Дар'є
- 2) Ротор ортогонального типу (Ротор Еванса)
- 3) Ротор Савоніуса
- 4) Ротор карусельного типу (ротор Масгрува)

У ротора Дар'є (рис. 1.7) обертовий момент створюється підйомною силою. Сам ротор складається з двох або трьох тонких вигнутих лопатей. Недолік цього ротора те що він сам не може почати обертатися, тому використовують генератор в режимі двигуна.



Рис. 1.7. Ротор Дар'є

А у ротора Еванса (рис. 1.8) обертальний момент створюється підйомною силою двох вертикально розташованих лопатей, як і для ротора Дар'є потрібний генератор для розкрутки.

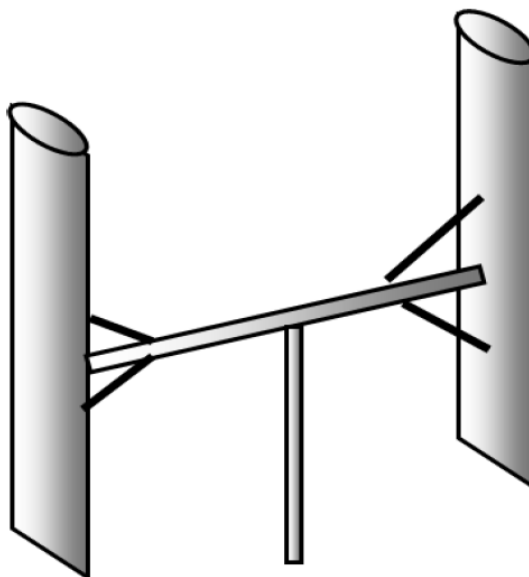


Рис. 1.8. Ротор Еванса

Ротор Савоніуса (рис. 1.9) виглядає як розрізана на дві частини бочка, яку посадили на вісь, обертається силою опори.

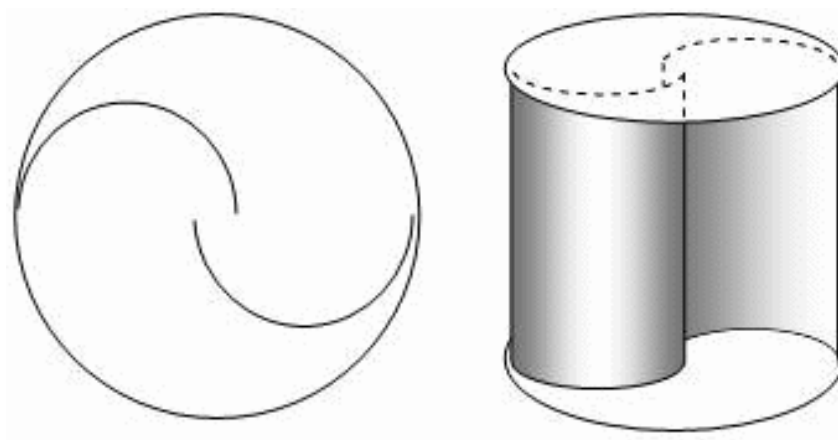


Рис. 1.9. Ротор Савоніуса

І останній, ротор Масгрува або ротор карусельного типу (рис. 1.10). Як і в минулих роторах, обертовий момент створюється підйомною силою. Але йому також потрібне початкове обертання.

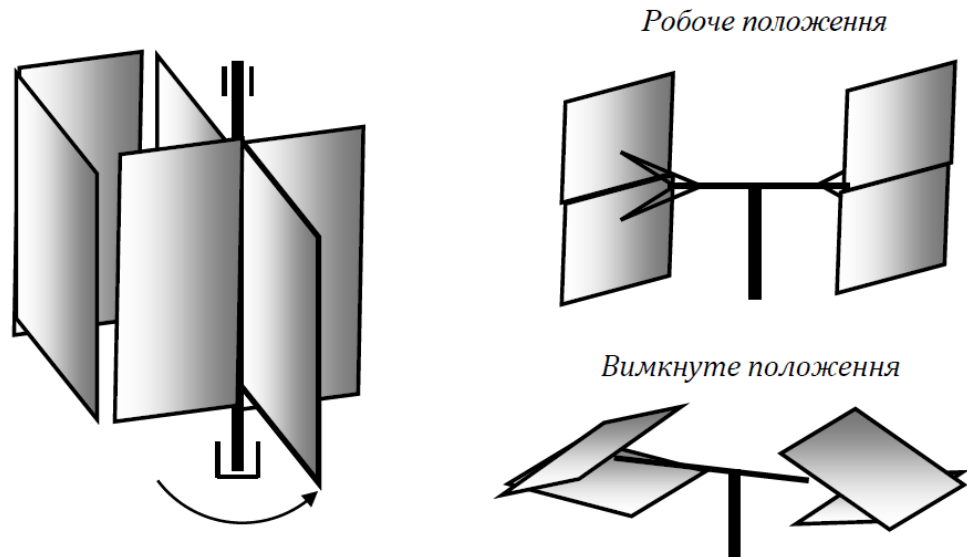


Рис. 1.10. Ротор Масгрува

Також існують модифікації цих чотирьох роторів, але широкого використання такий тип роторів не набув. У світі існує декілька виробників роторів з вертикальною віссю обертання, серед яких компанія Flowind.

1.3.2. З горизонтальною віссю обертання

Найбільшого поширення набули саме ротори з горизонтальною віссю обертання, які використовують підйомну силу лопаті. Вони досить легко розкручуються при швидкості вітру від 3 до 5 м/с та не потребують додаткового генератора для запуску, як ротори з вертикальною віссю обертання, такі вітротурбіни можуть мати різне число лопатей, від одної з контрвантажем, до багато лопатевих. Розповсюджена схема для вітроенергетичного агрегату складається з :

- 1) Лопатей – частини вітрогенератора які розташовані на роторі.
- 2) Гондола – корпус для вітрогенератора.
- 3) Башта – опора.
- 4) Головна рама – частина землі на якій кріпиться ВЕУ.

Найбільше важливе устаткування знаходиться у верхній частині і виконує своє призначення (рис. 1.11) Перелік важливих елементів конструкції:

Лопаті – потік повітря приводить їх у рух, зазвичай турбіни мають дві або три лопаті;

Анемометр – пристрій для виміру швидкості вітру;

Гальмо – пристрій для гальмування ротора, наприклад при штормі(швидкість вітру більше 25 м/с);

Контролер – мозок турбіни, він слідкує за швидкістю вітру, запускає при стартовій швидкості(більше 5м/с) і гальмує при великій;

Мультиплікатор(редуктор) – механічно з'єднує низькошвидкісний вал турбіни з високошвидкісним, тим самим збільшуючи швидкість обертання генератора;

Генератор – перетворює механічну енергію в електричну;

Флюгер – визначає напрямок вітру.

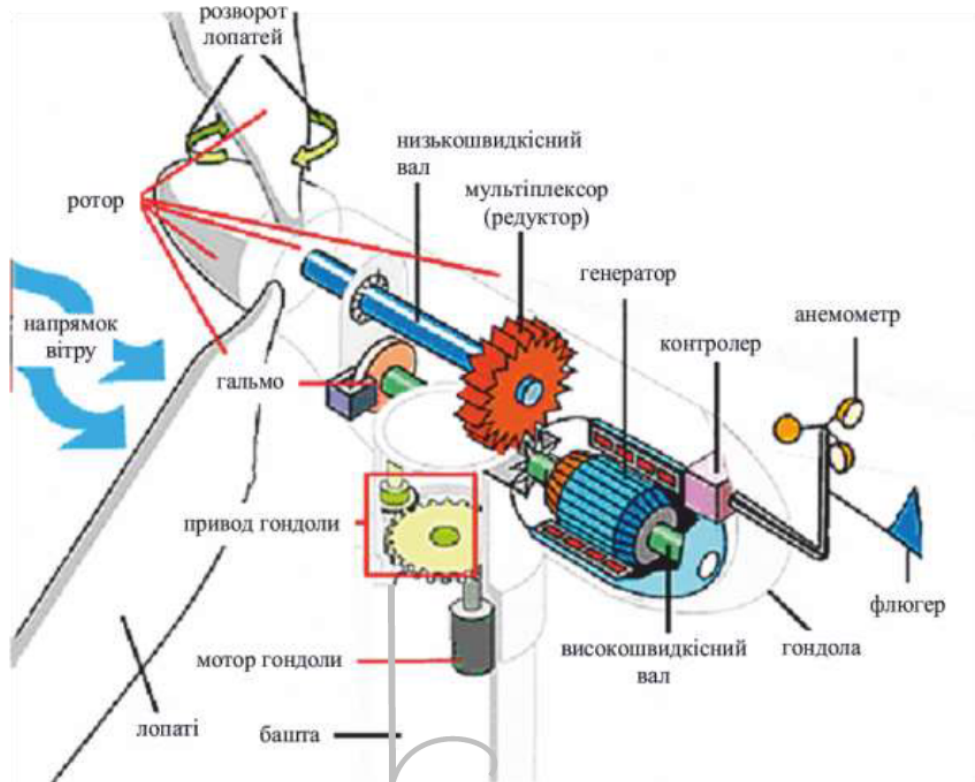


Рис. 1.11. Основні елементи ВЕУ

1.3.3. Установки малої, середньої та великої потужності

До установок малої потужності відносять ВЕУ з потужністю до 100 кВт. Зазвичай такі установки використовують саме кінцеві споживачі (не на продаж) для зарядки акумуляторів, насосів чи побутових потреб. Схема малої ВЕУ відрізняється від загально прийнятої і показана на малюнку (рис. 1.12)

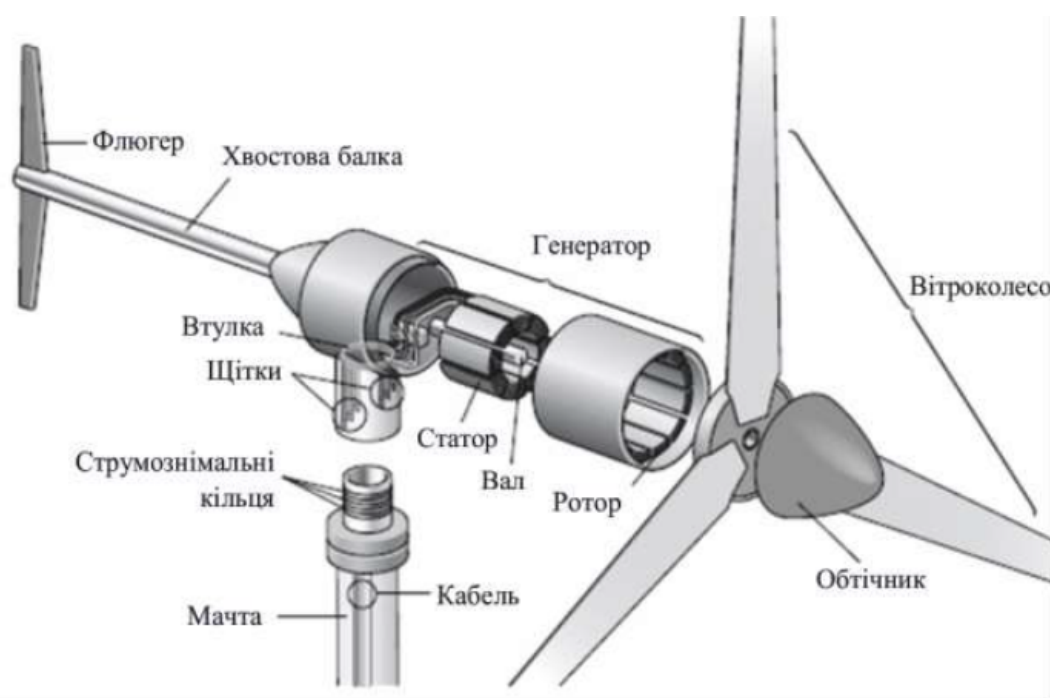


Рис. 1.12. Схема ВЕУ малої потужності

Для визначення вітру на майже на всіх установках використовують хвостові флюгери, а передача енергії здійснюється кабелем який прокладений всередині мачти. Це дозволяє гондолі обертатись навколо осі і постійно бути за напрямком вітру.

Установки середньої потужності – це від 100 кВт до 1 МВт, а великої – відповідно більше 1 МВт. Лідером на ринку ВЕУ є компанія Vestas. Їх вітрогенератори входять в мегаватний клас, тобто ВЕУ мають номінальну потужність більше 1 МВт. Наприклад V162-6.2 MW™ ІЕС S, має номінальну потужність 6.2 МВт; початкова швидкість вітру для роботи 3 м/с;

[6] кінцева швидкість вітру 25 м/с. І найбільш вражаючий параметр це діаметр ротора який складає 162 м.

Китай у 2023 році установить прототип турбіни назвою MySE 16.0-242 від компанії MingYang Smart Energy який буде мати висоту 264 м і діаметр ротора 242 м, з трьома лопатями по 118 м. Це дозволить генерувати 16 МВт потужності що буде рекордом серед усіх установок у світі.[7]

Іншим гігантом у сфері ВЕУ у світі є компанія Siemens Gamesa, вони пропонують ще і офшорні установки, наприклад найпотужнішою з їх продукції є SG 14-236 DD – номінальною потужністю 14 МВт та діаметром ротора в цілих 236 м. Вони планують випустити їх у серійне виробництво у 2024 році. [8]

1.4. Теоретична взаємодія вітрового потоку та лопатей установки

Головна задача ВЕУ перетворити кінетичну енергію вітру в електричну енергію, але спочатку потрібно перетворити її в механічну енергію. Це відбувається на основі трьох законів аеродинаміки.

Перший закон – це закон обертання руху, тобто результат не змінюється коли тіло рухається в нерухомому повітрі, чи коли на нерухоме тіло набігає рівномірний потік повітря.

Другий закон – показує постійність маси, і це дозволяє визначити швидкість повітря в різних місцях замкнутого простору. Обчислюється другий закон рівнянням нерозривності.

$$m = \rho A \nu$$

де ρ — щільність, A — площа, ν — швидкість.

Третій закон – це закон збереження енергії, у вигляді рівняння Бернуллі.

$$P_0 = P + \frac{\rho v^2}{2}$$

де P_0 — повний тиск, P — статичний тиск.

Розглянемо як діє сила (рис. 1.13) на пластину (не лопать). Сила F розкладається на дві складові F_x та F_y , відповідно F_y хоче підняти пластину, тому її назва підйомна сила, а F_x – це сила опору.

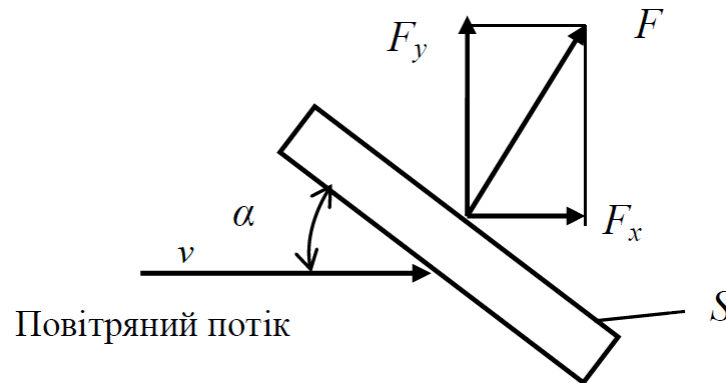


Рис. 1.13. Схема дії сил на пластину

Вводяться два коефіцієнти, аеродинамічний коефіцієнт підйомної сили(y) та аеродинамічний коефіцієнт сили опору(x) відповідно:

$$c_y = \frac{F_y}{S \frac{\rho v^2}{2}}$$

$$c_x = \frac{F_x}{S \frac{\rho v^2}{2}}$$

Їх отримують експериментально в аеродинамічних трубах, і будують залежності від кута альфа. Знаючи коефіцієнти можна порахувати підйомну силу та силу опору для поверхні, яка подібна до пластини (наприклад лопать турбіни), з різною площею. У вітроенергетиці використовують

профілі з асиметричною кривизною, приклад такого профілю це NASA 4415 (рис. 1.14), де перша цифра у назві це F_{max} , друга X_f , а останні дві відповідають C_{max} . [9]

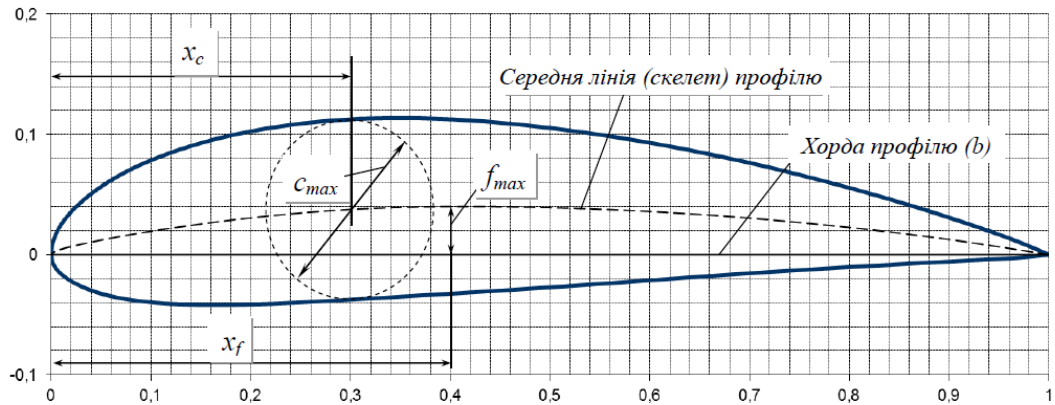


Рис. 1.14. Параметри профілю NASA 4415

Основні параметри:

c_{max} — максимальна товщина профілю;

X_c — положення максимальної товщини вздовж профілю;

X_f — положення максимальної угнутості;

f_{max} — максимальна угнутість.

Сам принцип аеродинамічного профілю використовує закон Бернуллі.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{\text{верх}}^2 + p_{\text{верх}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{\text{ниж}}^2 + p_{\text{ниж}}$$

Повітряний потік розділяє профіль на дві площини: верхню (область більшого тиску) та нижню (область нижчого тиску) відповідно (рис. 1.15). Це призводить до утворення повної сили F , яка буде спрямована в бік низького тиску. Як і з пластину, ця сила розкладається на підйомну F_x та силу опору F_y .

$$F_y = c_y \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\text{верх}}^2$$

$$F_x = c_x \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\text{верх}}^2$$

де ρ — питома щільність повітря ($\text{кг}/\text{м}^3$), A — площа профілю (м^2), $v_{\text{верх}}$ — швидкість повітря ($\text{м}/\text{с}$), c_x та c_y — коефіцієнти підйомної сили та сили опору.

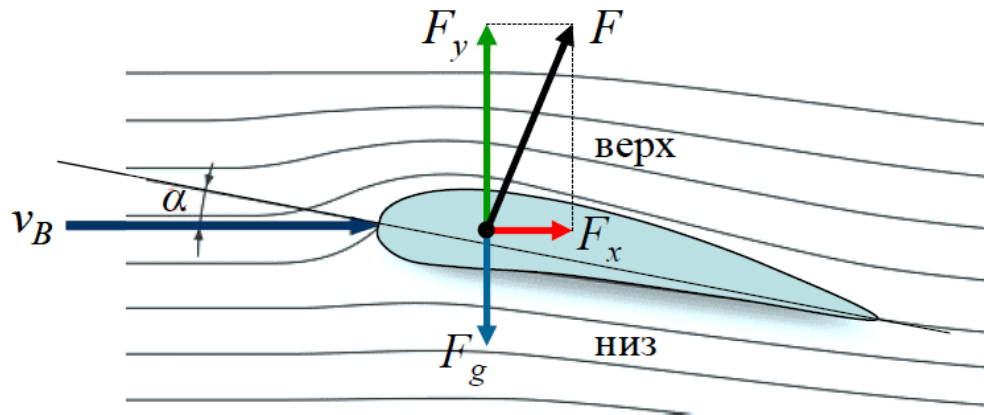


Рис. 1.15. Схема профілю у потоці повітря

Але при обертанні лопатей розподіл швидкості вже інший і приймає такий вид (рис. 1.16). Також за теорією ідеального вітряка, швидкість при

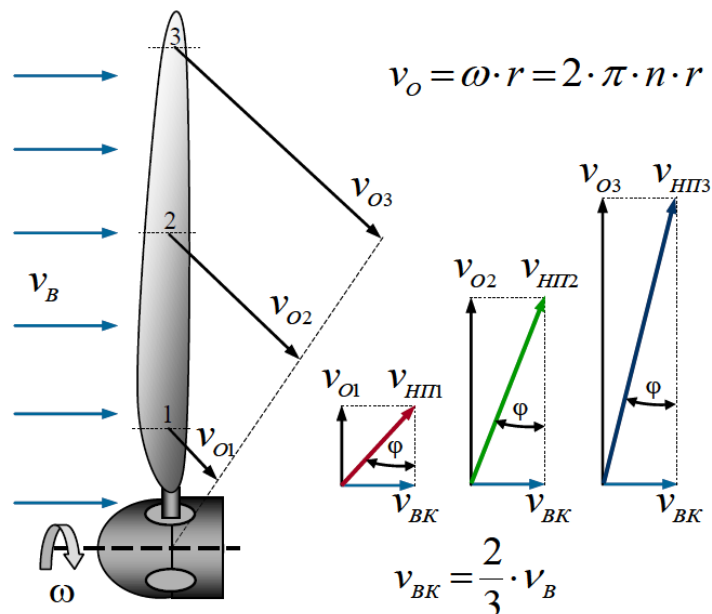


Рис. 1.16. Схема впливу потоку на лопать ВЕУ

Наближенні до вітрового колеса сповільнюється і становить $2/3$ від всієї швидкості. Інша складова залежить від форми лопаті (переріз в точка 1, 2, 3), і при сумуванні маємо результуючу швидкість вітрового потоку яка діє на лопать ВЕУ, $V_{\text{шт}}$.

Так як в точка 1, 2, 3 змінюється не тільки форма, але і кут, тому щоб підтримувати кути потоків які набігають (α) потрібно змінювати кут нахилу лопаті до площини вітрового колеса. Визначити цей кут можна за формулою:

$$\beta = \varphi - \alpha = \arctan \frac{2}{3} \cdot \frac{R}{r \cdot Z} - \alpha$$

Звідки видно що кут скрутки маж бути більший у центрі і менший на кінцях лопатей, наприклад як на (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Геометрія лопатей зі скруткою

Важливим пунктом [5] є визначення ширини лопаті, яка залежить від кількості лопатей (N), швидкодії вітряка (Z), кута набігання потоку

(α), двох радіусів: зовнішнього R , та внутрішнього r та коефіцієнта c_y , де оптимальна швидкість та ширина лопаті обчислюється за формулами:

$$Z = \frac{2\pi R}{dN}$$

$$b = \frac{8}{9} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{c_y \cdot N \cdot Z^2} \cdot \frac{R \cdot (\cos(\varphi))^2}{r}$$

1.5. Висновки до розділу 1

Аналіз літературних джерел у першому розділі показав, що використання вітру у якості відновлювального джерела енергії є досить перспективним напрямком. Навіть якщо взяти Київську область з середньорічною швидкістю вітру у 3.5 м/с. В залежності від класу турбіни, а також від аеродинамічних профілів які використовуються у розробці вітроколеса, коефіцієнт корисної дії, а саме перетворення енергії вітру у електричну енергію може змінюватись. Тому задача стоїть наступним чином, створити вітротурбіну, а також провести моделювання її при швидкостях 3.5 м/с, 5 м/с та 7 м/с, а це середньорічні швидкості які мають місце у регіонах України. Та порівняти результати з турбіною мегаватного класу GE 1.5xle, для якої розрахунки проводились в аеродинамічній трубі та при контрольованих атмосферних умовах.

РОЗДІЛ 2.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Геометрія задачі. Будова розрахункової сітки

Поточна модель описує поведінку потоку повітря при взаємодії з лопотями установки. Під час моделювання використовується програмний пакет, який знаходиться у відкритому доступі, а саме ANSYS Student 2022R1 з модулем *Fluent*.

Геометрія вітротурбіни будувалась в спеціальному модулі ANSYS Design Modeler, це програмний модуль який розроблений для побудови і підготовки моделей. Для користувача він є досить простий та інтуїтивний у використанні. Нижче на рис. 2.1 представлена геометрія створеної моделі:

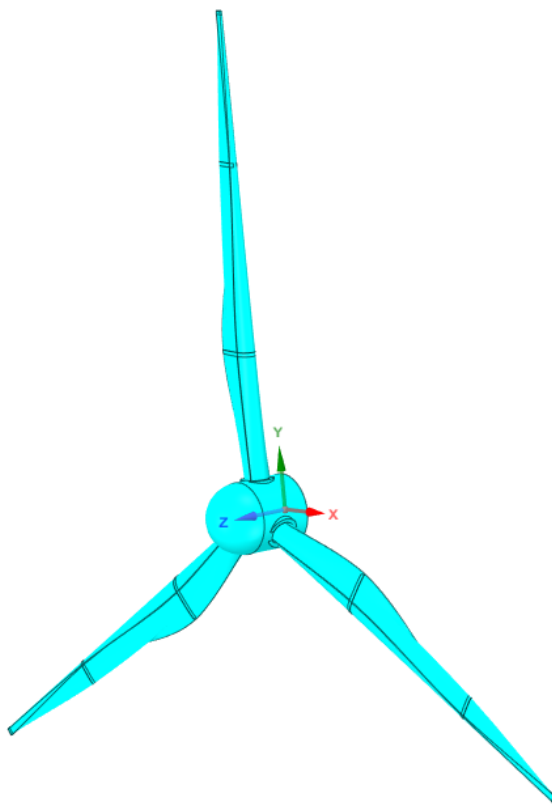


Рис. 2.1. Геометрія вітроколеса

Специфіка побудови геометрії однієї лопаті, а потім вже всього вітроколеса, полягає у аеродинамічних профілях. Вітротурбіна, а відповідно кожна лопоть, включала в собі аеродинамічну характеристику профіля типу «WORTMANN FX 08-S-176 [10] і WORTMANN FX 77-W-121 [11]». Відповідно до рис. 2.1, можемо бачити що перша половина лопоті складається з WORTMANN FX 08-S-176 рис. 2.2, а друга частина з WORTMANN FX 77-W-121 рис. 2.3. Дані профілі були вибрані з метою порівняння їх характеристик з відповідними профілями у вітроколеса аеродинамічної турбіни GE 1.5xle.

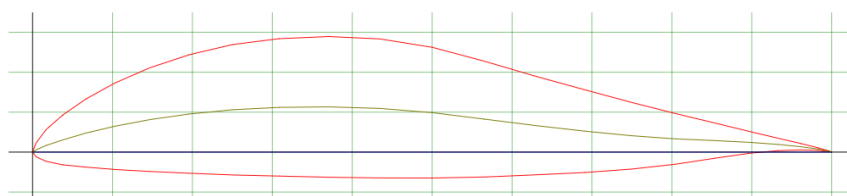


Рис. 2.2. Аеродинамічний профіль WORTMANN FX 08-S-176

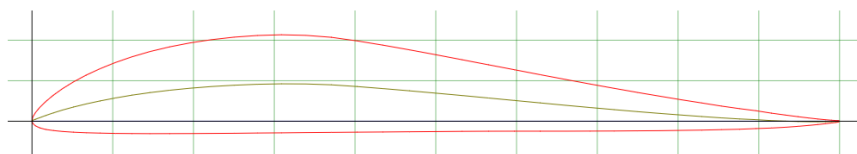


Рис. 2.3. Аеродинамічний профіль WORTMANN FX 77-W-121

Після побудови лопотей, потрібно було вибрати зону моделювання, а саме простір в якому відбуватиметься процес обертання турбіни в залежності від швидкості вітру.

Першим кроком було створено зону навколо самих лопотей, тобто потрібно було помістити їх в певний простір, нестационарну зону, яка буде обертатися (рис. 2.4). При моделюванні ця зона буде рухомою сіткою, яка буде змінювати свою положення з часом відповідно до швидкості вітру та кутової швидкості обертання.

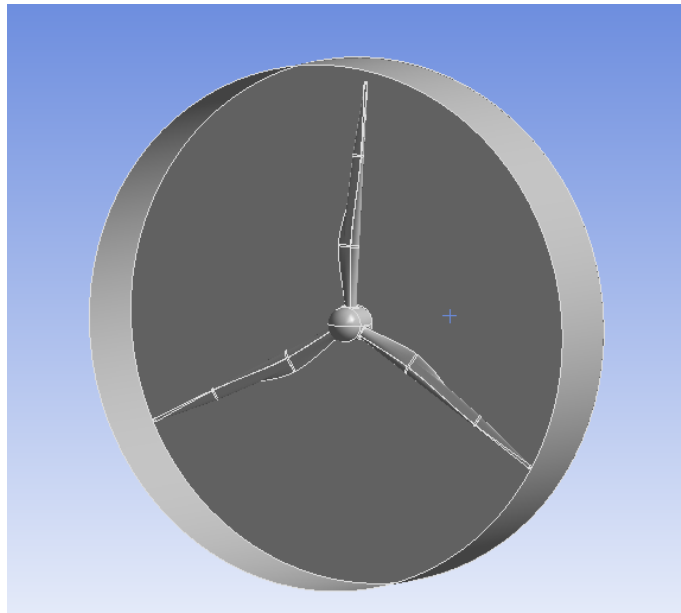


Рис. 2.4. Нестационарна зона

Другим кроком йде створення простору (стаціонарної зони) в якому відбувається взаємодія нестационарної зони з вітром. Тобто створено паралелепіпед з певними розмірами, а саме $1d$ (діаметр вітроколеса) – перед, зверху та знизу нестационарної зоною та $4d$ – після нестационарної зоною. (рис. 2.5)

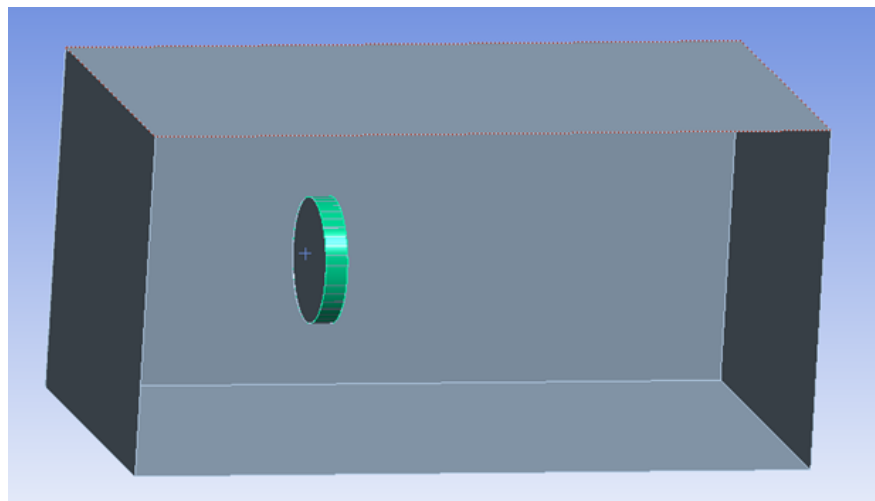


Рис. 2.5. Стаціонарна зона

Після моделювання вітроколеса, йде побудова розрахункової сітки, адже цього потребує сам процес моделювання. Для цього був використаний

програмний модуль *ANSYS Meshing*, цей модуль містить в собі велику кількість інструментів та технологій які дозволяють покращити сітку для кожного елемента чи вузла відповідної геометрії.

Після багатьох спроб зробити сітку, через складну геометрію моделі, яка полягає у з'єднанні вузлів на стінках вітроколеса, кінцевий варіант сітки містить 1424772 елементів і 256627 вузлів (табл. 2.1). До сітки входять основні елементи які займають простір безпосередньо на самій турбіні і її лопотях (нестаціонарна зона), а також додаткові частини які знаходяться перед, за, зверху та знизу самої турбіні і є по розмірах більші ніж основні (стаціонарна зона). Нижче на рис. 2.5 представлена вся сітка разом з основними та додатковими елементами:

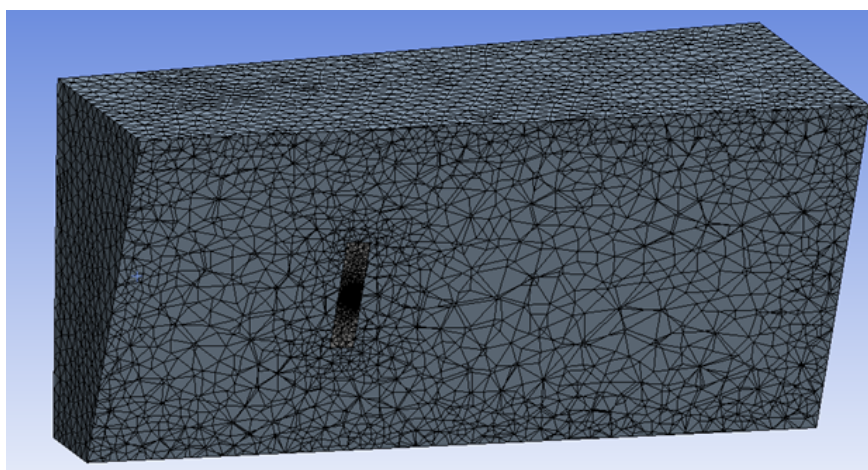


Рис. 2.6. Сітка стаціонарної та нестаціонарної зон

Таблиця 2.1

Параметри сітки

Кількість вузлів	256627
Кількість елементів (комірок)	1424772
Orthogonal Quality (ортогональна якість)	0,76233
Skewness (асиметрія)	0,23647

Важливо зазначити що основним критерієм форми елементів є Orthogonal Quality і Skewness. Так як використання грубої сітки (занадто великі

Таблиця 2.2

Діапазон якості Orthogonal Quality

Дуже погано	Погано	Прийнятно	Добре	Дуже добре	Відмінно
0 - 0.001	0.001 - 0.15	0.15 - 0.20	0.20 - 0.70	0.70 - 0.95	0.95 - 1.0

Таблиця 2.3

Діапазон якості Skewness

Відмінно	Дуже добре	Добре	Прийнятно	Погано	Дуже погано
0 - 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 0.80	0.80 - 0.95	0.95 - 0.98	0.98 - 1.0

елементи) може призвести до неправильних результатів. Нижче показані діапазони якості сітки Orthogonal Quality (табл. 2.2) та Skewness (табл. 2.3).

Звідки можна зробити висновок що сітка у даній задачі для Orthogonal Quality (рис. 2.7) знаходиться у діапазоні 0,76233 (дуже добре), а для Skewness (рис. 2.8) у діапазоні – 0,23647 (відмінно)

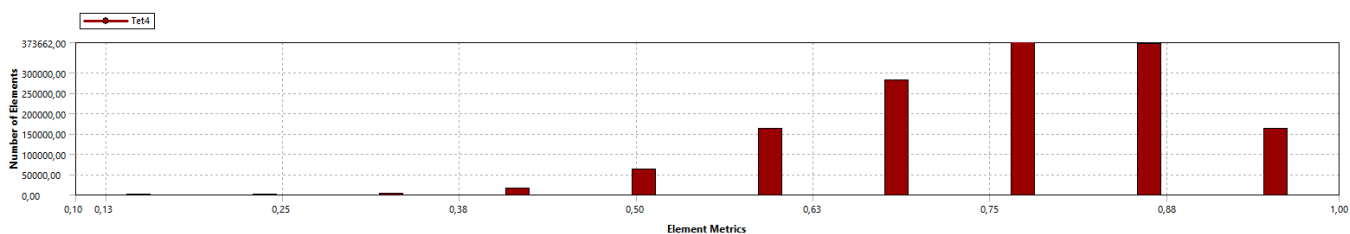


Рис. 2.7. Елементи відповідно до Orthogonal Quality

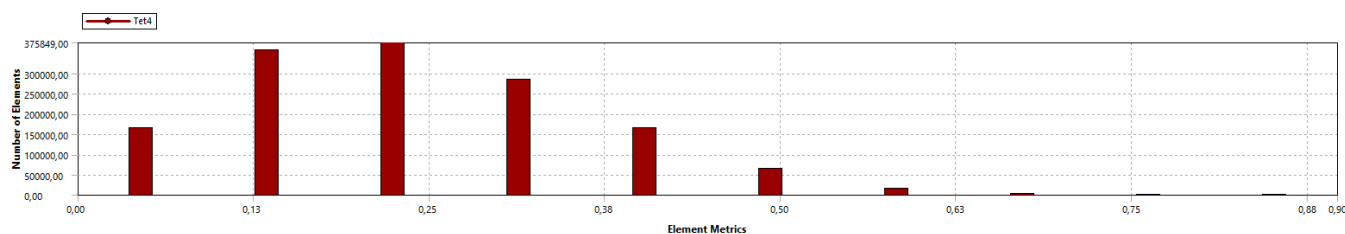


Рис. 2.8. Елементи відповідно до Skewness

2.2. Постановка умов задачі

Для моделювання самого вітрогенератора використовувались такі параметри:

Таблиця 2.4

Вхідні параметри

Параметр	Значення
Швидкість вітру	3.5, 5, 7 м/с
Кутова швидкість обертання	1.15, 1.42, 1.58 рад/с
Довжина лопоті	35 м
Вихідний параметр	Тиск 1 атмосфера
Густина повітря	1.225 кг/м ³
В'язкість	1.7894e-05 кг/м×с
Кут набігу повітря	0°

Моделювання поділилось на 3 різних блоки відповідно до швидкості вітру, а саме:

- 1) 3.5 м/с у першому випадку при кутовій швидкості 1.15 рад/с (10.98 об/хв);
- 2) 5 м/с у другому випадку при кутовій швидкості 1.42 рад/с (13.56 об/хв);
- 3) 7 м/с у третьому випадку при кутовій швидкості 1.58 рад/с (15.08 об/хв).

Згідно потреб були обрані такі параметри моделі як:

- 1) Тип розрахункової моделі, а саме PBNS (Pressure-based Numerical Solver) зі схемою корекції полів тиску і швидкості Coupled (PBCS) (наведена на рис. 2.9);

- 2) Система рівнянь Ейлера для стисливого газу розв'язується чисельно (збереження імпульсу, збереження енергії та нерозривності). [12]

Для розрахунку використовується $k-\omega$ SST (Shear-Stress Transport) модель турбулентності. Ця модель поєднує в собі точність стандартної $k-\omega$ моделі в пристінкових областях та $k-\epsilon$ на відстані від самих стінок. Тому $k-\omega$ SST модель є більш точною для випадку вітроенергетичної установки, а саме для обтікання лопатей(профільів).[13]

Для розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) використовують Algebraic Multigrid (AMG), також квазістаціонарний метод корекції полів тиску і швидкості, а саме схеми Coupled та Pseudo Transient та схеми дискретизації другого порядку Second Order Upwind.

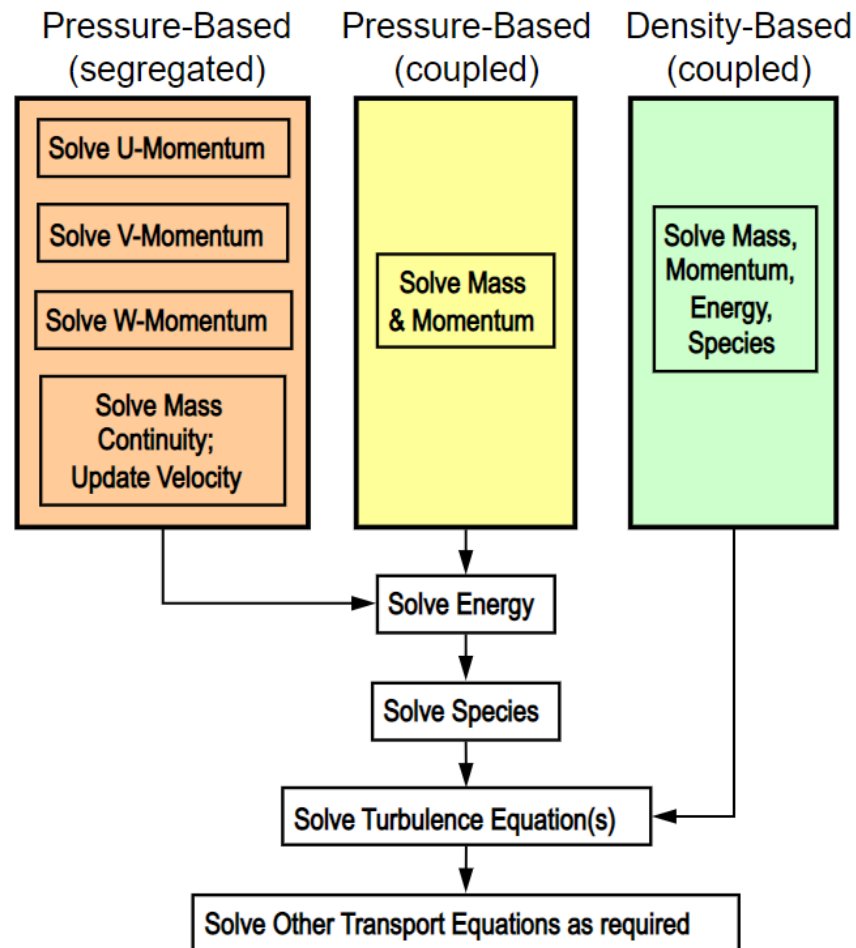


Рис. 2.9. Блок-схема алгоритму PBNS (англ. Pressure-based Numerical Solver); застосована Coupled

2.3. Висновки до розділу 2

За допомогою DesignModeler була побудована геометрія вітроколеса, на основі двох аеродинамічних профілів. Також створено стаціонарний простір в якому відбувається взаємодія турбіни з повітрям.

Після формування сітки в ANSYS *Meshing*, в іншому модулі *Setup*, було обрано модель турбулентності та тип розрахункової моделі, а також визначено нестационарну зону яка обертається з кутовою швидкістю залежно від швидкості вітру.

Після чого у процесорі *Fluent* було здійснене моделювання взаємодії турбіни з повітрям.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОТУРБИНИ

3.1. Результати моделювання

Моделювання, у всіх трьох випадках, проводилось 60 секунд, а загальна кількість ітерацій 600.

Нижче на рис. 3.1, 3.2, 3.3 показана серія комп'ютерних візуалізацій для моделі вітроенергетичної установки, з якої видно що швидкість лопатки цієї моделі вітротурбіни збільшується з радіусом і видно що кінець лопаті має максимальну швидкість.

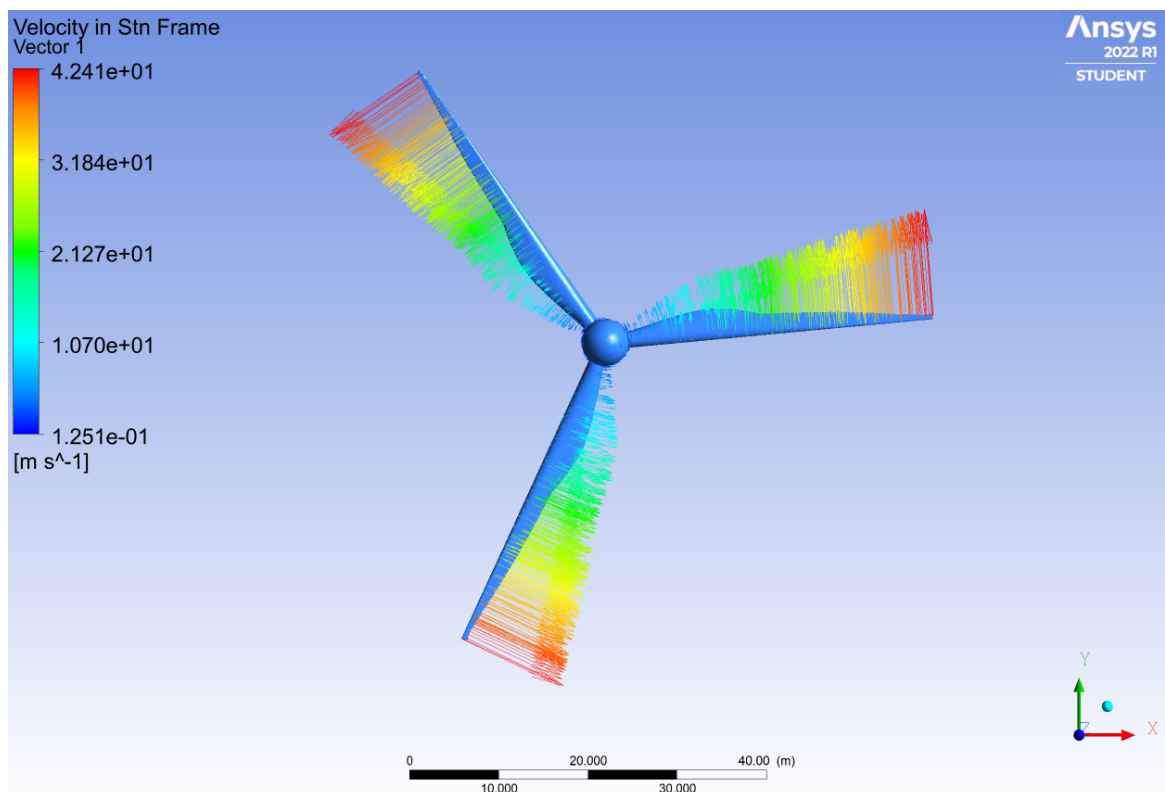


Рис. 3.1. Швидкості контурів лопатей, у напрямку z при вітрі 3.5 м/с та $\lambda = 13,14$

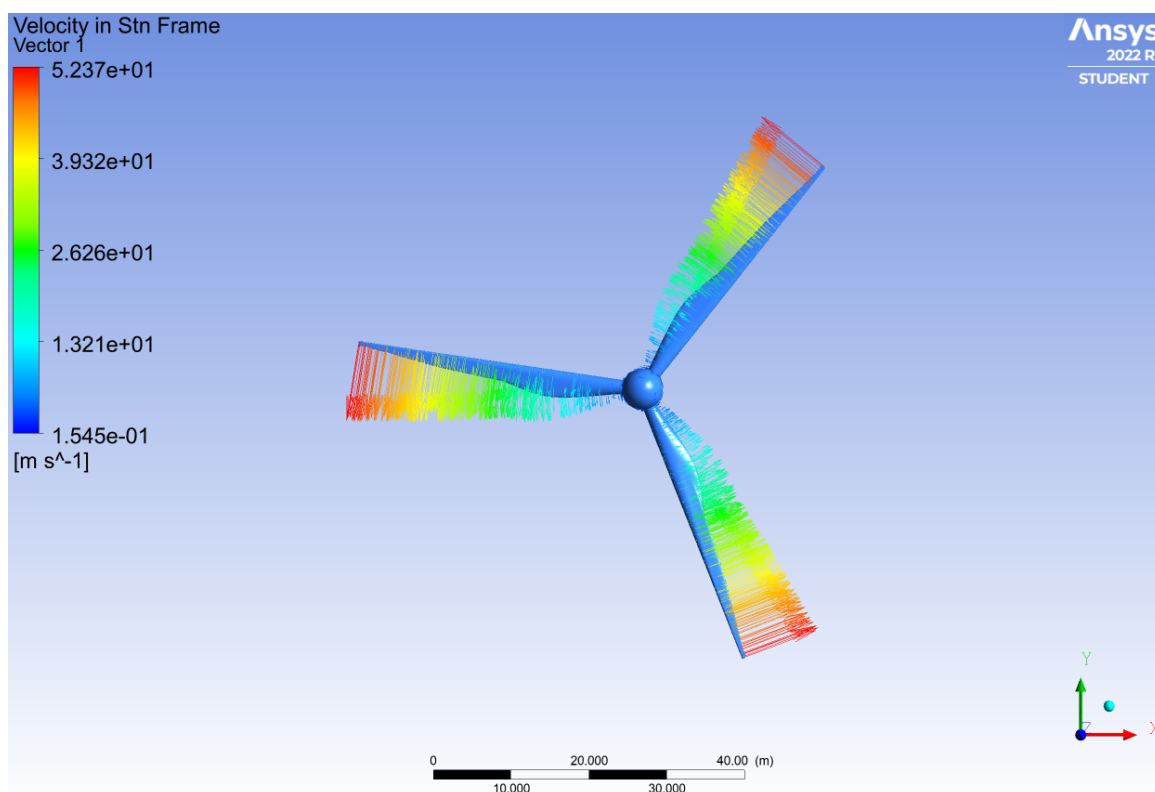


Рис. 3.2. Швидкості контурів лопатей, у напрямку z при вітрі 5 м/с та $\lambda = 11,36$

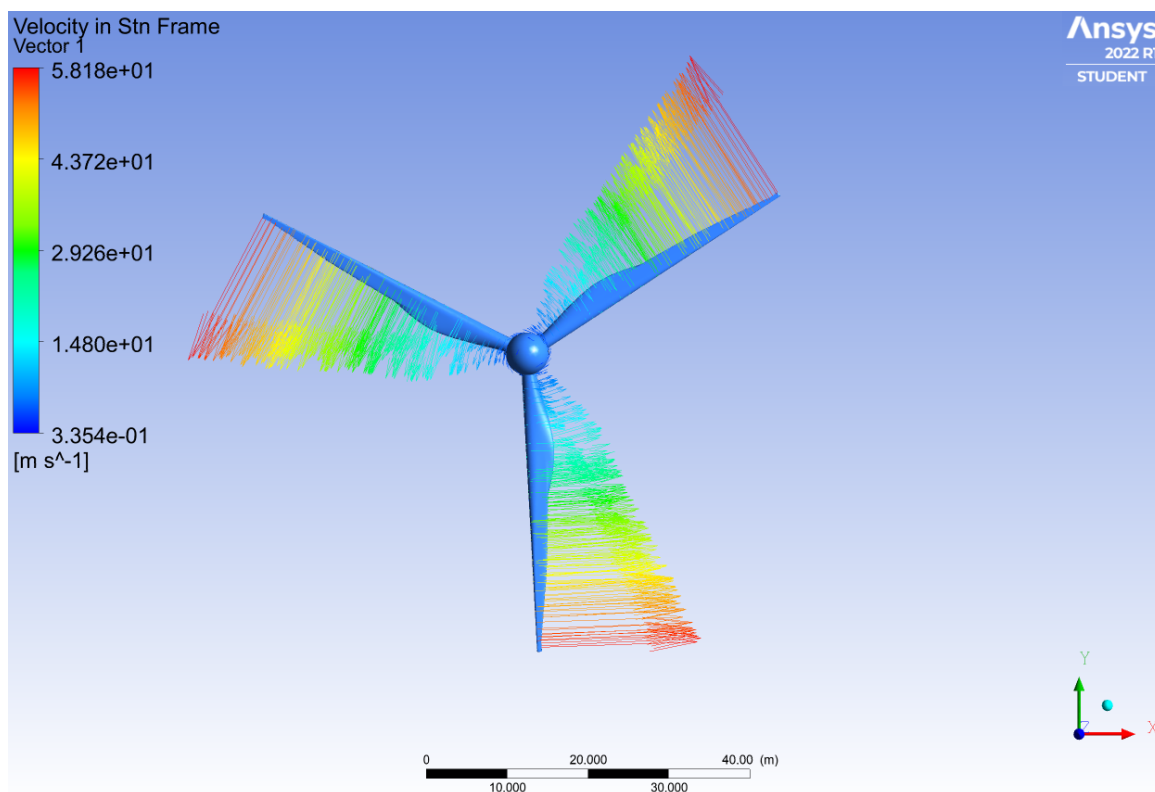


Рис. 3.3. Швидкості контурів лопатей, у напрямку z при вітрі 7 м/с та $\lambda = 9,03$

λ або коефіцієнт швидкохідності це відношення швидкості кінця лопаті до вітру. Це є досить важливим параметром для конструкції самої турбіни, нижче представлено рівняння за яким вираховується цей коефіцієнт:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0}$$

де ω — частота обертів вітроколеса, R — радіус ротора (м), V_0 — швидкість потоку вітру (м/с).

Якщо моделювати ідеальну турбіну то коефіцієнт швидкохідності має бути в районі 7. Для нашого випадку розраховано відповідні коефіцієнти для різних швидкостей вітру (табл. 3.1):

Таблиця 3.1

Розрахований коефіцієнт швидкохідності

Швидкість вітру, м/с	Кутова швидкість, ω (рад/с)	λ
3,5	1,15	13,14
5	1,42	11,36
7	1,58	9,03

Далі показано контур тиску на лопоть (рис. 3.4), з якого видно як тисне повітря, що призводить до різниці тиску між передньою і задньою частинами лопаті і відповідно створює підйомну силу яка і розкручує турбіну.

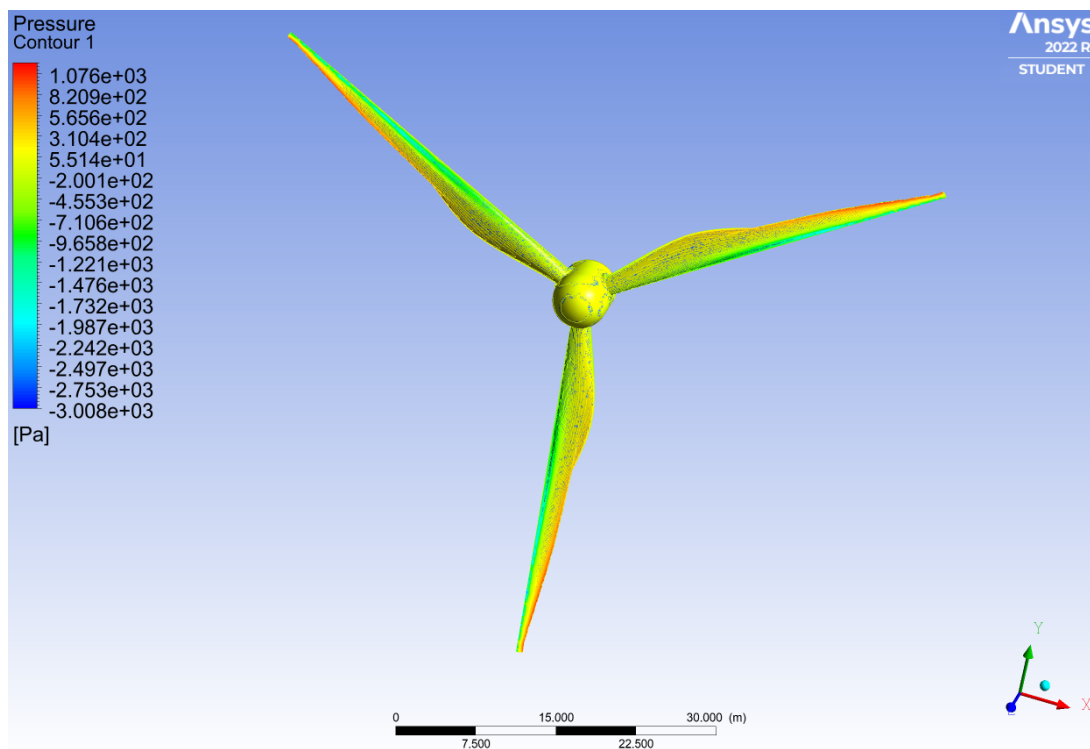


Рис. 3.4. Розподіл тиску на лопотях

Також показана візуалізація контурів розподілу швидкостей на рис. 3.5, 3.6, відповідно до швидкості вітру.

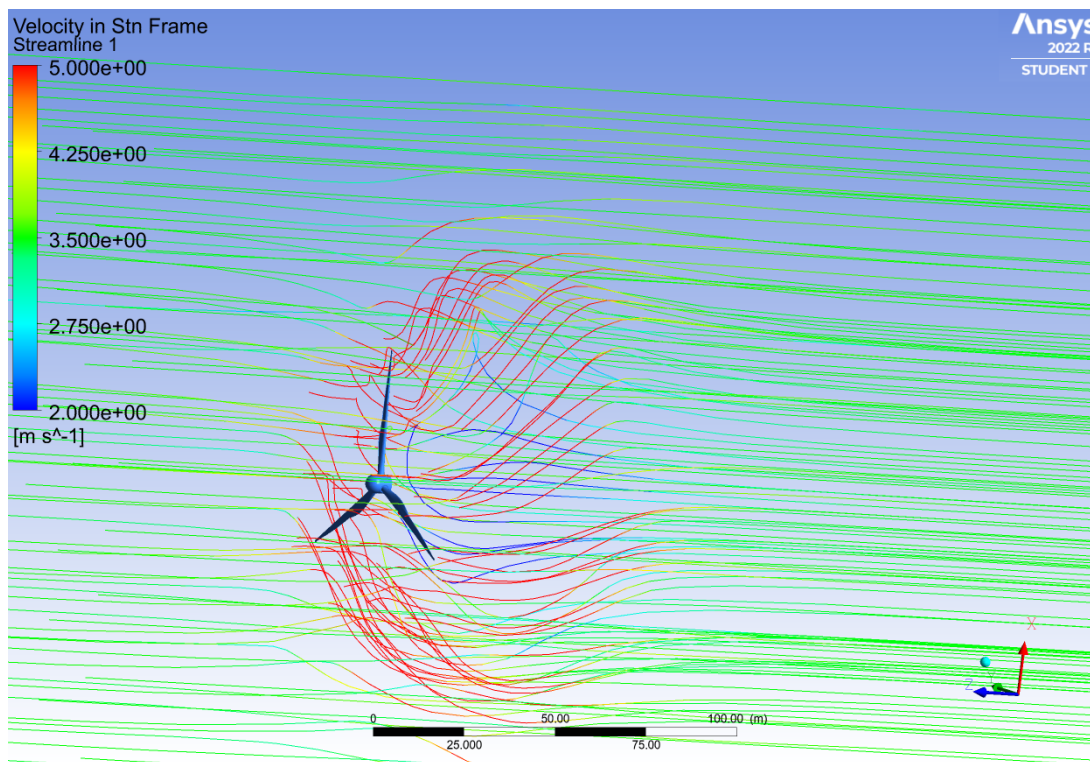


Рис. 3.5. Розподіл швидкостей при потоці вітру в 3.5 м/с

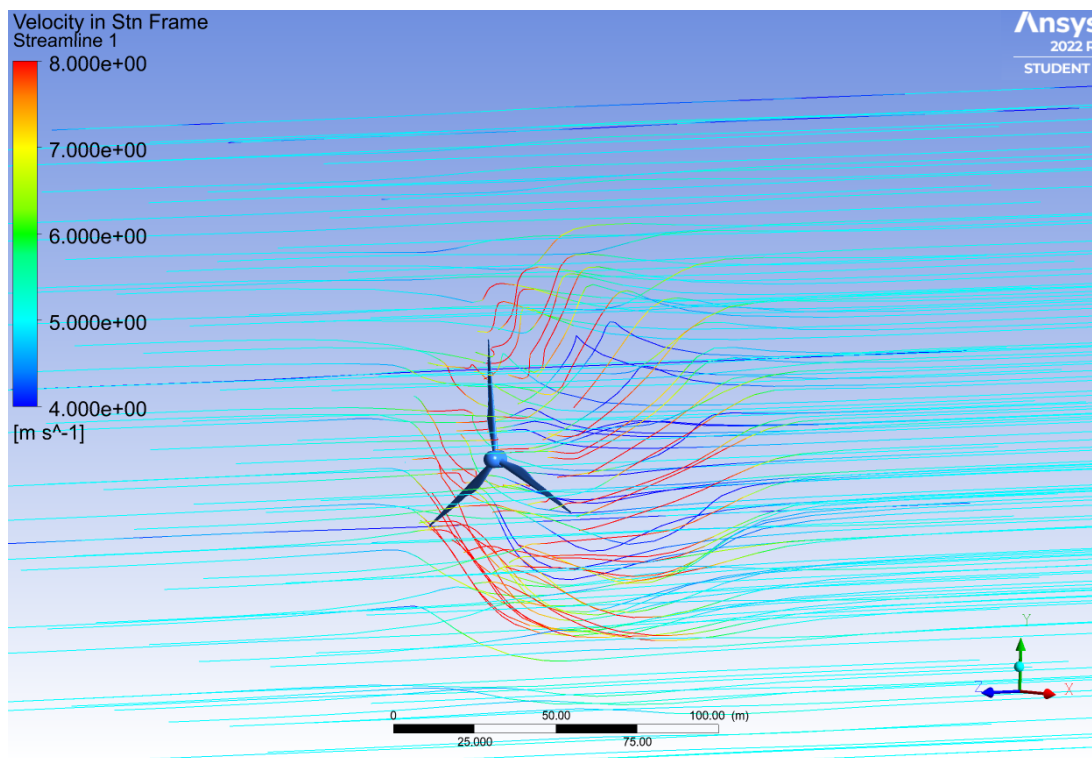


Рис. 3.6. Розподіл швидкостей при потоці вітру в 5 м/с

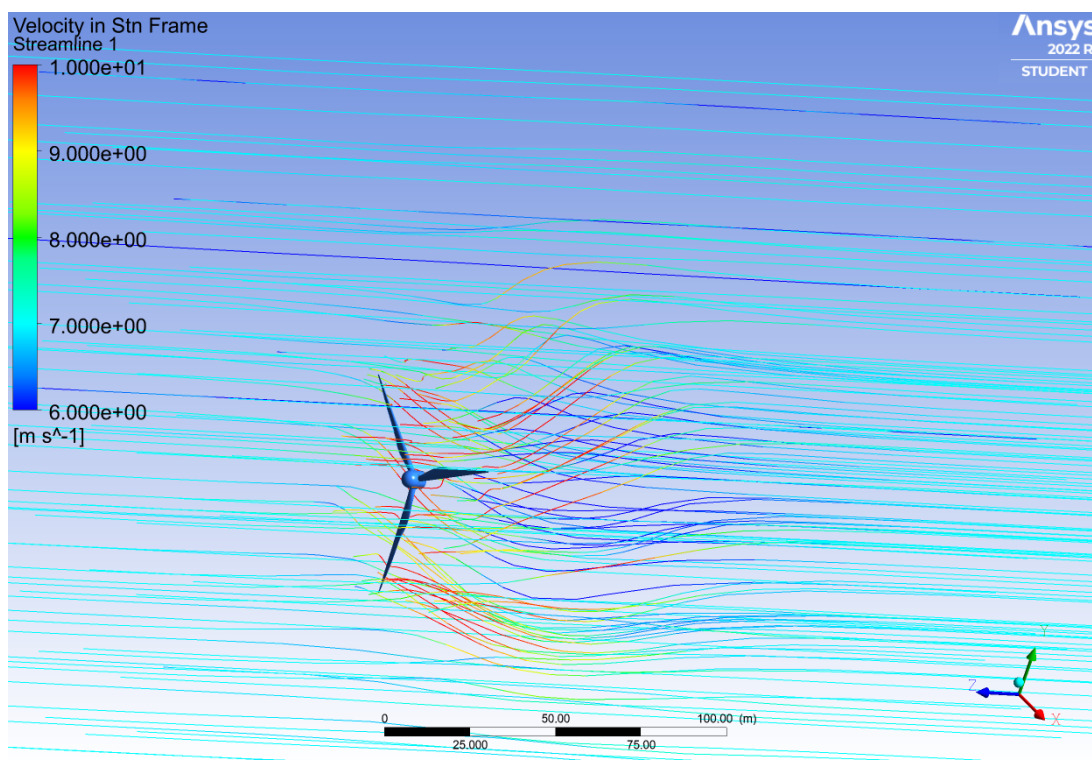


Рис. 3.7. Розподіл швидкостей при потоці вітру в 7 м/с

Іншою важливою характеристикою, за якою відбуватиметься подальше порівняння, є коефіцієнт потужності. Для аеродинамічної вітрової

турбіни GE 1.5 xle [14] можемо вирахувати її коефіцієнт потужності по формулі:

$$C_p = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{вітр}}}$$

де $P_{\text{ном}}$ — номінальна потужність, $P_{\text{вітр}}$ — потужність вітру.

Номінальна потужність це є потужність турбіни при певній швидкості вітру і для GE 1.5 xle складає (табл. 3.2):

Таблиця 3.2

Потужність GE 1.5 xle

Швидкість вітру, м/с	Потужність GE 1.5 xle, кВт
3,5	50
5	243
7	652

А вітрова потужність розраховується за формулою:

$$P_{\text{вітр}} = 0.5\rho Av_0^3$$

де ρ — густина повітря, A — площа яку перекриває турбіна лопотями, v_0 — швидкість вітру .

Відповідно можна обрахувати коефіцієнт потужності C_p для цієї турбіни:

$$C_p = \frac{652000}{0.5 \cdot 1.225 \cdot \frac{3.14 \cdot 82.5^2}{4} \cdot 7^3} = 0.58$$

І отримаємо (табл. 3.3):

Таблиця 3.3

Коефіцієнт потужність GE 1.5 хле

Швидкість вітру, м/с	Коефіцієнт потужності GE 1.5 хле Ср
3,5	0,356
5	0,594
7	0,58

А дані про модель яку порівнюємо, отримано з моделювання, відповідно до різних швидкостей вітру. Які показані у таблицях для потужностей (табл. 3.4) та коефіцієнтів (табл. 3.6).

Таблиця 3.4

Значення потужностей

Швидкість вітру, м/с	Потужність вітру, КВт	Потужність теоретична, КВт
3,5	140,310	82,783
5	421,055	248,423
7	1122,478	662,262

Таблиця 3.5

Значення потужностей

Швидкість вітру, м/с	Потужність GE 1.5 хле, КВт	Потужність (моделювання), КВт
3,5	50	34,852
5	243	56,637
7	652	172,825

Таблиця 3.6

Значення коефіцієнтів

Швидкість вітру, м/с	Коефіцієнт Беца	Коефіцієнт потужності GE 1.5 xle Cp	Коефіцієнт (моделювання) Cp
3,5	0,59	0,356	0,429
5	0,59	0,594	0,395
7	0,59	0,58	0,386

На табл. 3.4, табл. 3.5 та табл. 3.6 приведені дані та значення для потужності вітру, теоретична та реальна потужності турбіни, а також потужності які були отримані під час моделювання. Окремою колонкою було додано теоретичну межу Беца і відповідно коефіцієнти потужності Cp. Закон Беца показує максимальну енергію яку можна отримати від вітрогенератора, тобто по закону можна отримати не більше ніж 59 % від всієї кінетичної енергії вітру.[15]

Потужність вітру було отримано аналітично. А теоретична потужність, відповідно до назви, це максимальна потужність яку може показати вітроколесо в ідеальних умовах. Її отримують при перемноженні межі Беца на потужність вітру. Потужність турбіни GE 1.5 xle, а також її коефіцієнт обраховано та показано у табл. 3.6 і відповідно потужність та коефіцієнти які отримані при моделюванні.

3.2. Висновки до розділу 3

На 3.8 продемонстровано залежність коефіцієнтів потужності від коефіцієнта швидкохідності. Де видно що максимальне значення коефіцієнт потужності Cp при моделюванні набуває при швидкості вітру 3.5 м/с і складає 34.852 КВт механічної потужності. Тоді як турбіна GE 1.5xle

досягає максимального значення при швидкості вітру в 5 м/с, при чому досліди цієї турбіни відбувались в аеродинамічній трубі з контрольованими показниками атмосфери.

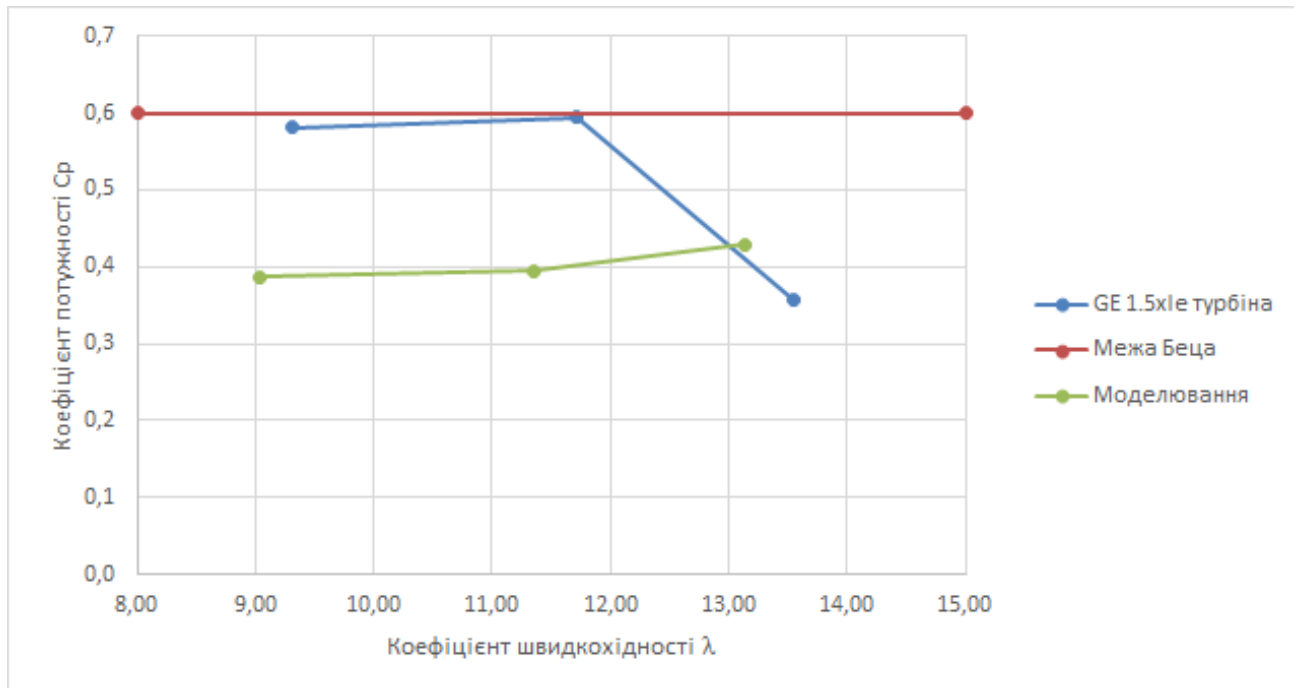


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнта швидкості від коефіцієнта потужності

На 3.9 видно залежність потужності турбін від швидкості вітру, де окрім потужності у турбіни GE 1.5x1e і потужності змодельованої турбіни показана теоретично-максимальна потужність, яка менше від всієї потужності вітру на межу Беца (0.59). Проаналізувавши графік можна сказати що результати моделювання у комп'ютерній програмі співпадають з поведінкою теоретичних даних у межах різності значень. Це означає що моделювання показує достовірні результати і по ньому можна створювати ідеальні моделі для майбутнього використання, замість побудови фізичних моделей, на побудову яких витрачають великі ресурси.

На 3.10 показано залежність коефіцієнту потужності від швидкості вітру. Де максимальне значення знаходиться при швидкості 3.5 м/с і складає 42.9%. Цей графік дає змогу спрогнозувати експлуатаційні параметри вітру для майбутнього проектування вітротурбіни. Тобто можна

сказати що швидкість вітру у 3.5 м/с є номінальною і при такій швидкості вітроколеса має найбільший коефіцієнт корисної дії, тобто вітротурбіна найбільш ефективна.

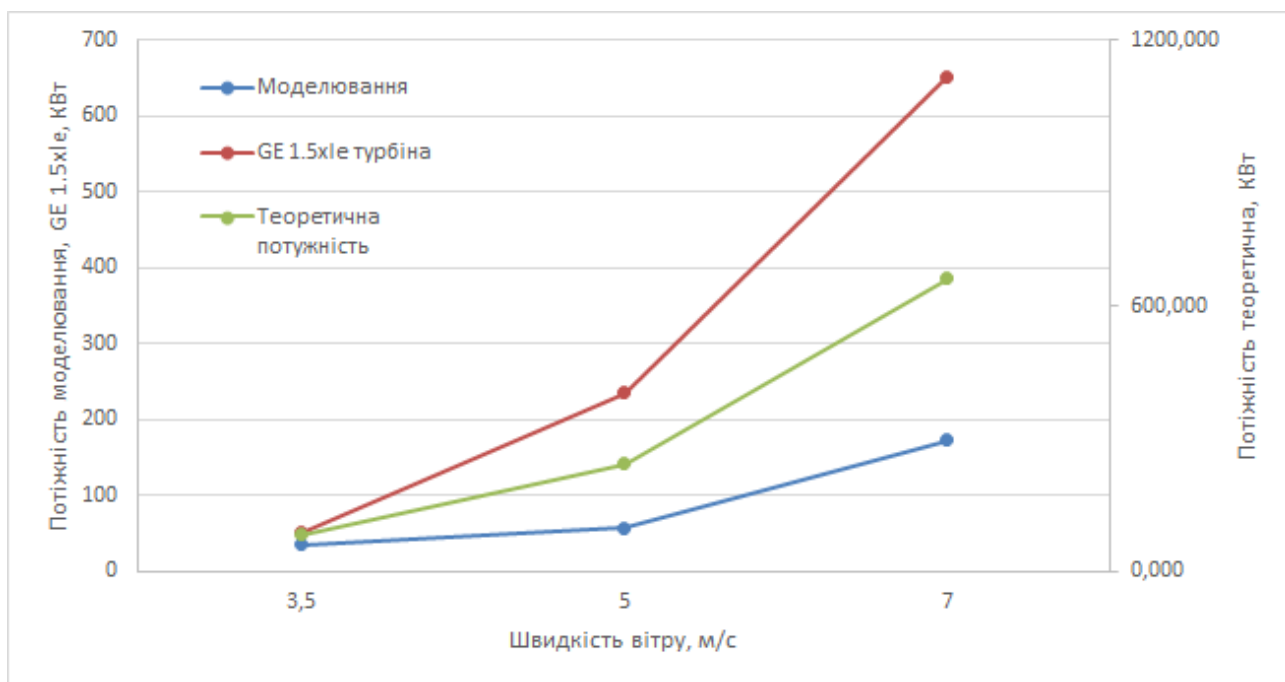


Рис. 3.9. Залежність потужності від швидкості вітру

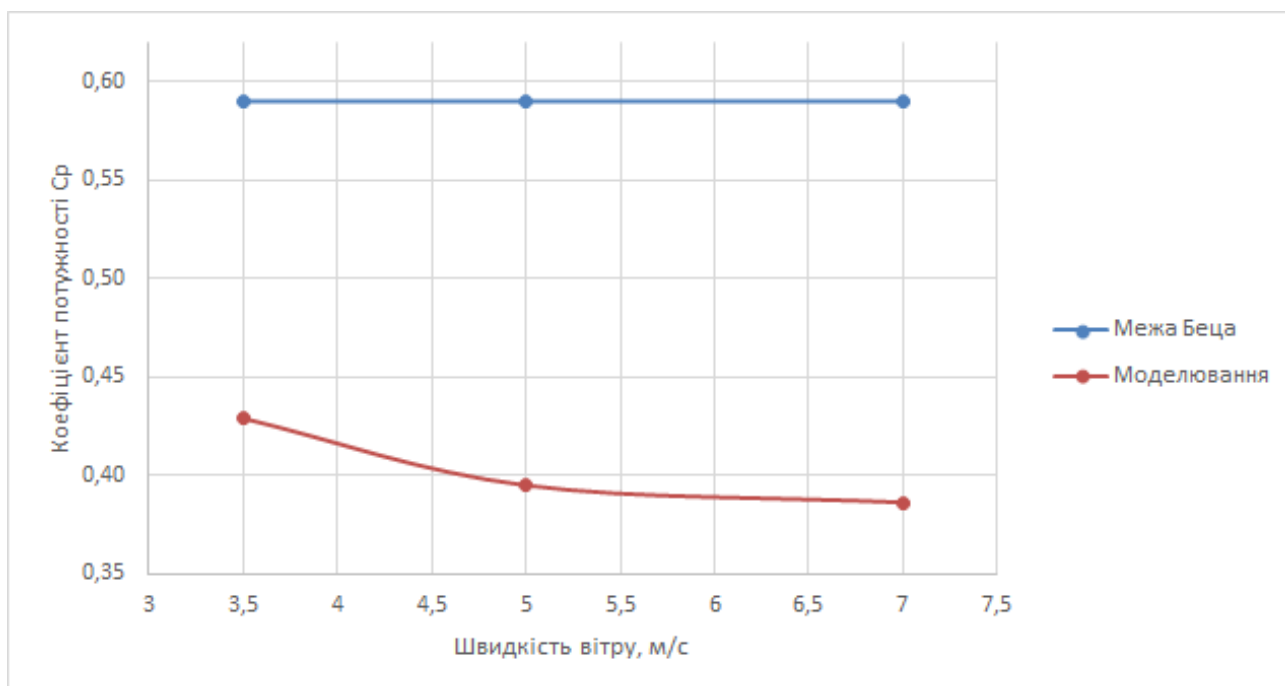


Рис. 3.10. Залежність коефіцієнта потужності від швидкості вітру

ВИСНОВКИ

Було здійснено створення та моделювання вітротурбіни або ж вітроколеса при трьох різних швидкостях вітру 3.5 м/с, 5 м/с та 7 м/с, відповідно до середньорічної швидкості вітру у регіонах України.

Аналіз літератури показав що використання вітрової енергії є дуже перспективним для України, незважаючи на те що номінальна швидкість, тобто 3.5 м/с, є не на всій території. Ця швидкість є мінімальною для роботи вітротурбіни мегаватного класу

Створено модель і побудована геометрія вітроколеса за допомогою використання DesignModeler - 3D модель з трьома лопатями. Після геометрія, йшла побудова сітки для стаціонарної та нестаціонарної зон, які потрібні для моделювання, у модулі ANSYS Meshing. Після чого у розрахунковому процесорі Fluent з використанням моделі турбулентності $k-\omega$ SST (Shear-Stress Transport) та розрахункової моделі PBNS (Pressure-based Numerical Solver) здійснено 3 цикли моделювання.

Отримано візуалізацію контуру швидкостей лопотей, тиск на самі лопаті, розподіл швидкостей при набіганні потоку вітру, а також дані для порівняння результатів. А саме: потужність вітрової турбіни та коефіцієнт потужності.

Після порівняння цих даних з теоретичною потужністю (максимальна теоретична потужність яку може отримати турбіна від вітру в ідеальних умовах) та потужністю вітротурбіни GE 1.5xle отримані наступні висновки:

1) Значення змодельованої турбіни є близькими до значень GE 1.5xle, відповідно до похибки розмірів діаметра ротора.

2) Змодельовані дані, а саме залежність потужності від вітру, має таку ж тенденцію на графіку як і залежність теоретичної потужності від швидкості вітру, і показує що моделювання ідеальної турбіни є вигіднішим кроком ніж створення фізичної моделі.

3) Порівняно з GE 1.5x1e де максимальна ефективність турбіни набуває при значенні вітру в 5 м/с, змодельована турбіна має максимальне значення при 3.5 м/с, що є прекрасним результатом для території України, де на більшій частині якої 3.5 м/с це середньорічна швидкість вітру.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИЙ СЕКТОР УКРАЇНИ 2019 ОГЛЯД РИНКУ. — 2019. — URL: http://uwea.com.ua/uploads/reviews/uwea_2019_ua_preview.pdf.
2. Встановлена потужність енергосистеми України. — 2021. — URL: <https://ua.energy/vstanovljena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/#10-2021>.
3. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. — URL: <https://sae.gov.ua/uk/ae/hydroenergy>.
4. Renewables 2021 Global Status Report / Т. André [та ін.] // REN21, Paris, France. — 2021.
5. Основи вітроенергетики / Г. Півняк [та ін.] // Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. — 2015.
6. Enventus brochure. — 2021. — URL: <https://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/enventus/enventus-enventus-brochure-2021/>.
7. MingYang Smart Energy launches MySE 16.0-242, the world's largest offshore Hybrid Drive wind turbine. — 2021. — URL: <http://www.myse.com.cn/en/jtxw/info.aspx?itemid=825>.
8. SG 14-236 DD. — 2021. — URL: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-236-dd>.
9. NACA 4415 airfoil. — 2022. — URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-ild>.
10. WORTMANN FX 08-S-176 AIRFOIL. — 2022. — URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx08s176-il>.

11. WORTMANN FX 77-W-121 AIRFOIL. — 2022. — URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx77w121-il>.
12. ANSYS Theory Guide: Pressure-Based Solver. — 2009. — URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node361.htm>.
13. Shear-Stress Transport (SST) k - ω Model. — 2009. — URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm>.
14. Характеристика GE 1.5 xle. — 2022. — URL: https://www.thewindpower.net/turbine_en_58_ge-energy_1.5xle.php.
15. Betz A. Introduction to the theory of flow machines. — Elsevier, 2014.

ДОДАТКИ

Додаток А.

Таблиця А.1

ВЕС, які постачають електроенергію за «зеленим» тарифом, станом на 31 грудня 2020 року

№	Назва ВЕС	Повне найменування суб'єкта господарювання, що має у користуванні об'єкт електроенергетики	Встановлена потужність (МВт)	Кількість та модель ВЕУ	Статус ВЕС
МИКОЛАЇВСЬКА ОБЛАСТЬ					
1.	Вітряний парк Очанівський	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	52,6	19 x 2,5 МВт WTU2.5 2 x 3,3 МВт WTU3.3 1 x 3,5 МВт WTU3.5	в роботі
2.	Вітряний парк Благодатний	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	14,3	2 x 2,5 МВт WTU2.5 1 x 4,5 МВт WTU4.5 1 x 4,8 МВт WTU4.8	в роботі
3.	Вітряний парк Причорноморський	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	42,8	3 x 2,5 МВт WTU2.5 2 x 3,0 МВт WTU3.0 6 x 3,2 МВт WTU3.2 2 x 3,3 МВт WTU3.3 1 x 3,5 МВт WTU3.5	в роботі
4.	Вітряний Парк Південний	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	10,5	3 x 3,5 МВт WTU3.5	в роботі
5.	Вітряний Парк Щасливий	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	7,0	2 x 3,5 МВт WTU3.5	в роботі
6.	Вітряний Парк Швидний	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	14,4	3 x 4,8 МВт WTU4.8	в роботі
7.	ВЕС Миколаївська область	ТОВ «Сінга Енерджі»	6	3 x 2 МВт Vestas 2,0	в роботі
ЛУГАНСЬКА ОБЛАСТЬ					
8.	Вітряний парк Краснодонський	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	25	10 x 2,5 МВт Fuhrlander FL2500 – 100	знаходяться на тимчасово невідконтрольній території, не постачають електроенергію до ОЕС України
9.	Вітряний парк Лутугінський	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	25	10 x 2,5 МВт Fuhrlander FL2500 – 100	знаходяться на тимчасово невідконтрольній території, не постачають електроенергію до ОЕС України
ДОНЕЦЬКА ОБЛАСТЬ					
10.	Вітряний парк Новоазовський	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	57,5	23 x 2,5 МВт Fuhrlander FL2500 – 100	знаходяться на тимчасово невідконтрольній території, не постачають електроенергію до ОЕС України
11.	ВЕО Вітроенергопром	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	30,53	204 x 0,1075 МВт USW56 – 100 6 x 0,6 МВт Turbowinds T600 – 48 2 x 2,5 МВт Fuhrlander FL2500 – 100	знаходяться на тимчасово невідконтрольній території, не постачають електроенергію до ОЕС України
12.	Краматорська ВЕС	ТОВ «УК «Вітряні парки України»	13,5	3 x 4,5 МВт WTU4.5	в роботі
ХЕРСОНСЬКА ОБЛАСТЬ					
13.	Новоросійська ВЕС	ТОВ «Віндрафт Україна»	9,225	3 x 3,075 МВт Vestas V112	в роботі
14.	ВЕС Ставки	ТОВ «Віндрафт Україна»	9,225	3 x 3,075 МВт Vestas V112	в роботі

№	Назва ВЕС	Повне найменування суб'єкта господарювання, що має у користуванні об'єкт електроенергетики	Встановлена потужність (МВт)	Кількість та модель ВЕУ	Статус ВЕС
15.	ВЕС Берегова	ТОВ «Віндрафт Україна»	12,3	4 x 3,075 МВт Vestas V112	в роботі
16.	Новотроїцька ВЕС	ТОВ «Віндрафт Таврія»	72,6	12 x 3,65 МВт Vestas V126 8 x 3,6 МВт Vestas V136	в роботі
17.	Овер'янівська ВЕС	ТОВ «Віндрафт Україна»	68,4	19 x 3,6 МВт Vestas V -136	в роботі
18.	Мирненська ВЕС	ТОВ «Віндрафт Каланчак»	163,0	35 x 4,2 МВт Vestas V -150 4 x 4,0 МВт Vestas V -150	в роботі
19.	Сиваська ВЕС	ТОВ «Сивашенергопром»	2,92	16 x 0,1075 МВт USW56 – 100 2 x 0,6 МВт Turbowinds T600 – 48	в роботі
20.	Сиваська ВЕС	ТОВ «Сивашенергопром» / NBT	101,4	26 x 3,9 МВт Nordex N131/3900	в роботі
ЗАПОРІЗЬКА ОБЛАСТЬ					
21.	Ботієвська ВЕС	ТОВ «Вінд Пауер» (ДТЕК)	199,875	65 x 3,075 МВт Vestas V112	в роботі
22.	ВЕС Приморська 1	ТОВ «Приморська вітро-електростанція» (ДТЕК)	99,58	26 x 3,83 МВт GE 3.8 – 130	в роботі
23.	ВЕС Приморська 2	ТОВ «Приморська вітро-електростанція 2» (ДТЕК)	99,58	26 x 3,83 МВт GE 3.8 – 137	в роботі
24.	Орлівська ВЕС	ТОВ «Орлівська вітро-електростанція» (ДТЕК)	98,8	26 x 3,8 МВт Vestas V126	в роботі
ОДЕСЬКА ОБЛАСТЬ					
25.	ВЕС Овід Вінд	Güriş İnşaat ve Mühendislik A.Ş	32,67	9 x 3,63 МВт GE 3.6 -137	в роботі
ЛЬВІВСЬКА ОБЛАСТЬ					
26.	ВЕС Старий Самбір 1	ТОВ «Еко-Оптіма»	13,2	4 x 3,3 МВт Vestas V112	в роботі
27.	ВЕС Старий Самбір 2	ТОВ «Карпатський вітер»	20,7	6 x 3,45 MW Vestas V136	в роботі
КИЇВСЬКА ОБЛАСТЬ					
28.	Вітротурбіна Bonus	ТОВ «Виробничо-Комерційна Фірма «ЛІГЕНА»	0,45	1 x 0,45 МВт Bonus 450/37	в роботі
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКА ОБЛАСТЬ					
29.	ВЕС Шевченкове-1 Перша черга	ТОВ «Вінд Енерджі»	0,6	1 x 0,6 МВт Nordex N43	в роботі
ТЕРНОПІЛЬСЬКА ОБЛАСТЬ					
30.	Зборівська ВЕС	ТзОВ «Зборівська птахофабрика»	1,98	3 x 660 кВт Vestas V47	в роботі
31.	ВЕС Біоенергопродукт	ТОВ «Біоенергопродукт»	4,0	2 x 2,0 МВт Enercon E70	в роботі
ВСЬОГО:			1314,1 МВт	609 ВЕУ	