

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Огурок Андрій Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента(ки)

На здобуття другого (магістерського) ступеня вищої освіти

Моделювання роботи двороторної вітроустановки для приватного будинку

Назва теми

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2 курсу група ЕТМ-23-1

Шифр



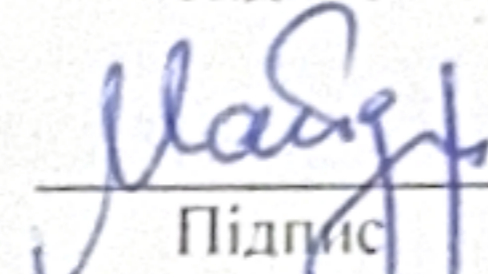
Підпис

Андрій ОГУРОК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник канд. техн. наук, доцент

Науковий ступінь, вчене звання



Підпис

Павло МАЙДАН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер ст. викладач

Посада



Підпис

Сергій ПУНДИК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри МАЕЕС

Назва



Підпис

Віталій НЕЙМАК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

17.12.2024

Дата

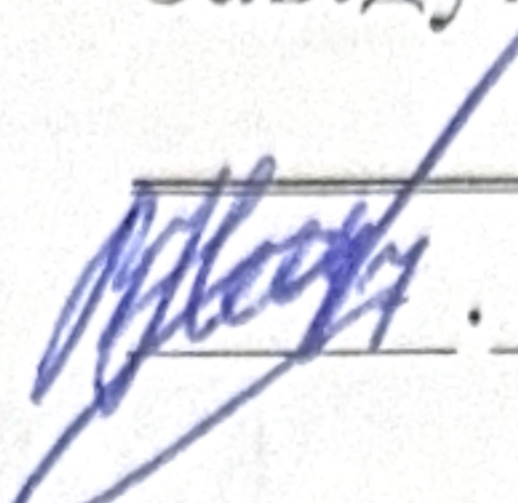
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

Неймак В.С.

 . 12 . 20 24 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Огурок Андрій Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Моделювання роботи двороторної вітроустановки для приватного будинку

Керівник роботи Майдан Павло Сергійович, канд. техн. наук, доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи електричні та енергетичні характеристики обладнання

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень використання вітроенергетичних установок. Розроблення конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку. Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку. Експериментальні дослідження конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Схема роботи вітрогенераторної установки (ДО, А1). 2. Взаємодія повітряного потоку з вітроколесами генератор (РР, А1). 3. Вітроенергетична установка (ВЗ, А1). 4. Інвертор для вітроенергетичної установки (ЕЗ, А1) 5. Аналітичні дослідження конструкції одно- та двороторної ВЕУ (РР, А1) 6. Дослідження конструкції двороторної ВЕУ в програмному комплексі ANSYS (РР, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

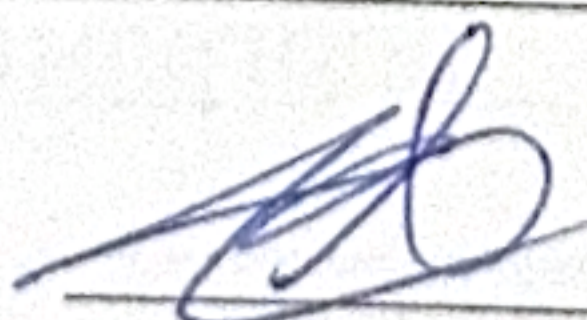
7. Дата видачі завдання _____

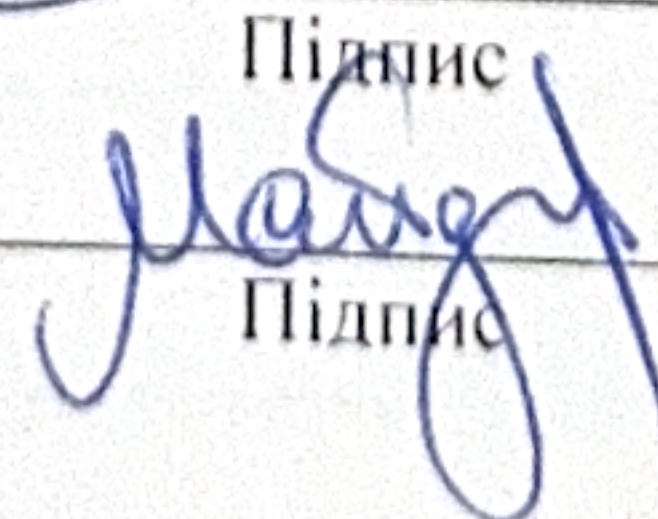
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень використання вітроенергетичних установок		
2. Розроблення конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку		
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку		
4. Експериментальні дослідження конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку		
5. Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи		
6. Оформлення графічного матеріалу		

Студент(ка)

Керівник роботи



 Підпис


 Підпис

Андрій ОГУРОК
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Павло МАЙДАН
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Огурок Андрій Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

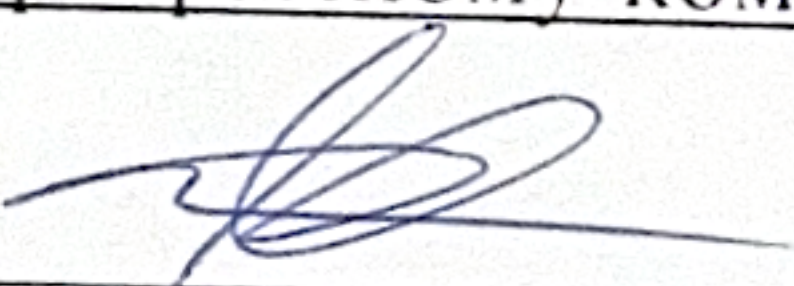
Тема роботи Моделювання роботи двороторної вітроустановки для приватного будинку

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____

2. Обсяг магістерської роботи: креслень 6 арк, сторінок записки 85

3. Характеристика розділів пояснювальної записки:

В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень використання вітроенергетичних установок. Описано сучасний стан розвитку вітроенергетичних установок та перспективи розвитку вітроенергетики. В другому розділі розроблено конструкцію двороторної вітроустановки для приватного будинку. Було виконано аналіз конструкцій вітроенергетичних установок та видів вітроенергетичних установок, потім було порівняно енергетичні характеристики вітроенергетичних установок. Описано проблематику розроблення конструкції двороторної вітроенергетичної установки. В третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку. Було проведено аналітичне дослідження використання енергії вітрового потоку та обґрунтовано конструктивні значення двороторної конструкції ВЕУ з контр обертанням крил. В четвертому розділі виконано експериментальні дослідження конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку. Проведено комп'ютерне моделювання конструкції ВЕУ та дослідження конструкції двороторної ВЕУ в програмному комплексі ANSYS.

Підпис студента 


" 17 " 12 20 24 р.

Р І Ш Е Н Н Я Е К ЗА М Е Н А Ц І Й Н О Ї К О М І С І І:

Протокол 3 від 25 12 20 24 р.

Оцінка роботи ЕК добре
Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____

Технічний секретар 

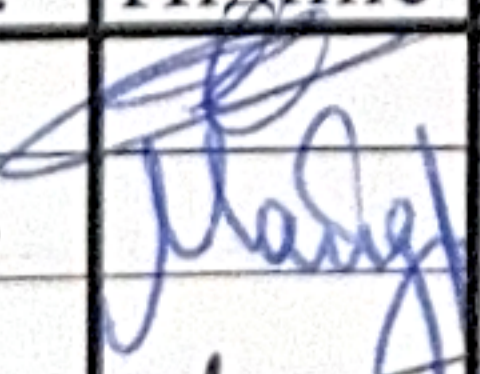
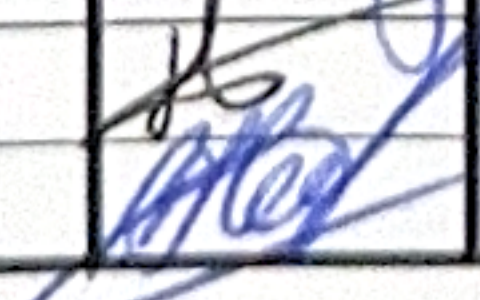

Підпис

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

" 25 " 12 20 24 р.

Зміст

	с.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень використання вітроенергетичних установок	8
1.1 Сучасний стан розвитку вітроенергетичних установок	8
1.2 Перспективи розвитку вітроенергетики	11
Висновки до розділу	13
2 Розроблення конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку	14
2.1 Аналіз конструкцій вітроенергетичних установок	14
2.2 Аналіз видів вітроенергетичних установок	16
2.3 Порівняльний аналіз енергетичних характеристик вітроенергетичних установок	20
2.4 Проблематика розроблення конструкції двороторної вітроенергетичної установки	28
Висновки до розділу	33
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку	34
3.1 Аналітичне дослідження використання енергії вітрового потоку	34
3.2 Обґрунтування конструктивних значень двороторної конструкції ВЕУ з контр обертанням крил	57
Висновки до розділу	60
4 Експериментальні дослідження конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку	61
4.1 Комп'ютерне моделювання конструкції ВЕУ	61

МРМА 24.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	
Виконав		Огурок А.С.			
Перевір.		Майдан П.С.			
Н.контр.		Пундик С.І.			
Затвер.		Неймак В.С.			
Моделювання роботи двороторної вітроустановки для приватного будинку			Літера	Аркуш	Аркушів
			М	4	85
ХНУ гр. ЕТМ-23-1					

4.2 Дослідження конструкції двоторної ВЕУ в програмному комплексі

ANSYS	68
Висновки до розділу	81
Висновки	83
Перелік джерел посилань	85
Додатки	

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Вступ

На сьогоднішній день вітрова енергія (ВЕ) є однією із найчистіших, найперспективніших альтернативних або відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Сучасна наука про використання енергію вітру переживає період досить стабільного розвитку. На сучасному етапі, зазвичай, використовують два підходи до використання ВЕ. Вітроенергетичні станції (ВЕС) високої потужності, працюють паралельно з загальною енергосистемою, а ВЕС низької потужності використовується автономно для локальних користувачів (споживачів), у більшості випадків децентралізованих.

Перспективи використання ВЕ визначаються наявністю відповідних вітроенергетичних ресурсів, наша країна багата на вітрові ресурси. Менше 50% території має середньорічну швидкість вітру в діапазоні від 4 до 5 м/с, а низка районів має швидкість вітру на рівні 6 м/с, що зумовлює дуже хороші перспективи для використання ВЕ.

Так як, більшість конструкцій горизонтальних вітроенергетичних установок (ВЕУ) є однороторними, що забезпечують надійність і довговічність роботи, простоту використання, проте існують фізичні обмеження на кількість енергії, яку можливо отримати з потоку вітру за допомогою використання таких однороторних ВЕУ. Однороторна ВЕУ може перетворювати менше 40% енергії вітрового потоку в необхідну споживачу електричну енергію. Таким чином, майже 60% потенційної енергії вітрового потоку не використовується. Тому частина даної енергії вітрового потоку може бути вилучена шляхом встановленням другого вітроколеса розташованим за першим вітроколесом.

Метою даної роботи є провести аналіз конструкції ВЕУ низької потужності із горизонтальною віссю обертання та контробротанням двох встановлених вітрових коліс.

Багато завдань, з якими доводиться на сучасному етапі стикатися науковцям та інженерам, не підлягають аналітичному вирішенню або вимагають

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

величезних затрат на виконання експериментальних досліджень. Найчастіше єдиною можливістю вирішення такої інженерної проблеми є використання комп'ютерного математичного моделювання.

Запропоновано методики аналізу комп'ютерного моделювання роботи ВЕУ та розрахунок основних аеродинамічних сил і моментів, розрахунок обтікання повітряними потоками, що виникають на однороторній і двороторній конструкції ВЕУ під час обдування її вітровим потоком у програмному комплексі ANSYS.

Результати кваліфікаційної роботи були представлені та високо оцінені на науковій студентській конференції кафедри машин та апаратів, електромеханічних та енергетичних систем у 2024 році. На основі моделювання було підготовлено тези у Збірник наукових праць «Технічна творчість» №9, 2024р. (див. додаток Б).

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень використання вітроенергетичних установок

1.1 Сучасний стан розвитку вітроенергетичних установок

Нині вітроенергетика рахується галуззю у світовій електроенергетиці, що найшвидше розвивається. ВЕ може вироблятися за допомогою використання великих ВЕС і середніх ВЕУ або малих вітрогенераторів. Наприклад, у 2011 році, загальна світова потужність ВЕУ складала $23,7 \cdot 10^4$ МВт, після $19,66 \cdot 10^4$ МВт у 2010 р. та $15,9 \cdot 10^4$ МВт у 2009 р.

Ринок нових ВЕУ досяг достатньо хороших показників: наприклад, у 2011 році встановлено генераторів загальною енергетичною потужністю більше 40 тисяч МВт, що на 6% вище, ніж у 2010 році (37,5 тисяч МВт).

Внесок ВЕ в загальний обсяг споживання електричної енергії склав досить суттєву частку навіть на глобальному рівні. Усі ВЕУ, встановлені в усьому світі, мають потенційну можливість виробляти понад 500 ТВт-год електроенергії, що становить приблизно 5% глобального споживання електричної енергії.

Відомо, що було введено в експлуатацію ВЕС загальною потужністю коло 40 ГВт - це більше, ніж у будь-якого іншого виду ВДЕ, близько 70 країн світу використовують ВЕУ потужністю вище за 10 МВт [1-6].

Світова сумарна потужність вітроенергетики досягла близько 300 тисяч МВт, з яких 44,5 тисячі МВт були додані у 2012 році, що перевищує показник всіх попередніх років. Експерти підраховали, що такі країни, як КНР і США, встановили близько 13 ГВт нових ВЕС кожна. При цьому США більшість турбін побудували у другій половині року, щоб встигнути скористатися Production Tax Credit (PTC або виробничим податковим кредитом) [6, 7].

Загалом же сектор вітроенергетики лише у 2012 році мав загальний грошовий оборот, що дорівнював близько 75 млрд доларів США.

Згідно з проведеними дослідженням, на Азію припадає найвища частка

					<i>MPMA 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

централізованої енергосистеми. Лише в КНР сучасний внесок малої ВЕ в електрифікацію сільської місцевості величезний, насамперед завдяки відносно низькому рівню цін на малі ВЕУ в країні [1-7].

Актуальність вибору в якості об'єкта дослідження ВЕУ малої (низької) потужності з горизонтальною віссю обертання вітродвигуна визначається тим, що: перспективою вдосконалення через досить високий попит на світовому ринку; невеликою відносною вагою на одиницю потужності; достатнім коефіцієнтом використання ВЕ; простотою і надійністю складання, використання та ремонту, доступними для користувачів, які не мають доступу до централізованої мережі електропостачання; екологічністю порівняно з ВЕУ великої (високої) потужності (малі ВЕУ не потребують відчуження земель і майже не створюють шуму).

Період окупності малої ВЕУ - основний фактор, що впливає на рішення про встановлення установки. Даний фактор залежить, в основному, висоти вежі, місця розташування, від якості вітряних ресурсів, переважаючих цін на електроенергію та характеристик турбіни, що використовується.

Великі ВЕС включаються в централізовану енергосистему, більш дрібні ВЕУ використовуються для постачання електричної енергії у віддалені райони. На відміну від стандартних джерел енергії, ВЕ практично невичерпна, доступна та більш екологічно чиста. Проте спорудження ВЕС пов'язане з деякими труднощами технічного та економічного характеру, що уповільнюють поширення вітроенергетики в світі.

Зокрема, мінливість вітрових потоків не створює проблем за умови невеликої пропорції ВЕ в загальному централізованому виробництві електричної енергії, однак при зростанні даної пропорції, зростають також і проблеми надійності виробництва всієї електричної енергії.

Зростанню ринку малої ВЕ можуть перешкоджати по перше адміністративні бар'єри та недосконалість логістики, по друге слабкий розвиток мережевої інфраструктури. З погляду централізованих силових мереж головні

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

проблеми пов'язані із модернізацією та удосконаленням старої централізованої мережі та будівництвом нових об'єктів для додаткової передачі та розподілу енергії. Розширення централізованої мережі вимагає значних затрат коштів і часу, що в середньостроковій перспективі може призвести до зниження окупності встановлених ВЕС. ВЕС, як правило, монтуються у віддалених районах, які слабо заселені й не володіють достатньою кількістю ліній електропередачі (ЛЕП).

Якщо виконувати порівняння ринку великих вітряних турбін з ринком малої ВЕ, то ринок малої ВЕ виявиться зовсім незрілим. Незважаючи на значну кількість у усьому світі компаній-виробників малих ВЕУ, конкуренція між ними залишається досить низькою. Це в свою чергу дозволить новим виробникам претендувати на власну частку ринку, і можливо у майбутньому призведе до посилення конкуренції.

Основними покупцями малих ВЕУ є власники приватних будинків та невеликі підприємства. Для даного сегмента ринку споживачів чутливість до ціни залишається достатньо високою, оскільки наразі вартість встановлення малого ВЕУ майже рівна з витратами на встановлення електрогенераторів, що використовують інші види ВДЕ, або на джерела енергії, що працюють на звичайному паливі [1-7].

1.2 Перспективи розвитку вітроенергетики

У нас є достатня кількість запасів викопного палива, але ми істотно відстаємо від головних розвинених країн і багатьох країн, що розвиваються, як за обсягом, так і за темпами застосування ВДЕ. Також в нас є досить значні ресурси ВДЕ у вигляді енергії сонця, біомаси, гідроенергії, ВЕ. Однак, крім частини гідроенергії (ГЕС та ГАЕС), перераховані ресурси не знайшли достатнього рівня застосування аж до теперішнього часу. Основний споживач палива - виробництво електроенергії та, відповідно, тепла. У структурі

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		11

паливного балансу електростанцій головну роль відіграє викопне вугілля, частка якого становить приблизно 75%, частка газу - 23%, відповідно, частка палива – 2%. Спостерігається стійка динаміка збільшення кількості споживачів та відповідно зростання виробництва електроенергії.

За наявних потужностей генерації електроенергії спостерігається певний дефіцит. Загальна встановлена потужність електростанцій складає близько 15 ГВт. Однак, наявні потужності генерації електроенергії мають досить значний термін експлуатації (більше 25 років). У структурі генерувальних потужностей теплові електростанції становлять близько 45% від загальної потужності, частка гідроелектростанцій - близько 12%, інші - близько 6% [1-10].

Перспективи використання вітроенергетики визначаються наявністю відповідних вітроенергетичних ресурсів, якщо приблизно 50% має на своїй території середньорічну швидкість вітрового потоку в діапазоні від 4 до 5 м/с, а частина територій буде мати швидкість вітру 6 м/с або навіть більше, що зумовлює дуже хороші перспективи для використання вітроенергетики. Для точної оцінки потенціалу ВЕ місць можливого монтажу обладнання необхідні спеціальні метеодослідження з використанням спеціалізованих метеомачт висотою від 30 до 80 м протягом щонайменше одного року досліджень. Отримані метеодані будуть використані для розрахунку річного вироблення електроенергії за допомогою ВЕУ. Такі результати використовують зазвичай для підготовки техніко-економічного обґрунтування будівництва ВЕС.

Спеціалістами спільно з міжнародними фахівцями з Німеччини було визначено перспективні місця для будівництва ВЕС на підставі аналізу метеоданих з урахуванням наступних факторів:

- топографія місцевості та висота над рівнем моря;
- доступність ЛЕП і розташування підстанцій для видачі потужності;
- наявність споживачів електричної енергії;
- наявність транспортних розв'язок;
- можливість монтажу ВЕС.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Основними відмінностями ВЕ від теплової електроенергії є нерівномірність потоку енергії з якої будемо отримувати електрику, що робить досить проблематичним узгодження графіків генерації та споживання енергії.

Питання нерівномірності ВЕ і, отже, загальної потужності, що видається ВЕУ можливо описати на досвіді країн із високим використанням ВЕУ в централізованій енергетичній мережі [11-17].

Висновки до розділу

На сьогоднішній день ВЕ є одним з найчистіших, найперспективніших ВДЕ. Дана енергія представляє привабливі можливості для широкого кола людей, у тому числі інвесторів. Основною метою ВЕ є зведення до мінімуму собівартості електричної енергії отриманої від ВЕУ для того, щоб зробити більш конкурентоспроможною порівняно з традиційною енергетикою.

На сучасному етапі існує два підходи до використання ВЕ. Перший - велика вітроенергетика, що базується на потужних ВЕУ від 100 кВт, і мала ВЕ, що базується на ВЕУ низької потужності до 100 кВт. ВЕС високої потужності працюють паралельно з централізованою енергосистемою, а ВЕС низької потужності використовується автономно для децентралізованих малих споживачів.

Перспективи використання вітроенергетики визначаються наявністю відповідних вітроенергетичних ресурсів.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

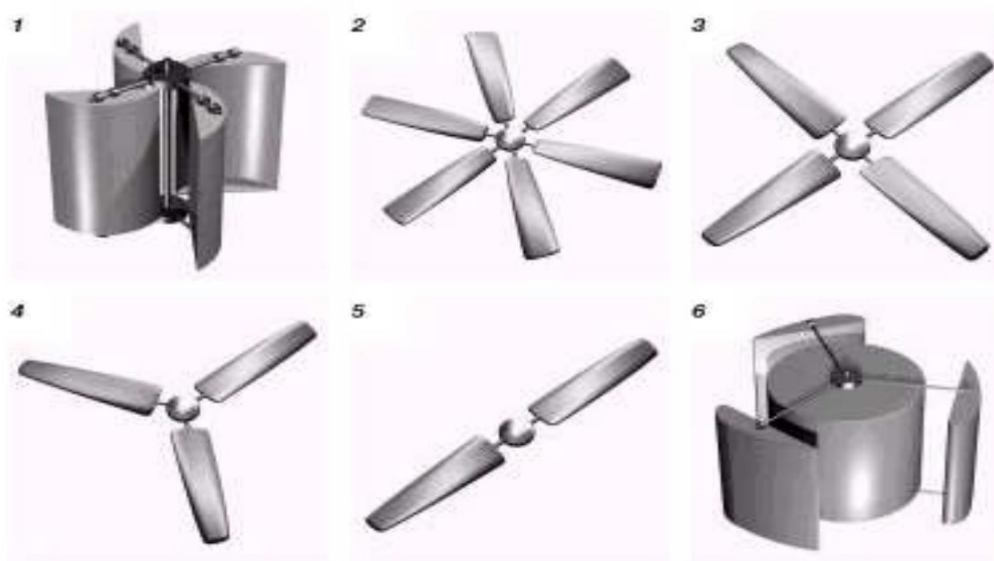
2 Розроблення конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку

2.1 Аналіз конструкцій вітроенергетичних установок

Сучасні ВЕУ це цілий комплекс взаємопов'язаного обладнання та споруд, які перетворюють ВЕ в механічну енергію обертання вітроколеса, а потім в електричну енергію через генератор.

Більшість типів ВЕУ відомі досить давно, основні різновиди ВЕУ представлені на рисунку 2.1, зазвичай класифікуються на 2 групи [1, 6, 8, 16]:

- ВЕУ із горизонтальною віссю обертання;
- ВЕУ із вертикальною віссю обертання.



1 – з вертикальною віссю обертання лопатеві; 2-5 – з горизонтальною віссю обертання крильчаті; 6 – з вертикальною віссю обертання ортогональні

Рисунок 2.1 – Основні різновиди ВЕУ:

Типи крильчастих ВЕУ розрізняють лише за кількістю лопатей (рис. 2.1). Для крильчастих ВЕУ, найбільш ефективна робота яких буде у випадку

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
14

коли дія вітрового потоку буде перпендикулярною до площини обертання лопатей, тому в конструкції необхідно передбачати пристрій автоматичного повороту осі обертання при зміні напрямку вітрового потоку. Зазвичай з цією метою використовують в конструкції так зване крило-стабілізатор. Карусельні ВЕУ володіють перевагою, що можуть працювати за будь-якого напрямку вітрового потоку, не змінюючи власного положення та осі обертання. Поширення крильчастих ВЕУ можливо пояснити величиною швидкості обертання, тому можуть без використання мультиплікатора, безпосередньо з'єднуватися із генератором змінного електричного струму. Загально відомо, що величина швидкості обертання крильчастих ВЕУ обернено пропорційна кількості встановлених в конструкції крил, тому ВЕУ із кількістю крил що перевищує три практично не встановлюються [1, 6, 8].

Відмінність в аеродинаміці надає карусельним ВЕУ перевагу в порівнянні із традиційними конструкціями ВЕУ. При збільшенні швидкості вітрового потоку швидко нарощують силу тяги, після чого швидкість обертання крил стає сталою. Карусельні конструкції ВЕУ тихохідні і це надає можливість використовувати прості електричні схеми, наприклад, з встановленням асинхронного генератора, без ризику при випадковому пориві вітру отримати аварійну ситуацію. Тихохідність конструкції проте висуває одне обмеження – використання в електричній схемі багатополусного генератора, що працює тільки на малих обертах. Дані генератори не мають широкого вжитку, а використання мультиплікаторів неефективне через низький ККД таких генераторів.

Ще більш важливою перевагою карусельної конструкції ВЕУ є здатність без додаткових спеціальних механізмів стежити за зміною напрямку вітрового потоку, що вельми істотно для приземних повітряних потоків. ВЕУ подібного типу будують у Японії, США, ФРН, Англії, Канаді. Карусельний лопатевий ВЕУ є найпростішим в використанні та конструкції, яка забезпечує максимальний момент під час запуску ВЕУ й автоматичне саморегулювання максимальної

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

швидкості обертання вітроколеса в процесі роботи. Зі збільшенням навантаження зменшується швидкість обертання вітроколеса і зростає обертальний момент аж до повної зупинки [1, 6, 8, 16]. Ортогональні ВЕУ, як вважають спеціалісти, перспективні для використання у великій енергетиці. Сьогодні перед ВЕУ ортогональних конструкцій стоять певні труднощі, головна серед таких труднощів проблема запуску ВЕУ.

2.2 Аналіз видів вітроенергетичних установок

ВЕУ використовуються для перетворення кінетичної енергії вітрового потоку на електричну за допомогою використання лопатей ротора, що приводяться в обертання вітровим потоком, з'єднаного з електричним генератором через стандартний механічний редуктор. Лопаті або крила ВЕУ використовуються аналогічно до лопатей двигуна літака для обертання головного валу ротора, з'єднаної через коробку передач з великим передаточним числом із встановленим електричним генератором. За конструкцією генератори ВЕУ майже повністю відповідають генераторам, які використовують на стандартних електростанціях, що працюють завдяки використанню ядерного пального, спалюванню викопного палива або руху потоків води. Конструкції електричних машин, що використовуються для виробництва електричної енергії за рахунок вітрового потоку, дуже різноманітні, багато з них представляють досить незвичайні конструкції. Проте, необхідно пам'ятати, що реально існують два головні типи сучасних ВЕУ:

- з вертикальною віссю обертання;
- з горизонтальною віссю обертання.

Конструкція ВЕУ з горизонтальною віссю обертання, зазвичай має 2 або 3 крила-лопаті, встановлені на вершині вежі в спеціальній гондолі, дана конструкція представляє найбільш поширений тип ВЕУ. Розташування ведучого валу ротора в якості складової частини вітрової турбіни, що з'єднує крила зі

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

співвісним електричним генератором, прийнято вважати головною віссю всієї вітрової машини. У ВЕУ з горизонтальною віссю обертання ведучий (головний) вал ротора розташований горизонтально.

У робочому стані ротор ВЕУ відносно напрямку вітрового потоку може перебувати перед спеціальною гондолою – так званий навітряний ротор, або за спеціальною гондолою – так званий підвітряний ротор. Найчастіше ВЕУ з горизонтальною віссю обертання оснащені двома або трьома крилами, хоча рідко зустрічаються моделі із більшим числом крил. Вони отримали назву «ромашки», або «монолітні установки», дані ВЕУ використовуються, насамперед, в якості водяних насосів.

На відміну від таких конструкцій площа крил ротора ВЕУ з двома-трьома крилами не є суцільною. Для найбільш ефективної роботи ВЕУ крила повинні максимально взаємодіяти з вітровим потоком, що проходить через площину обертання крил ротора - так звану площу поперечного перерізу. ВЕУ з великою кількістю крил зазвичай працюють за низьких величин швидкості обертання і створюють великий обертовий момент на валу ВЕУ, у той час як ВЕУ з двома або трьома крилами повинні обертатися з досить високою швидкістю, щоб максимально «охопити» вітрові потоки, що проходять через площу поперечного перерізу.

Теоретично, чим більше крил встановлено на ротора, тим ефективнішою повинна бути робота. Однак ВЕУ з великою кількістю крил на роторі менш ефективні, ніж ВЕУ із двома або трьома крилами в конструкції, оскільки крила створюють додаткові перешкоди за рахунок утворення завихрення повітряних потоків під час зриву з крила, що призводять до зниження підйомної сили крила.

Для водяних насосів, що працюють за допомогою використання вітрових потоків, необхідне створення достатньо високого стартового обертового моменту. ВЕУ із великою кількістю крил використовуються для підйому мас води саме тому, що завдяки низькому коефіцієнту окружної швидкості на кінці крила створюються достатньо високі стартові характеристики, і ВЕУ може

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		17

працювати за малих величин швидкості вітрового потоку.

ВЕУ із вертикальною віссю обертання мають в своїй конструкції ведучий вал ротору, розташований вертикально. Крила даного виду ВЕУ - довгі, зазвичай дугоподібні за формою, крила прикріплені до верхньої та нижньої частин вежі відповідно. У світі існує декілька виробників даних конструкцій ВЕУ, найвідоміший із них - компанія Flowind [18]. Завдяки вертикальному розташуванню ведучого валу ротора, на відміну від ВЕУ із горизонтальною віссю обертання ротора, «захоплюють» вітровий потік, що тече в будь-якому напрямку, і для цього не потрібно змінювати положення ротора і осі обертання при кожній зміні напрямку вітрових потоків.

Перевагою даних ВЕУ є можливість розміщення редуктора і генератора змінного електричного струму безпосередньо на землі, а не в спеціальній гондолі на вершині вежі. Автором ідей створення ВЕУ із вертикальною віссю обертання є французький інженер Darieus [19], який запатентував даний тип ВЕУ в далекому 1903 році. Однак через проблеми із використанням гнучкого і довгого валу в конструкції такі ВЕУ не знайшли широкого застосування.

Незважаючи на свою зовнішню відмінність ВЕУ з вертикальною і горизонтальною осями обертання роторів схожі. Кінетична енергія вітрового потоку, одержувана під час взаємодії повітряних потоків із крилами ВЕУ, через стандартний редуктор передається на генератор змінного електричного струму. Завдяки механічній трансмісії генератор змінного електричного струму може працювати ефективно при різних значеннях швидкості вітрового потоку. Вироблена електрична енергія може використовуватися:

- надходити в централізовану електричну мережу для загального використання;
- безпосередньо використовуватись споживачем на місці встановлення ВЕУ;
- накопичуватися в акумуляторних батареях для більш пізнього використання і паралельно використовуватись для живлення наявного

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

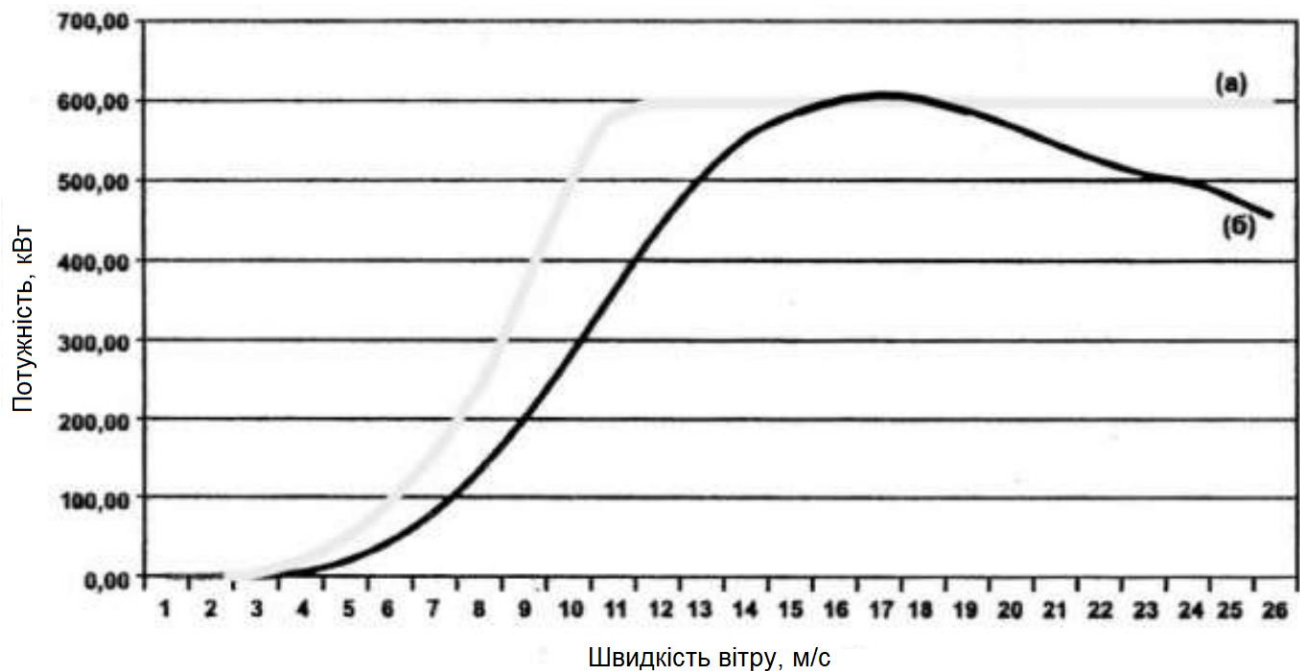


Рисунок 2.2 – Графічні залежності робочих характеристик різних типів конструкцій ВЕУ

Як видно з графічної залежності, дані ВЕУ працюють у діапазоні швидкостей вітрового потоку від 2 до 25 м/с. За сильних вітрів ($V > 25$ м/с) дані ВЕУ загальмовуються і припиняють роботу, щоб уникнути механічних поломок крил та всієї конструкції ВЕУ [1, 6, 8, 16].

2.3 Порівняльний аналіз енергетичних характеристик вітроенергетичних установок

Автономні ВЕУ ідеально підходять для електропостачання окремих приватних будинків, ферм або приватних господарств, які розташовані на відстані від наявних високовольтних ЛЕП. Може бути використана модель ВЕУ, конструкція якого найбільш пристосована до наявних у районі вітрових умов.

Малі ВЕУ, що забезпечують електроенергією ціле домашнє господарство, роботу сепараторів молока, глибинних насосів або пральних апаратів - найцікавіші приклади використання енергії вітрового потоку на віддалених територіях. Подібні ВЕУ представляють особливий інтерес для сільських

господарств, які важко приєднати до централізованої електричної мережі, користувачі продовжують використовувати для освітлення свічки, а електропобутові прилади працюватимуть лише під час роботи окремих дизель генераторів.

У місцевостях, де середньо річне значення швидкості вітрового потоку становить менше 5 м/с, можна використовувати прості конструкції ВЕУ зі загальною потужністю в декілька кВт. Кількості електричної енергії, що виробляється даними ВЕУ, достатньо для підзарядки акумуляторів, забезпечення освітлення приватного будинку діодними лампами та, наприклад, живлення телевізора.

Використання конструкцій малих ВЕУ часто має низку відомих переваг перед застосуванням дизельних (чи інших) генераторів або розширенням існуючих централізованих електричних мереж загальної енергосистеми. ВЕУ менша за розміром, являє за конструкцією єдиний модуль і на монтаж необхідно менше часу, ніж на роботи з розширення або модернізації наявних централізованих електричних мереж загальної енергосистеми. Наприклад, продовження високовольтної ЛЕП (мінімум 35 кВ) на відстань у 1 км шляхом нового будівництва коштуватиме занадто багато.

З іншого боку, якщо виконувати порівняння із дизельними генераторами первісна вартість ВЕУ трохи вища, але з точки зору користувачів ВЕУ набагато кращі в роботі через відсутність витрат на паливо, особливо у важкодоступних і віддалених районах, де на доставку одного літру палива для дизель-генератора потрібно буде приблизно п'ять літрів для транспорту.

До основних енергетичних характеристик ВЕУ зазвичай відносять [1, 6]:

- габарити ВЕУ (діаметр вітроколеса, загальна висота вежі тощо);
- загальна потужність;
- швидкохідність вітроколеса;
- частота обертання вітроколеса;
- вага;

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- коефіцієнт використання енергії вітрового потоку;
- спосіб керування встановленням на напрямок вітрового потоку;
- відсутність негативного впливу на навколишнє середовище та людину.

Характеристики вертикально - осьових ВЕУ:

- висота вежі ВЕУ не перевищує 1,5 м;
- діаметр модулів коливається від 0,5 до 1,5 м;
- загальна потужність до 15-20 кВт.

ВЕУ з горизонтальною віссю обертання за конструктивними параметрами належать до так званого пропелерного типу. Основним критерієм роботи вітроколес даного типу є підйомна сила. Розглянуті вітроколеса складаються з основних вузлів крила, маха та маточини. Кут, який утворюється між крилом і всією площиною обертання вітроколеса, носить назву кут заклинювання φ . Кут, під яким вітровий потік набігає на елементи крила, носить назву кут атаки α . Якби вітроколесо встановлювалось нерухомим, то напрямок вітрового потоку, що набігає на крило, збігався б із напрямком швидкості крила V . Але оскільки вітроколесо обертається, то кожен елемент крила має певну окружну величину швидкості, яка тим вища, чим далі даний елемент розташовано від головної осі вітроколеса. Напрямок цієї швидкості збігається з головною площиною обертання вітроколеса (ω_R). Дана швидкість, що складається зі значень швидкостей V та ω_R , отримала назву відносної швидкості W . Для кожного елемента крила дане значення швидкості має свою величину і набігає під різними кутами атаки α [6,8].

ВЕУ з вертикальною головною віссю обертання застосовуються, як зазвичай, для ВЕУ з великими крилоподібними лопатями. Крила ВЕУ з вертикальною головною віссю обертання внаслідок власної геометрії за будь-якого напрямку вітрового потоку перебувають у своєму робочому положенні. Геометричне заповнення вітроколеса визначається числом встановлених крил. ВЕУ з великим геометричним заповненням вітроколеса розвивають значний обертовий момент за відносно слабкого вітрового потоку і максимум потужності

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

установки. Для різних конструкцій ВЕУ розроблено і запропоновано різні варіанти концентраторів. Це можуть бути дифузори або, навіть, конфузори дефлектори, що направляють на вітроколесо повітряний потік із площі більшої, ніж та яку захоплює вітроколесо. Відома ВЕУ вертикально-осьового обертання із ротором, що розташовується в спеціальній трубі або башті, усередині яких генеруються додаткові висхідні вихори. Одночасно відбувається процес нагрівання повітря, що знаходиться всередині вежі, шляхом використання сонячного випромінювання, з подальшим розширенням обсягу повітря, внаслідок чого виходить ефект газової турбіни [1, 6, 8, 16].

Більшість конструкцій горизонтальних ВЕУ є однороторними, що забезпечують простоту використання, надійність та довговічність роботи. Проте, існують певні фізичні обмеження на загальну кількість енергії, яка може бути використана з вітрового потоку за допомогою однороторної ВЕУ. Основним недоліком таких ВЕУ з горизонтально-осьовим вітродвигуном є те, що вони починають більш-менш якісно працювати при значеннях швидкості вітрового потоку, вище за 6 м/с, що обмежує сферу використання даних ВЕУ, тому що в багатьох районах країни відсутні сильні вітрові потоки, які є більш-менш постійними.

Однією з найперспективніших задач у малій ВЕ є створення ВЕУ із двома вітроколесами, що можуть обертатись в протилежні сторони. У даному випадку досягається збільшення генерації потужності від певного вітрового потоку одним електричним генератором змінного струму. Таке рішення дає можливість використовувати не лише мінімальні значення швидкості вітрового потоку, покращити пускові характеристики вітрового агрегату, а і підвищити ефективність роботи всієї ВЕУ.

Для обґрунтування технічних параметрів ВЕУ для автономних систем електропостачання необхідно визначити вітровий потенціал, що розраховується на одиницю площі поперечного перерізу встановленого вітроколеса. За отриманими даними для груп метеостанцій із середньорічними швидкостями

										Арк.
										24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>					

вітру в діапазоні від 2 до 5 м/с (з кроком в 1 м/с) побудовано залежності повторюваності значення швидкості вітрового потоку та розподілу річної питомої енергії вітрового потоку, виконано розрахунок питомого валового вітропотенціалу $W_{не}$ на одиницю площі встановленого вітроколеса за період часу t , для умовної ВЕУ із діаметром один метр та розраховано значення встановленої робочої швидкості вітрового потоку V_p з наступної умови [1, 6, 8]:

$$W_{не} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot t \cdot V^3 \cdot f(V)_{\rightarrow \max}, \quad (2.1)$$

де V - значення швидкості вітрового потоку, м/с; ρ - густина повітря, кг/м³; $f(V)$ - функція розподілу значень швидкості вітрового потоку.

З урахуванням отриманих аналітичних залежностей функції розподілу складено та розв'язано рівняння для визначення значення V_p за середньорічним значенням швидкості вітрового потоку V_2 . Після опрацювання даних отримано залежність для визначення оптимального робочого значення швидкості вітроколеса за значенням V_2 (квадрат змішаної кореляції $R^2 = 0,866$):

$$V_p = -0,2471V_2^2 + 3,752V_2 - 1,498. \quad (2.2)$$

Для отриманих розрахункового значення швидкості вітрового потоку виконано аналітичний розрахунок кінетичної енергії вітрового потоку $N_{ек}$, що проходить за одиницю часу через поперечний переріз встановленого вітроколеса, і річного питомого виробітку енергії вітрового потоку $W_{ур}$:

$$N_{ек} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3; \quad (2.3)$$

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк. 25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$W_{не} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{V_i=0}^{V_i=V_p} V_i^3 \cdot t_{V_i}, \quad (2.4)$$

де S - загальна площа вітроколеса, м²; t_{V_i} - час дії швидкості вітрового потоку.

У результаті даного аналітичного розрахунку виділено п'ять можливих типів місцевості за середньорічним значенням швидкості вітрового потоку, для яких розраховано оптимальні розрахункові значення швидкості вітрового потоку, границі зміни надходження кінетичної енергії та питомий потенціал вітрового потоку на рік на одиницю площі поперечного переріз вітроколеса (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Показники вітрового потенціалу на місцевості [6, 7]

Тип	V_p , м/с	V_2 , м/с	$N_{вк}$, Вт/м ²	$W_{ур}$
1	≤ 5	≤ 2	≤ 71,5	≤ 115
2	Від 5 до 7,5	Від 2 до 3	Від 72 до 244	Від 115 до 329
3	Від 8 до 9,5	Від 3 до 4	Від 245 до 503	Від 353 до 694
4	Від 10 до 11	Від 4 до 5	Від 504 до 799	Від 716 до 1204
5	≥ 11	≥ 5	≥ 800	≥ 1239

Структурну схему ВЕУ представлено на рисунку 2.3.

Підсистема ВЕУ складається з наступних елементів (рис. 2.3): вітроколесо (ВК), щогла (Щ), привід (Пр), перетворювач струму або інвертор (І), генератор із контробротанням (Г), контролер (К).

Під час вибору параметрів ВЕУ враховують обмеження:

$$N_{ном} \geq (2,5 \dots 5) \cdot N_{спож.мах}; W_{доб} \geq W_{спож.доб}; h_{ц} = \frac{D}{2} + 4,5, \quad (2.5)$$

де $N_{ном}$ - номінальна потужність автономної ВЕУ, кВт; $N_{спож\max}$ - пікове значення споживаної потужності з графіка навантаження, кВт; $W_{доб}$ - добове вироблення електроенергії ВЕУ, кВт*год; $W_{спож.доб}$ - добова потреба споживача в електроенергії, кВт*год; $h_{щ}$ - висота щогли ВЕУ, м; D - діаметр вітроколеса, м.

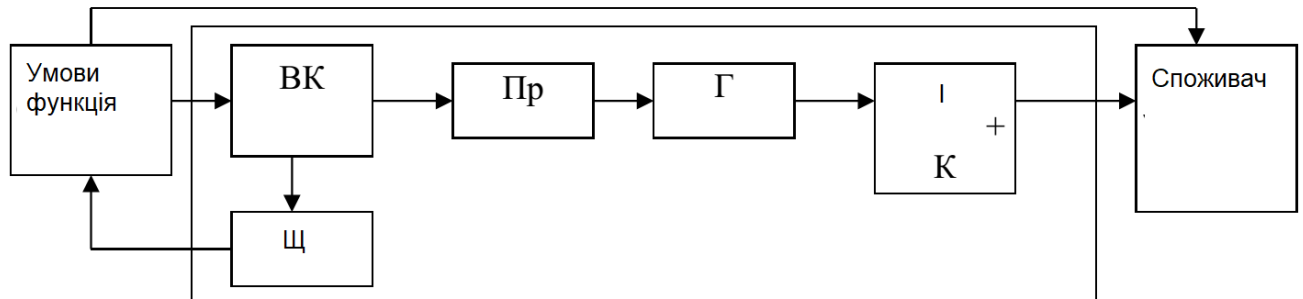


Рисунок 2.3 - Структурна схема ВЕУ

Для збільшення загальної кількості енергії, що виробляється ВЕУ, можна виконати наступні кроки: підвищити коефіцієнт використання енергії вітру (ξ) шляхом покращення аеродинамічних характеристик вітроколеса; підвищити к.к.д. електроприводу ($\eta_{пр}$); підвищити к.к.д. генератора електричного струму (η_2); узгодити моментні та швидкісні характеристики вітроколеса, генератора електричного струму і електроприводу для роботи в оптимальному діапазоні значень робочих швидкостей (V_0, V_p, V_{max}) для даного типу місцевості. Для узгодженої роботи вітроколеса, генератора електричного струму та електроприводу необхідно визначити необхідні значення механічної потужності на головному валу ($N_{вк}$) і частоти обертання вітроколеса ($n_{вк}$):

$$N_{вк} = \frac{N_{пр}}{\eta_{пр}} = \frac{N_{ном}}{\eta_{ном} \cdot \eta_{пр}}; \quad (2.6)$$

$$n_{вк} = \frac{n_{ном}}{i_{пр}}, \quad (2.7)$$

де N_{np} - загальна потужність електроприводу, кВт; i_{np} - передаточне відношення електроприводу.

Визначимо механічну потужність на валу вітроколеса за розрахункового значення швидкості вітрового потоку згідно наступної формули [6, 8, 16]:

$$N_{вк} = 0,000481 \cdot \xi \cdot D^2 \cdot V_p^3. \quad (2.8)$$

2.4 Проблематика розроблення конструкції двороторної вітроенергетичної установки

Однією з проблем розроблення конструкції ВЕУ є підведення теоретичної бази створення систем технічного пристрою, що ефективно перетворює енергію вітрового потоку. Існує ціла низка труднощів на шляху розвитку і широкого використання автономних енергетичних установок.

До них відносять великі капіталовкладення, економічну рентабельність різних типів електричних генераторів, експлуатацію, надійність роботи, екологічну прийнятність тощо. Загально відомо, що на сучасному етапі існує два підходи до використання енергії вітрового потоку: перший - велика ВЕ, що використовує потужні ВЕУ загальною високою потужністю від 100 кВт, і мала ВЕ, що використовує ВЕУ низької потужності до 100 кВт.

ВЕС високої потужності працюють паралельно з централізованою енергосистемою, а ВЕС низької потужності використовується автономно для малих приватних споживачів, у більшості випадків децентралізованих. Створення та розроблення ВЕУ низької потужності пов'язані з вирішенням цілої низки складних як наукових, так і практичних завдань:

- пошук і розроблення конструкції генератора, що стабільно працює в умовах малих значень швидкості вітрового потоку;
- визначення раціональних режимів роботи ВЕУ при малих значеннях швидкості вітрового потоку;

- розроблення методів розрахунку ефективності використання ВЕУ з урахуванням динамічної взаємодії з вітроколесом;
- моделювання аеродинамічних процесів на вітроколесі і ВЕУ в цілому.

Відомо, що в аеродинамічних аналітичних дослідженнях визначення взаємодії між середовищем і тілом, що рухається в середовищі, ґрунтується на принципі оберненого руху відповідно до якого система, що взаємодіє – «нерухоме середовище - рухомий об'єкт» [1, 6, 8, 16]. У випадку заміни однієї системи іншою повинна бути дотримана умова, за якої значення швидкості вітрового потоку, що набігає на нерухоме тіло, дорівнювала б значенню швидкості руху даного тіла в нерухомому середовищі.

Система диференціальних рівнянь, що лежить в основі розв'язання задач обтікання тіла середовищем, розглядається окремо для 2 головних видів руху вільного (нев'язкого) потоку та течії в тонкому пристінковому шарі газу - приграничному шарі, де рух розглядається з урахуванням впливу сил тертя. Даний розподіл потоку речовини спирається на гіпотезу про відсутність можливого зворотного впливу граничного шару на вільний потік речовини. Згідно з даною гіпотезою параметри - невязкого обтікання, тобто на зовнішній границі приграничного шару, будуть абсолютно аналогічними як і на стінці за відсутності цього приграничного шару.

В аеродинамічних дослідженнях за невеликих значень швидкості не обов'язково враховувати можливі теплові процеси в приграничному шарі через досить малу інтенсивність. Знаходження аеродинамічних параметрів ВЕУ за можливого неусталеного руху, що характеризується зміною кінематичних параметрів у часі, є досить складним завданням [6, 8].

На практиці використовують спрощені методи розв'язання даного завдання. Під час аналітичного визначення аеродинамічних характеристик у розробленні можна виходити з гіпотези стаціонарності, відповідно до якої вказані характеристики в нестационарному русі речовини приймаються такими, як у стаціонарному і визначаються кінематичними параметрами руху речовини в

реальний момент часу.

Однак на сучасному етапі існує чимало питань використання енергії низько швидкісних потоків речовини, які приховують безліч завдань, що потребують майже миттєвого вирішення. Розв'язання представлених завдань розроблення технічних пристроїв дозволяють на даному етапі ефективно використовувати малошвидкісні вітрові потоки.

Одним із найперспективніших завдань малої ВЕ є створення ВЕУ із двома вітроколесами, що обертаються в протилежних напрямках. У такому випадку не тільки досягається властивість саморегулювання внаслідок взаємного впливу крил вітроколес, що рухаються назустріч, але також зростає відносна частота обертання двох встановлених роторів.

Важливим показником ВЕУ, що впливає на величину критеріїв є питома потужність генератора, яку можливо аналітично визначити згідно формули [1, 6, 8, 16]:

$$P_{ген.пит} = P_{ген.ном} \cdot S_{вк}, \quad (2.9)$$

де $P_{ген.ном}$ - номінальна потужність електричного генератора, кВт; $S_{вк}$ - площа поверхні, яку змітають крила вітроколеса, м².

З даної позиції для підвищення ефективності ВЕУ вельми перспективно вважається підхід використовувати систему вітроколес, що обертаються в протилежних напрямках. У такому випадку досягається збільшення генерації енергетичної потужності від певного вітрового потоку одним електричним генератором. Дане рішення дає змогу використовувати не лише мінімальні значення швидкості вітрового потоку, покращити пускові характеристики агрегату, а й покращити ефективність роботи ВЕУ в цілому.

Огляд літературних джерел, що описують конструкторські, теоретичні, експериментальні та експлуатаційні аспекти з дослідження віротехнічних пристроїв вказує на те, що ВЕУ з двома встановленими вітроколесами є досить

основі імпульсного методу класичної теорії, змушують звернутися до вивчення законів аеродинаміки [6, 8, 16].

Висновки до розділу

Сучасні ВЕУ це цілий комплекс взаємопов'язаного обладнання та розміщених споруд, які перетворюють енергію вітрового потоку в механічну енергію вітроколеса, що обертається, а потім і в електричну енергію за допомогою електричного генератора.

Більшість конструкцій горизонтальних ВЕУ є однороторними, що забезпечують простоту монтажу, надійність і довговічність роботи. Проте, існують певні фізичні обмеження на загальну кількість енергії, яка може бути використана з вітрового потоку за допомогою однороторної ВЕУ. Основним недоліком ВЕУ з горизонтально-осьовим розташуванням вітродвигуна є те, що вони починають нормально працювати при значеннях швидкості вітрового потоку більше за 6 м/с, що впливає на ефективність використання даних ВЕУ.

Одним із найперспективніших завдань у малій ВЕ є створення ВЕУ з двома встановленими вітроколесами, що обертаються в протилежних напрямках. У даному випадку досягається збільшення генерації загальної потужності від певного вітрового потоку одним електричним генератором. Таке рішення дає можливість використовувати не тільки мінімальні значення швидкості вітрового потоку і покращити пускові характеристики агрегату, а й покращити загальну стійкість вироблення електроенергії.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		33

3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції двороторної вітроустановки для приватного будинку

3.1 Аналітичне дослідження використання енергії вітрового потоку

Зазвичай при визначенні силових характеристик та характеристик потужності взаємодії вітрового потоку з встановленим вітроколесом використовуються теорія реального колеса за авторства Г.Х. Сабініна [20]. Дана теорія базується на загальновідомій класичній теорії, уся відмінність полягає в тому, що враховується баланс енергій встановленого вітроколеса та вітрового потоку та витрат на утворення вихрових потоків кінцями крил вітроколеса.

Під час аналітичного визначення силових характеристик та характеристик потужності відповідно до загальновідомої класичної теорії ідеальне вітроколесо уявляють як колесо з нескінченно великим числом встановлених крил дуже малої ширини, вісь обертання завжди паралельна до вектору швидкості вітрового потоку, профільний опір крил завжди рівний нулю, а циркуляція уздовж крила - константа, втрачене значення швидкості вітрового потоку на вітроколесі теж є константою по всій поверхні ВЕУ, що обтікається, значення кутової швидкості прямує до безкінечності.

Уявімо рівномірний вітровий потік, що набігає на перше ідеальне вітроколесо із значенням швидкості V_0 у перерізі A_0 . Під час зустрічі ламінарного вітрового потоку з перепоною (рис. 3.1) завдяки підпору, що виникає, рівень тиск у потоці зростає від значення W_0 до значення W_1 і після проходження через переріз A_1 , у якому розташоване вітроколесо, різко падає до значення W_2 . Утворене розрядження в міру віддалення від вітроколеса прямує до нуля. Значення швидкості вітрового потоку під час наближення до вітроколеса знижується від значення V_0 до значення V_1 і після проходження перерізу A_1 досягає мінімального значення швидкості V_2 . Вітровий потік з поперечним

перерізом A_1 має кінетичну енергію, що визначається за наступною формулою:

$$P_0 = \frac{m \cdot V_0^2}{2}. \quad (3.1)$$

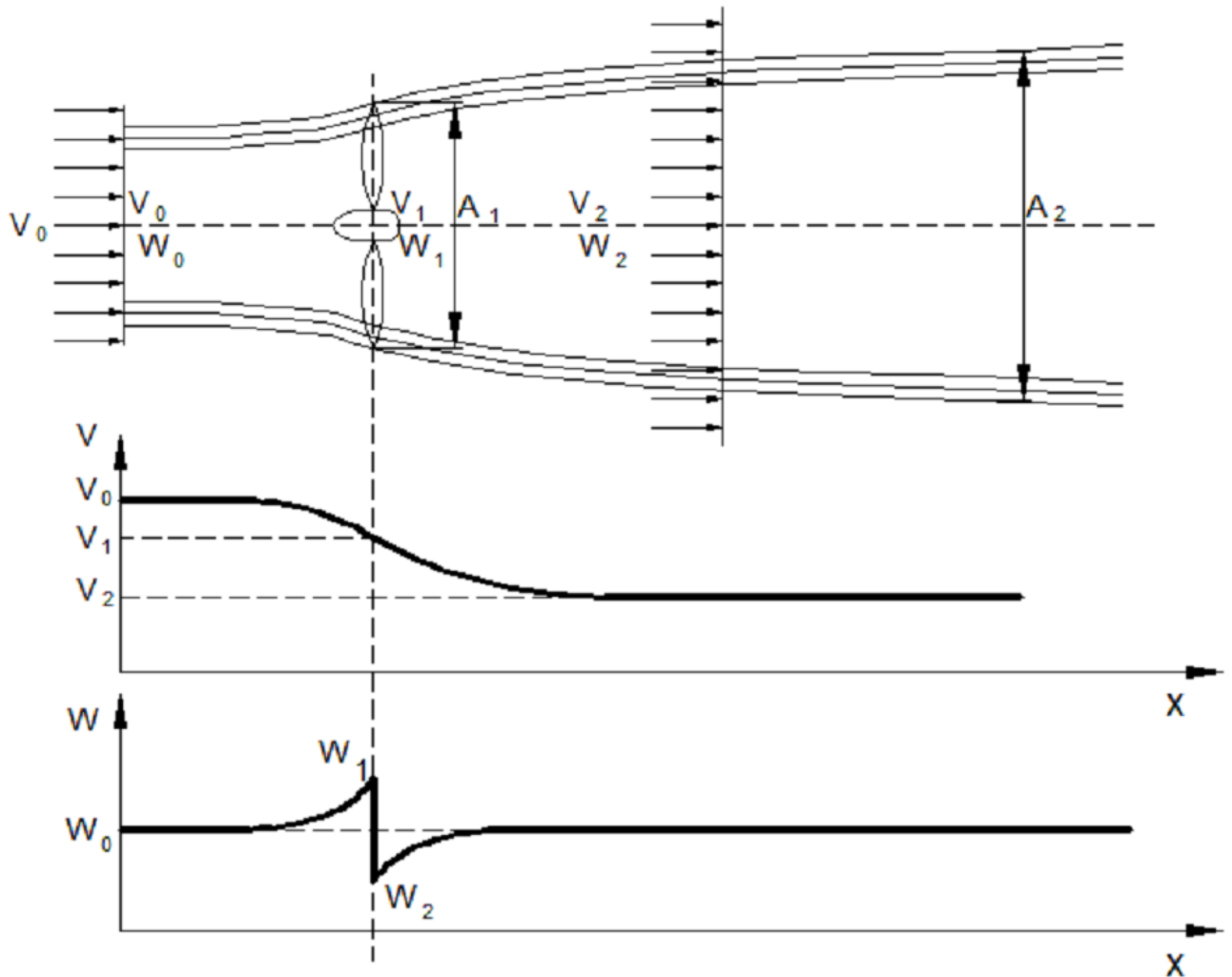


Рисунок 3.1 – Характеристики повітряного потоку, що обтікає вітроколесо

Визначимо масу вітрового потоку, що протікає через поперечний переріз A_1 зі швидкістю V_0 з наступної формули [6, 8, 16]:

$$m = \rho \cdot A_1 \cdot V_0. \quad (3.2)$$

Відповідно до загальновідомої класичної теорії потужність вітроколеса P_0 є рівною енергії вітрового потоку, що проходить через площу A_1 за одиницю часу, яку обтікає вітроколесо [6, 8, 16]:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot V_0^3. \quad (3.3)$$

Відношення секундної роботи, сприйнятої ідеальним вітроколесом, запишемо наступним чином:

$$T_1 = P_0 \cdot (V_0 - V_1), \quad (3.4)$$

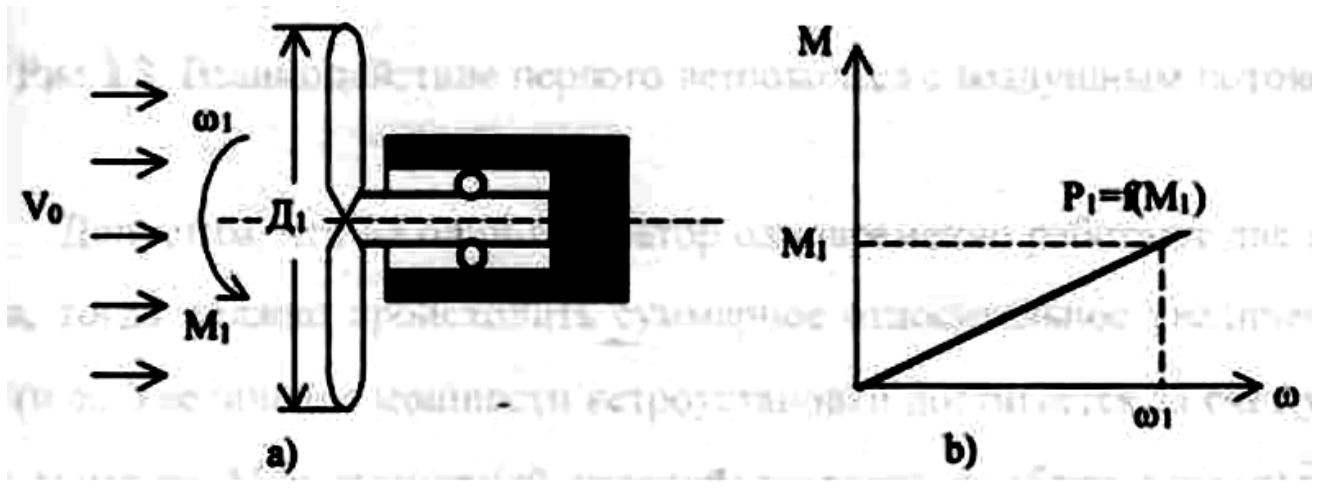
до тієї енергії вітрового потоку, яка протікає через поперечний переріз A_1 , отримаємо ідеальний коефіцієнт використання енергії вітрового потоку K_{iev} :

$$\xi = \frac{P_0 \cdot (V_0 - V_1)}{A_1 \cdot \frac{\rho \cdot V_0^3}{2}} = 2 \cdot \frac{P_0}{A_1 \cdot \rho \cdot V_0^2} \cdot \frac{V_0 - V_1}{V_0}. \quad (3.5)$$

Вираз $2 \cdot \frac{P_0}{A_1 \cdot \rho \cdot V_0^2}$ носить назву коефіцієнту навантаження на площу обтікання, коефіцієнт потужності C_p можна записати наступним чином [6, 8]:

$$C_p = \frac{2 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot (V_0 - V_1) \cdot 2 \cdot V_1}{\rho \cdot A_1 \cdot V_0^3} = \frac{4 \cdot (V_0 - V_1) \cdot V_1}{V_0^3}. \quad (3.6)$$

Позначимо $V_1/V_0 = \alpha$, після скорочень виразимо значення відносного гальмування вітрового потоку у вітроколесі через коефіцієнт гальмування α :



а) модель взаємодії вітроколеса з вітровим потоком; б) характеристика потужності вітроколеса

Рисунок 3.2 - Взаємодія першого встановленого вітроколеса ВЕУ з вітровим потоком:

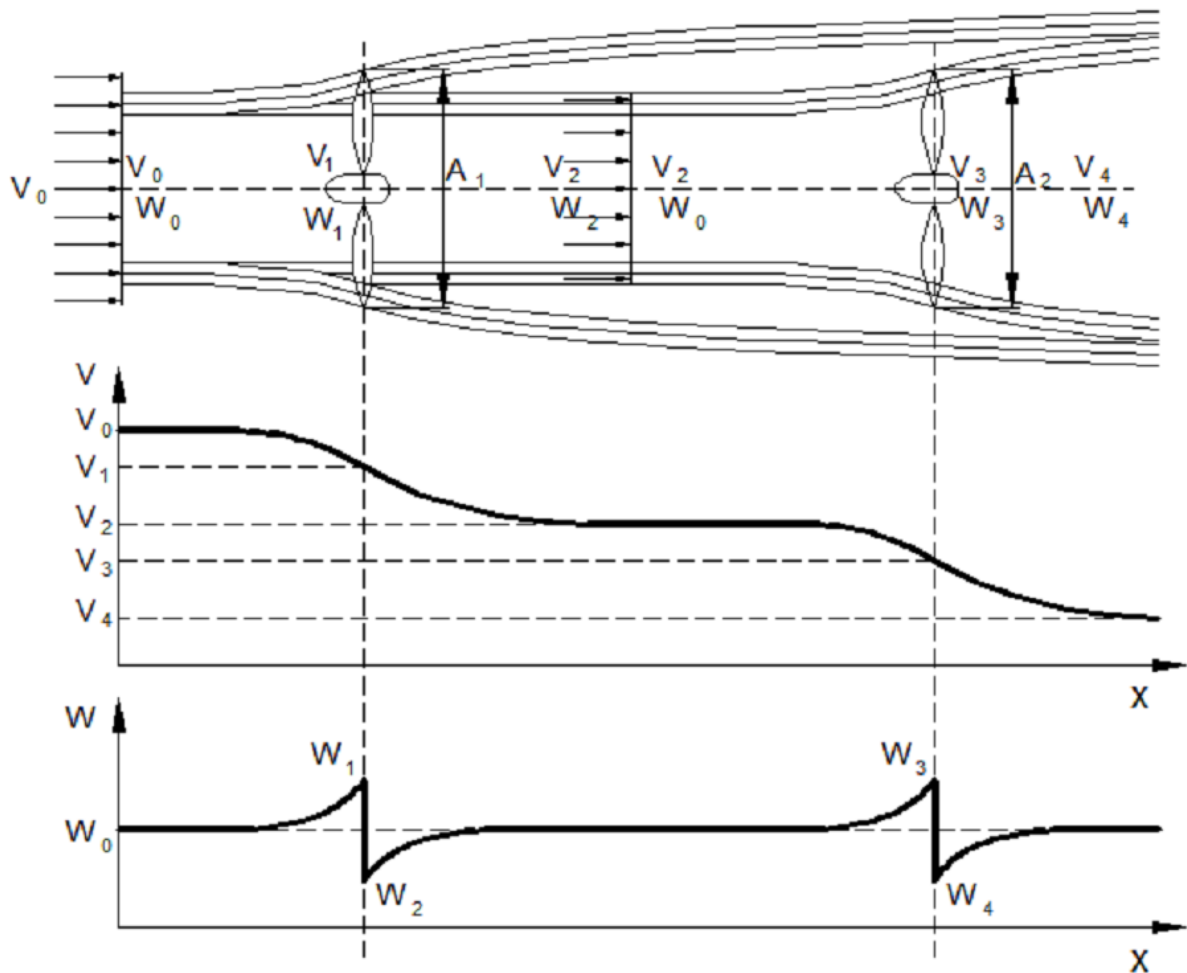


Рисунок 3.3 – Математика взаємодії вітрового потоку з двома встановленими вітровими колесами

Аналогічно потужність другого вітроколеса розглядається за формулою:

$$P_2 = \frac{\rho \cdot A_2 \cdot V_2^3 \cdot C_{p2}}{2}. \quad (3.10)$$

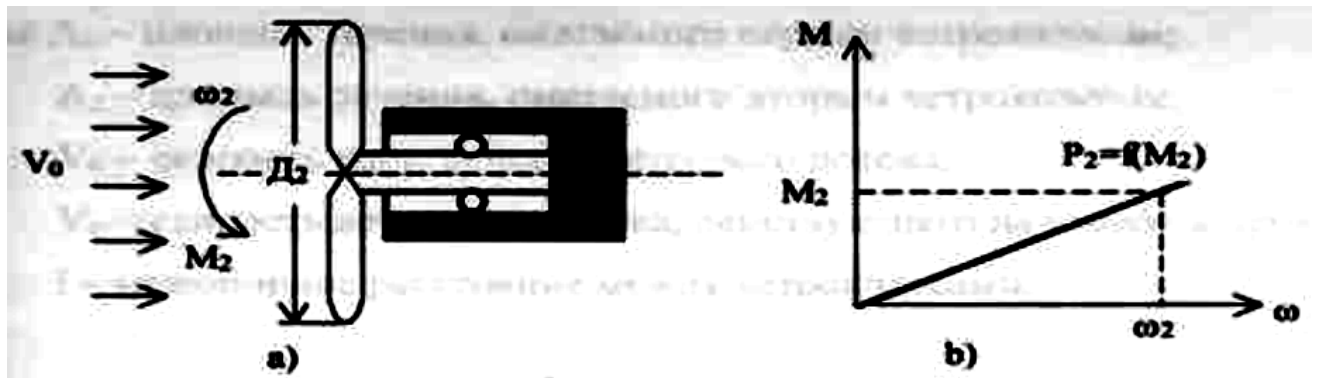
Тепер представимо, що вітровий потік після обтікання першого встановленого ідеального вітроколеса, що набігає на друге встановлене ідеальне вітроколесо зі швидкістю V_2 у перерізі A_2 . Під час зустрічі ламінарного вітрового потоку з другим встановленим вітроколесом (див. рис. 3.3), завдяки величини підпору, що виникає, рівень тиску у вітровому потоці зростає від значення W_2 до значення W_3 і після проходження через поперечний переріз A_2 , у якому встановлене друге вітроколесо різко падає до значення W_4 . Утворене розрядження в міру віддалення від встановленого вітроколеса асимптотично прямує до нульового значення. Швидкість вітрового потоку під час наближення до другого вітроколеса знижується від значення V_2 до значення V_3 і після проходження поперечного перерізу A_2 досягає свого мінімального значення V_4 .

Характеристику потужності другого встановленого вітроколеса представлено на рисунку 3.4. Таким чином, можна відмітити, що потужність ВЕУ є перемінна функція параметрів ρ, A, V, C_p [6, 8, 16]:

$$P = f(\rho, A, V, C_p) \quad (3.11)$$

Припустимо, що два встановлених вітроколеса працюють одночасно на один електричний генератор, тоді має відбуватися сумарне відносне збільшення значення кутової швидкості ω . Збільшення потужності ВЕУ може бути досягнуто за рахунок збільшення крутного моменту M і сумарної кутової швидкості ω обох встановлених вітроколес. При цьому має виконуватись наступна рівність:

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



а) модель взаємодії другого встановленого вітроколеса з вітровим потоком;

б) характеристика потужності вітроколеса

Рисунок 3.4 - Взаємодія другого встановленого вітроколеса з вітровим потоком:

$$\sum M = M_1 + M_2; \quad (3.12)$$

$$\sum \omega = \omega_1 + \omega_2. \quad (3.13)$$

Визначимо сумарну потужність з наступної формули:

$$\sum P = P_1 + P_2 = \rho \cdot V_0 \cdot \frac{\left(A_1 - A_2 \cdot \frac{V_1}{V_2} \right)}{2}. \quad (3.14)$$

Спільну роботу обох встановлених вітроколес представлено на рисунку 3.5, крім того, представлено і розрахункову модель двороторної ВЕУ.

Розрахункова схема двороторної ВЕУ (див. рис. 3.5) показує, що завдання визначення параметрів ВЕУ з контр обертянням може мати 3 варіанти вирішення [6, 8]:

1) вирішення у випадку, коли друге встановлене вітроколесо розміщено на відрізку між площинами $A_1 - A_2$ (значення швидкості вітрового потоку в такому випадку $V_1 > V > V_2$);

$$P = P_1 + P_2 = C_p' \cdot P_0' + C_p'' \cdot P_0'' \quad (3.15)$$

де P_1, P_2 - потужність першого та другого встановленого вітроколеса; C_p', C_p'' - коефіцієнти потужності незбуреного потоку, що атакує перше та друге встановлені вітроколеса; P_0', P_0'' - потужності незбуреного потоку, що атакує перше та друге встановлені вітроколеса.

Для зіставлення отриманої формули з характеристикою потужності одного встановленого вітроколеса припустимо, що площі, які обтікають обидва встановлені вітроколеса, дорівнюють ($A_1 = A_2 = A_1'$). Тоді отримуємо наступний вираз:

$$P = \frac{\rho \cdot A_1' \cdot V^3}{2} \quad (3.16)$$

Вважаючи, що обидва коефіцієнти потужності досягають свого можливого максимального значення $C_p = C_p' = C_p'' = 16/27$, визначимо найбільше можливе теоретичне значення потужності ВЕУ, що повинне бути рівним подвоєній максимальній потужності одиночного встановленого вітроколеса:

$$P_{\max} \approx 1,185 \cdot P_0' \quad (3.17)$$

Запишемо сумарну потужність, у випадку, коли друге встановлене вітроколесо розташоване в перерізі A_2 , сумарна потужність ВЕУ може бути записана наступним чином [6, 8]:

$$P = P_1 + P_2 = \left(\frac{\rho \cdot A_1 \cdot V_0^3}{2} \right) \cdot C_p' + \left(\frac{\rho \cdot A_2 \cdot V_2^3}{2} \right) \cdot C_p'' \quad (3.18)$$

Перетворимо отриману формулу (3.18), та запишемо сумарну потужність ВЕУ наступним чином:

$$P = \left(\frac{\rho \cdot A_1 \cdot V_0^3}{2} \right) \cdot \left(C_p' + C_p'' \cdot \frac{V_2^3}{V_0^3} \right). \quad (3.19)$$

Відповідно V_2 це значення швидкості вітрового потоку, що атакує друге вітроколесо.

В отриманій формулі (3.19) вираз у дужках можна розглядати як загальний коефіцієнт потужності C_p двороторної ВЕУ, що може бути представлений у наступному вигляді:

$$C_p = 4 \cdot \alpha' \cdot (1 - \alpha')^2 + (1 - 2\alpha')^3 \cdot C_p'', \quad (3.20)$$

де: α' - величина коефіцієнту гальмування першого вітроколеса.

Функція C_p досягає свого екстремуму значень при $\alpha' = 0,2$. Підставляючи отримане число в останнє найбільше значення $C_p'' = 16/27$, отримаємо значення $C_p = 0,64$. Тоді потужність буде рівна:

$$P = P_0 \cdot 0,64. \quad (3.21)$$

Аналогічне відношення було визначене раніше професором Твайделлом [6, 8, 10]. Таким чином, доцільно вважати, що максимальна теоретична потужність ВЕУ будь-якого типу лежить у діапазоні $1,185P_0 \geq P \geq 0,64P_0$ при значеннях коефіцієнта гальмування в діапазоні $0,33 \geq \alpha \geq 0,2$. Коефіцієнт $C_p = 0,64$ є нижньою границею, що забезпечує відбір потужності від вітрового потоку.

Проведемо розрахунок ідеального ВЕУ з двома встановленими вітроколесами (математична модель ідеальної ВЕУ нового типу у рамках теорії Г.Х. Сабініна [20]).

Згідно з теорією Г.Х.Сабініна [20] враховується утворення кільцевих вихорів за встановленим вітроколесом. Швидкість руху незбуреного потоку V_1 , а швидкість вітру за встановленим вітроколесом $V_0 - V_2$, вихрові кільця будуть рухатися зі значенням швидкості $V_0 - V_2/2$. Розрахуємо значення циркуляції швидкості по будь-якому контуру L згідно наступної формули:

$$\Gamma = L \cdot (V_0 - V_2) - L \cdot V_0 = -L \cdot V_2. \quad (3.22)$$

Значення циркуляції на одиницю довжини буде рівним:

$$\Gamma = \frac{-L \cdot V_2}{L} = -V_2. \quad (3.23)$$

Визначимо величину імпульсу сили для утворення вихрового кільця потоку [6, 8]:

$$Fdt = \rho \cdot S \cdot \Gamma, \quad (3.24)$$

де S - площа створеного вихрового кільця.

Якщо розділити створене вихрове кільце на елементарні кільця з протяжністю по осі вихрового кільця dz , то на одиницю довжини створеного вихрового кільця припадає $1/dz$ утворених вихрових кілець.

Визначимо імпульс сили з наступного виразу:

$$Fdt = \rho \cdot S_2 \cdot \frac{d\Gamma}{dz} dz, \quad (3.24)$$

де S_2 - площа поперечного перерізу циліндричної частини соленоїда;

$\frac{d\Gamma}{dz} = \Gamma$ - значення циркуляції швидкості на одиницю довжини.

За час dt довжина соленоїда зростає на величину:

$$dz = \left(V_0 - \frac{V_2}{2} \right) dt, \quad (3.25)$$

Звідки слідує, що:

$$F dt = -\rho \cdot S_2 \cdot V_2 \cdot \left(V_0 - \frac{V_2}{2} \right) dt. \quad (3.26)$$

Розділимо вираз (3.26) на dt та отримаємо наступний вираз:

$$F = -\rho \cdot S_2 \cdot V_2 \cdot \left(V_0 - \frac{V_2}{2} \right). \quad (3.27)$$

Перетворимо отримане рівняння та отримаємо наступне:

$$-F = \left[\rho \cdot S_2 \cdot (V_0 - V_2) \right] \cdot V_2 + \rho \cdot S_2 \cdot \frac{V_2}{2}. \quad (3.28)$$

Вираз, що стоїть у квадратній дужці (3.28), - це маса вітру m_1 , що пройшла через площу перетину за одиницю часу:

$$m_1 = \rho \cdot S_2 \cdot (V_0 - V_2). \quad (3.29)$$

Величина $m_2 = \rho \cdot S_2 \cdot \frac{V_2}{2}$ буде розглядатись в якості приєднаної маси.

Після чого рівняння (3.29) можна записати наступним чином:

$$-F = (m_1 + m_2) \cdot V_2. \quad (3.30)$$

Запишемо рівняння балансу енергії, енергія вітрового потоку, що атакує $(m_1 + m_2) \cdot \frac{V_2^2}{2}$, пішла на утворення приєднаної $\frac{m_2 \cdot V_2^2}{2}$ маси, на створення обертання вітряка (тобто сили) $F \cdot (V_0 - V_2)$ і на енергію, що несеться потоком у вигляді живої сили $(m_1 + m_2) \cdot \frac{(V_0 - V_2)^2}{2}$, тобто отримаємо наступний вираз [6, 8]:

$$(m_1 + m_2) \cdot \frac{V_2^2}{2} = F \cdot (V_0 - V_2) \cdot V_2 + (m_1 + m_2) \cdot \frac{(V_0 - V_2)^2}{2} + \frac{m_2 \cdot V_2^2}{2}. \quad (3.31)$$

Перетворивши отриманий вираз за допомогою (3.29) та (3.30) отримуємо наступне:

$$V_2 = \frac{2 \cdot V_1}{1 + \frac{V_1}{V_0}}. \quad (3.32)$$

Знайдемо значення $(m_1 + m_2)$:

$$\begin{aligned}
 (m_1 + m_2) &= \rho \cdot S_2 \cdot (V_0 - V_2) + \rho \cdot S_2 \cdot \frac{V_2^2}{2} = \\
 &= \rho \cdot S_2 \cdot \left(V_0 - \frac{V_2^2}{2} \right).
 \end{aligned}
 \tag{3.33}$$

Або

$$(m_1 + m_2) = \rho \cdot S_2 \cdot \left(\frac{V_2^2}{V_0 - V_1} \right).
 \tag{3.34}$$

Оскільки:

$$S_2 = \frac{S_1 \cdot (V_0 - V_1)}{V_0 - V_2} = \frac{S_1 \cdot (V_0 + V_1)}{V_0},
 \tag{3.35}$$

тоді отримаємо наступне

$$(m_1 + m_2) = \rho \cdot S_2 \cdot V_0.
 \tag{3.36}$$

Тоді отримаємо:

$$F = (m_1 + m_2) \cdot V_2 = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot V_2.
 \tag{3.37}$$

Коефіцієнт навантаження на поверхню обтікання буде рівним:

$$B = \frac{F}{\rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^2}{2}} = \frac{2 \cdot V_2}{V_0}.
 \tag{3.38}$$

Підставляючи значення V_2 з виразу (3.38) отримаємо наступне:

$$B = \frac{4 \cdot \frac{V_1}{V_0}}{1 + \frac{V_1}{V_0}}, \quad (3.39)$$

де відношення буде рівним:

$$\frac{V_1}{V_0} = e,$$

отже отримаємо вираз:

$$B = 4 \cdot \frac{e}{1+e}. \quad (3.40)$$

Беручи до уваги відоме рівняння (3.37), отримуємо значення лобового тиску рівним [6, 8]:

$$F = \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^2}{2} \cdot B = \rho \cdot \frac{V_0^2}{2} \cdot S_1 \cdot \frac{4 \cdot e}{1+e}. \quad (3.41)$$

Потужність на валу ВЕУ буде рівною:

$$N = F \cdot (V_0 - V_1) = \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^3}{2} \cdot 4 \cdot e \cdot \frac{1-e}{1+e}. \quad (3.42)$$

Коефіцієнт використання енергії вітрового потоку K_{iev} буде рівним:

$$K_{iev} = \xi = \frac{N}{\rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^3}{2}} = 4e \cdot \frac{1-e}{1+e}. \quad (3.43)$$

Якщо виконати прирівнювання нулю першої похідної формули (3.42), тоді ми отримаємо:

$$e = -1 + \sqrt{2} = 0,414,$$

число більше, ніж було отримано в загальновідомій класичній теорії.

Підставляючи значення e у рівняння (3.43), ми отримаємо вираз [6, 8]:

$$\xi_{\max} = 4 \cdot 0,414 \cdot \frac{1-0,414}{1+0,414} = 0,687. \quad (3.44)$$

При цьому максимальна потужність на головному валу ВЕУ буде дорівнювати:

$$N_{\max 1} = 0,687 \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^3}{2}. \quad (3.45)$$

Навантаження на поверхню, що обтікається визначимо із рівняння:

$$B = 4 \cdot \frac{0,414}{1+0,414} = 1,172. \quad (3.46)$$

Звідси ми зможемо розрахувати значення лобового тиску:

$$F_{\max} = 1,172 \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^2}{2}. \quad (3.47)$$

Запишемо аналогічні вирази для другого встановленого вітроколеса, що змонтоване зразу за першим вітроколесом.

Величина швидкості на вході другого вітроколеса буде складати:

$$V' = V_0 - V_2 = \frac{V_0 \cdot (V_0 - V_1)}{V_0 + V_1}. \quad (3.48)$$

Якщо $V' = 0,414 \cdot V_0$, то відповідно [6, 8]:

$$N_{\max 2} = 0,687 \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V'^3}{2} = 0,687 \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^3}{2} \cdot 0,414^3, \quad (3.49)$$

тобто отримаємо:

$$N_{\max 2} = 0,0485 \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^3}{2}. \quad (3.50)$$

Розрахуємо сумарну потужність з урахуванням двох встановлених вітроколес:

$$N = (0,687 + 0,0485) \cdot \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0^3}{2}. \quad (3.51)$$

Сумарний коефіцієнт буде рівним $K_{iev} = 0,735$. Таким чином, за теорією ідеального вітряка Г.Х. Сабініна [20] максимальне значення коефіцієнту K_{iev} для двороторної ВЕУ буде рівним $\xi = 0,735$.

Теоретичний внесок другого встановленого вітроколеса в коефіцієнт використання енергії вітру K_{iev} складає приблизно $73,5 - 68,7 = 4,8\%$.

Виконаємо розрахунок даних величин для двороторної ВЕУ за допомогою теорії

реального вітряка Г.Х. Сабініна [20]. Під час розрахунку реального ВЕУ буде враховано не лише силу лобового опору, а і підйомну силу (див. рис. 3.6).

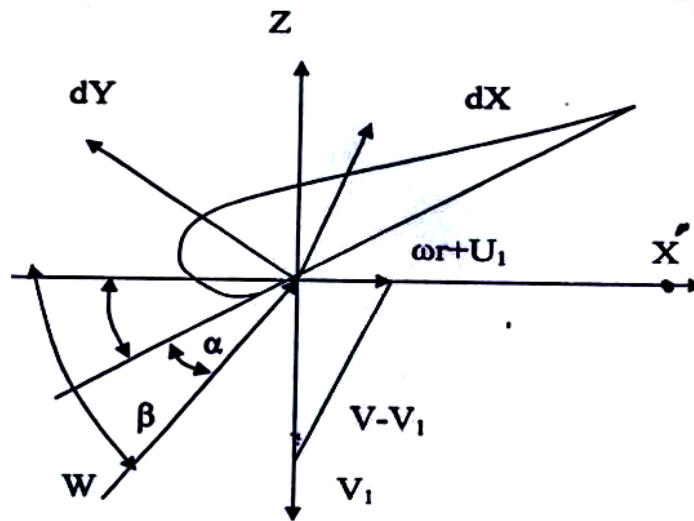


Рисунок 3.6 - План швидкостей вітрового потоку під час атаки на елемент крила

Підйомна сила викликає окружне зусилля елемента крила і дорівнює:

$$dY = C_y \cdot b \cdot dr \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}. \quad (3.52)$$

Величина сили лобового опору буде викликати опір елемента крила згідно виразу:

$$dX = C_x \cdot b \cdot dr \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}, \quad (3.53)$$

де b - ширина елемента крила по хорді; W - швидкість вітрового потоку, що атакує елемент крила, у відносному русі [6, 16]:

$$W^2 = (V_0 + V_1)^2 + (\omega \cdot r - U_1)^2. \quad (3.54)$$

Величина швидкості U_1 розраховується як реакція від крутного моменту, що розвивається крилами вітроколеса.

Якщо вітровий потік діє на елемент крила з силою dF , то й на вітровий потік діє ідентична сила, яка й передає вітровому потоку швидкість U_1 . Сила, що діє на елемент крила (див. рис. 3.7), запишеться наступним чином:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot (P_1 - P_2) = n \cdot (dY \cdot \cos \beta + dX \cdot \sin \beta), \quad (3.55)$$

де n - число крил на вітроколесі.

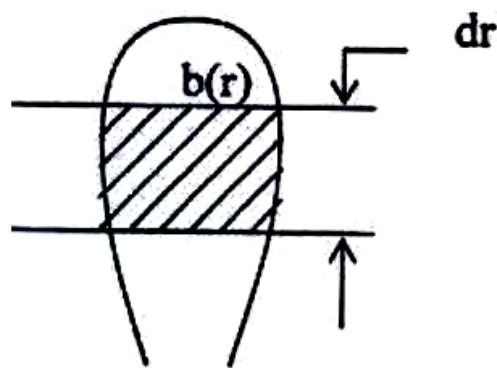


Рисунок 3.7 - Елемент крила вітроколеса

Різницю тисків можливо обрахувати поділивши силу лобового тиску на S , тобто:

$$P_1 - P_2 = \frac{F}{S} = \rho \cdot V_0 \cdot V_2. \quad (3.56)$$

Тоді, враховуючи формули (3.29) і (3.30), одержимо наступний вираз:

$$2\pi \cdot r \cdot V_0 \cdot V_2 = n \cdot b \cdot C_y \cdot \frac{W^2}{2} \cdot \cos \beta \cdot \left(1 + \frac{C_x}{C_y} \cdot \tan \beta \right). \quad (3.57)$$

Враховуючи схему (див. рис. 3.7) можливо ввести позначення, яке називають числом відносних модулів [6, 8]:

$$C \cdot \tan \beta = \frac{\omega \cdot r + U_1}{V_0 - V_1} = Z_U, \quad (3.58)$$

отже:

$$W = (V_0 - V_1) \cdot \sqrt{1 + Z_U^2}; \quad (3.59)$$

$$\sin \beta = \frac{V_0 - V_1}{W} = \frac{1}{\sqrt{1 + Z_U^2}}; \quad (3.60)$$

$$\cos \beta = \frac{\omega \cdot r + U_1}{W} = \frac{Z_U}{\sqrt{1 + Z_U^2}}. \quad (3.61)$$

Введемо в розрахунки ще одне позначення $e = \frac{V_1}{V_0}$, а $\mu = \frac{C_x}{C_y}$ це оборотне значення якості крила вітроколеса, тоді з формули (3.60) отримаємо:

$$\pi \cdot b \cdot C_y = 8 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{e}{(1+e) \cdot (1-e)^2} \cdot \frac{1}{(Z_U + \mu) \cdot \sqrt{1 + Z_U^2}}. \quad (3.62)$$

Вираз (3.62) носить назву рівняння зв'язку, за його допомогою пов'язують ширину крила та коефіцієнт підйомної сили з деформацією вітрового потоку e . Визначимо силу кручення з наступної формули [6, 8]:

$$dF_x = nb \cdot dr \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} \cdot (C_y \cdot \sin \beta + C_x \cdot \cos \beta). \quad (3.63)$$

Підставляючи в дану формули значення $W, \sin \beta, \cos \beta$, також вводимо значення μ, Z_U , отримаємо вираз:

$$dF_x = 4\pi \cdot r \cdot dr \cdot \rho \cdot \frac{e}{1+e} \cdot V^2 \cdot \frac{1-\mu \cdot Z_U}{Z_U + \mu}. \quad (3.64)$$

Визначивши момент сили кручення відносно осі ВЕУ і помноживши на значення кутової швидкості, отримаємо елементарну потужність, що розвивається площею крил вітроколеса $2\pi r dr$, тобто вираз [6, 8]:

$$dT = dM \cdot \omega = 4\pi \cdot r \cdot dr \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \rho \cdot V_0^3 \cdot \frac{1-\mu \cdot Z_U}{Z_U + \mu} \cdot Z, \quad (3.65)$$

де $Z = \frac{\omega \cdot r}{V_0}$.

Якщо поділити отриманий вираз на елементарну енергію вітрового потоку

$dT_0 = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \rho \cdot \frac{V_0^3}{2}$, то ми отримаємо наступний вираз:

$$K_{ies} = \xi = \frac{dT}{dT_0} = \frac{4e^3}{1+e_0} \cdot \frac{1-\mu \cdot Z_U}{Z_U + \mu} \cdot Z. \quad (3.66)$$

Даний коефіцієнт є функцією відстані від осі обертання r і носить назву елементарний коефіцієнт використання енергії вітрового потоку. Щоб розрахувати точне повне значення ξ , треба формулу (3.66) помножити на величину відстані від осі обертання r , і, враховуючи залежність $\mu(r)$ та $Z_U(r)$, виконати інтегрування за величиною r від r_0 до R , де r_0 і r - відповідно найменша і найбільша відстань крила від осі обертання.

Оскільки вказані функції не визначені, то скористаємося середніми значеннями даних величин.

Нехай $r = 0,6R; \alpha = 6^\circ; nb/R = 0,81; l = 0,227; C_y = 1,06; \beta = 24,3^\circ; \mu = 0,037$ [6, 8, 16].

Тоді отримаємо: $Z_U = 2,215; Z = 0,6 \cdot \omega \cdot R/V = 1,62$ і за теорією реального вітряка K_{iev} ВЕУ (з одним) встановленим вітроколесом буде рівним $\xi = 0,489 \approx 0,49$. З урахуванням можливих втрат даний коефіцієнт зростає від 0,467 до 0,487 при $e = 0,4$ і $e = 0,35$ відповідно. Якщо ми задамо Z то це автоматично визначає значення кутової швидкості $\omega = \frac{2,7 \cdot V}{R}$.

Наприклад, якщо приймемо швидкість рівною $V = 4$ тоді $R = 0,5m$ або $\omega = 21,6 \frac{1}{c}$.

Потужність, що розвивається ВЕУ, якщо можливо знехтувати малими величинами, буде рівною:

$$M = \pi \cdot R^3 \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2} \cdot \frac{4e \cdot (1-e)}{\omega \cdot R \cdot (1+e)} \cdot \left[\begin{array}{l} \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) - 2\mu \cdot \left(\frac{Z_U}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_U}\right) - \\ - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{r_0}{R}\right) \end{array} \right], \quad (3.67)$$

а величина

$$Z_U = \frac{\omega \cdot R}{V - V_1}. \quad (3.68)$$

Знайдемо значення швидкостей U_1, V_1 з наступних формул:

$$U_1 = V \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \frac{1 - \mu \cdot Z_U}{Z_U + \mu}, \quad (3.69)$$

де

$$U_2 = 2U_1; V_1 = e \cdot V = 0,227V; V_2 = 2V_1; U_1 = \frac{0,227 \cdot 0,918}{1,227 \cdot 2,252} \cdot V = 0,05 \cdot V; U_2 = 2U_1 = 0,15V.$$

Виконаємо аналогічні розрахунки для другого встановленого вітроколеса.

Величина швидкості на вході другого встановленого вітроколеса дорівнює - $V' = 0,546 \cdot V$, ($V' = V - V_2$). Швидкість U_2 допомагає обертанню, оскільки трохи збільшує кут атаки вітрового потоку на крила вітроколеса. Визначимо кут $\Delta\alpha$ на який збільшується кут атаки α (див. рис. 3.8) [1, 6, 8, 16].

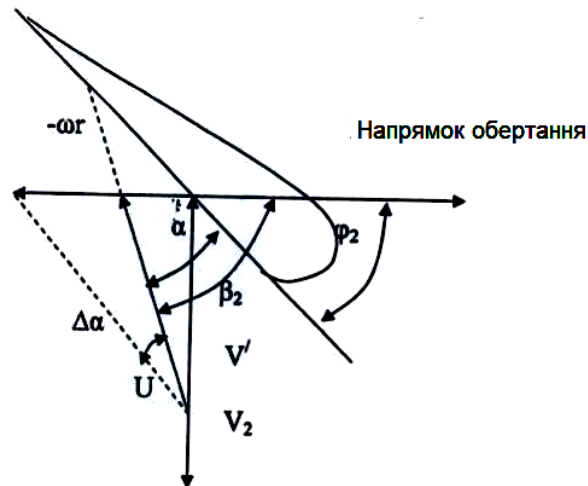


Рисунок 3.8 - План швидкостей вітрового потоку під час атаки на елемент крила другого встановленого вітроколеса

$$\frac{U_2}{\sin \Delta\alpha} = \frac{\sqrt{V'^2 + \omega^2 \cdot r^2}}{\sin \beta}. \quad (3.70)$$

Звідки:

$$\sin \Delta\alpha = \frac{U_2 \cdot \sin \beta}{\sqrt{V'^2 + \omega^2 \cdot r^2}}. \quad (3.71)$$

Якщо, як і для першого встановленого вітроколеса, врахувати, що $\frac{\omega^2 \cdot r^2}{V'^2} = 2,7$, тоді $\sin \Delta\alpha = 0,039$, а відповідно кут дорівнює - $\Delta\alpha = 2,24^\circ$. Таким чином, якщо кут атаки α для першого встановленого вітроколеса був рівним 6° , тоді при рівному куті φ у другого встановленого вітроколеса кут атаки буде рівним $8^\circ 15'$, а $C_y = 1,124$. За даних умов величина e буде знижена до діапазону $0,19 \div 0,2$.

При цьому кут $\beta = 18,3 + 8,24 = 26,5^\circ$; $Z_U = \text{ctg } \beta = 2,006$; $Z = 2,43$ тоді

$$\xi = \frac{4 \cdot 0,2}{1,2} \cdot \frac{0,886 \cdot 1,459}{2,063} \cdot 0,417$$

Даний вираз означає, що від всієї енергії вітрового потоку $\frac{m \cdot V'^2}{2}$ корисно використовується лише $0,417$.

Оскільки величина швидкості рівна $V' = 0,546 \cdot V$, то корисно використана енергія другим встановленим вітроколесом буде рівною:

$$W_{\text{кор}} = 0,546^2 \cdot 0,417 \cdot N = 0,124 \cdot N. \quad (3.72)$$

Тобто, за теорією реального вітряка, внесок другого встановленого вітроколеса в K_{iee} ВЕУ буде рівним $12,4\%$. Розрахований раніше внесок за теорією реального вітряка K_{iee} для ВЕУ буде рівним $49,0\%$.

Результуюче значення K_{iee} для двороторної конструкції ВЕУ з контр-обертанням за теорією реального вітряка визначимо із формули:

$$K_{iee} = \xi = 0,49 + 0,124 = 0,614. \quad (3.73)$$

Результати аналітичних оцінок використання енергії вітрового потоку в ВЕУ (з одним встановленим вітроколесом) та ВЕУ (з двома встановленими вітроколесами) в теорії ідеального та реального ВЕУ представлено в табличному вигляді.

Таблиця 3.1 - Аналітичні значення K_{iev} ВЕУ [6, 8]

Метод визначення	K_{iev} ВЕУ із 1 вітроколесом, %	K_{iev} ВЕУ із 2 вітроколесами, %	Вклад другого вітроколеса в K_{iev} , %
За теорією ідеального ВЕУ Г.Х.Сабніна	68,7	73,5	4,8
За теорією реального ВЕУ Г.Х.Сабніна	49,0	61,4	12,4

Аналітичні оцінки внеску другого встановленого вітроколеса у K_{iev} ВЕУ з двома встановленими вітроколесами, розраховані згідно з теоріями реального й ідеального ВЕУ Г.Х. Сабніна [20] (12,4% та 4,8 % відповідно).

3.2 Обґрунтування конструктивних значень двороторної конструкції ВЕУ з контр обертанням крил

У даному підрозділі виконаємо обґрунтування вибору раціональних значень основних конструктивних параметрів ВЕУ з контр обертанням вітроколів. Початковий вираз для загальної потужності ВЕУ, представлено у вигляді:

$$P = P_{en} \cdot K_{iev} \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{ген} = \pi \cdot R_{ек}^2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot K_{iev} \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{ген} / 2, \quad (3.74)$$

де P_{en} - потужність вітрового потоку з поперечним перерізом 1 м^2 ; K_{iev} -

коефіцієнт використання енергії вітрового потоку; $R_{вк}$ - радіус вітроколеса; V - значення швидкості вітрового потоку; $\pi = 3,14$; $\eta_{мех}, \eta_{ген}$ - відповідно к.к.д. механічної частини вітрового колеса та електричного генератора.

Частоту обертання ВЕУ визначаємо через швидкохідність та величину радіуса вітроколеса:

$$n_{вк} = 30 \cdot V \cdot \frac{Z}{\pi} \cdot R_{вк}, \quad (3.75)$$

де Z - швидкохідність.

У безредукторних конструкціях ВЕУ частота обертання вітроколеса дорівнює частоті обертання електричного генератора $\eta_{ген}$, тому з попередньої формули визначаємо радіус вітроколеса [6, 8]:

$$R_{вк} = 30 \cdot V \cdot \frac{Z}{\pi} \cdot \eta_{ген}. \quad (3.76)$$

Підставляючи даний вираз у формулу для загальної потужності, виконуючи перетворень із урахуванням того, що $\eta_{мех} = 0,97$, отримуємо наступний вираз:

$$P = 170 \cdot (Z^2 \cdot K_{iev}) \cdot (\eta_{ген} / \eta_{ген}^2) \cdot V. \quad (3.77)$$

З виразу (3.76) випливає, що потужність безредукторної конструкції ВЕУ за заданого значення швидкості визначається параметричними залежностями для вітроколес ($Z^2 K_{iev}$) та електричного генератора ($\eta_{ген} / \eta_{ген}^2$). Взаємозв'язок між величинами Z та K_{iev} було встановлено в літературі [15-17]. Аналіз даної залежності показує, що максимальне значення добутку $Z^2 K_{iev}$ спостерігається

тільки для швидкохідних конструкцій вітроколiс з аеродинамічним профiлем крил. У зв'язку з цим надалі вважаємо параметрами вітроколеса наступними: $Z = 6,75 в.о.$; $K_{iev} = 0,4 в.о.$ Аналіз розподілу повторюваності величин швидкостей вітрового потоку для різних географічних зон із середньорічною швидкістю на рівні $V_{сер} = 3 \div 8$ м/с показує, що у більшості випадків максимальна кількість енергії вітрового потоку на рік спостерігається за наступного значення швидкості:

$$V \approx 1,8V_{сер} \approx 2V_{сер}. \quad (3.78)$$

Підставляючи параметри вітроколеса $Z = 6,75 в.о.$; $K_{iev} = 0,4 в.о.$ та формулу (3.74) у формули (3.75) та (3.76) отримали аналітичні вирази для визначення параметрів безредукторних конструкцій ВЕУ:

$$P_{ном} = 10 \cdot \eta_{генном} \cdot \frac{V_{сер}}{\eta_{генном}^2}, R_{вк} = 420 \cdot \frac{V_{сер}}{\pi} \cdot \eta_{генном}. \quad (3.79)$$

Головним недоліком конструкції ВЕУ з горизонтально-осьовим вітродвигуном є те, що дані конструкції починають адекватно працювати за високих швидкостей вітрового потоку, вищих за 6 м/с, що обмежує сферу застосування таких конструкцій, адже в багатьох районах відсутні сильні вітрові потоки, які постійно течуть. Використання енергії вітрового потоку в ВЕУ даного типу описується наступною формулою потужності, [6, 8, 16]:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot D^2 \cdot K_{iev} \cdot V^3 \cdot \eta \cdot \eta_{ген} \cdot \eta_{ред}, \quad (3.80)$$

де $\rho = 1,22 кг / м^3$ - щільність вітрового потоку; D - діаметр вітроколеса, м; V - швидкість вітрового потоку, м/сек; $\eta_{ген}$ - ККД електричного генератора;

$\eta_{ред}$ - ККД мультиплікатора; K_{iev} - коефіцієнт використання енергії вітрового потоку.

Значення швидкості вітрового потоку (кубічна залежність) і діаметра вітроколеса (квадратична залежність) є факторами, що чинять максимальний вплив на величину загальної потужності ВЕУ. Відомо, що ВЕУ з великою кількістю встановлених крил менш ефективні, а збільшення діаметра вітроколеса призводить до ускладнення загальної конструкцій і зростання ціни. Використання редукторів в конструкціях ВЕУ практично не виправдане внаслідок низького значення ККД редукторів. Для більшості територій земної поверхні з низькими величинами швидкості вітрового потоку єдиним перспективним способом більш повного використання енергії вітрового потоку, є підвищення коефіцієнту - K_{iev} .

У перших аналітичних роботах з ВЕ для ідеальної конструкції ВЕУ крильчастого типу було визначено $K_{iev} = 0,593$ [6] та $K_{iev} = 0,687$ [8]. На практиці всі конструкції ВЕУ крильчастого типу, що випускаються на сучасному етапі, мають значення $K_{iev} < 0,5$; з чого випливає, що більше половини енергії вітрового потоку забирає сам вітровий потік, що поширюється за вітроколесом. Тому є пропозиція вивчити поле швидкостей за вітроколесом з метою пошуку шляхів підвищення коефіцієнту K_{iev} .

Висновки до розділу

Згідно з загальновідомою класичною теорією ідеальне вітроколесо уявляється у вигляді тонкого диска або колеса з нескінченно великим числом встановлених крил дуже малої ширини. У 1919 році Бетц з'ясував, що максимальна потужність, яка може бути отримана із вітрового потоку, складає приблизно 59% доступної енергії та досягається за коефіцієнта гальмування на рівні $\alpha = 1/3$. Під час визначення силових характеристик і характеристик потужності взаємодії вітрового потоку з крилами вітроколеса, зазвичай

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		61

використовуються загальновідома класична теорія або теорія реального колеса Г.Х. Сабініна. Практично, однороторна конструкція ВЕУ може перетворювати менше ніж 40% енергії вітрового потоку в електричну енергію. Таким чином, майже 60% потенційної енергії вітрового потоку протікає мимо, не будучи використаною. Дійсно, невикористаної енергії вітрового потоку за вітроколесом не дуже то й мало, частину даної енергії можна отримати, встановивши друге вітроколесо одразу за першим.

За допомогою теорій реального та ідеального вітряків (за Г.Х. Сабініним) не вдається пояснити отриманий ефект у вигляді підвищеного значення коефіцієнту K_{iev} ВЕУ. Таким чином, потрібно дослідити питання ефективності роботи конструкції ВЕУ з контробротанням двох встановлених вітроколес порівняно з традиційними горизонтально-осьовими ВЕУ. Крім того, за першим вітроколесом крім вітрового потоку, що проходить через його крила, є ще один вітровий потік, який створює саме вітроколесо, що працює в даному випадку як звичайний вентилятор.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		62



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд повної CAD-моделі конструкції однороторної ВЕУ

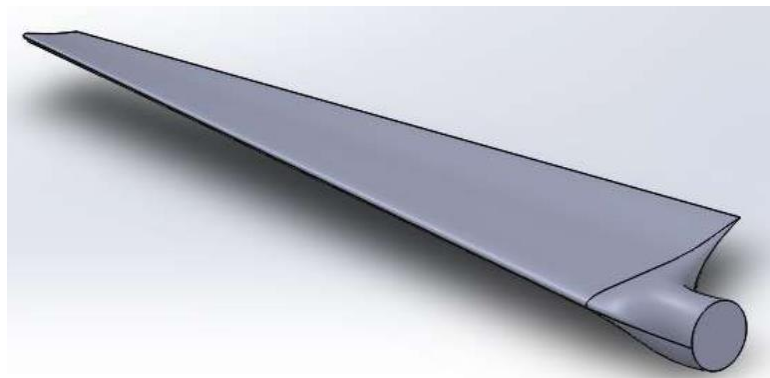


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд CAD-моделі крила ВЕУ

Двуроторна конструкція ВЕУ може бути описана як система, що складається з двох окремих вітроколів, розділених певною відстанню. Одне з вітроколів буде мати можливість обертатись за годинниковою стрілкою, а інше буде мати можливість обертатись проти годинникової стрілки, розміщені вони на одній осі. Повна твердотільна CAD-модель конструкції двуроторної ВЕУ з можливістю виконання контр обертанням крил змодельована в програмному комплексі SolidWorks 2024 [21] представлена на рис. 4.3. Було виконано моделювання 2 ВЕУ з можливістю виконання контр обертання. На рис 4.3, а

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
64

технології можливо виконати моделювання, наприклад, клапанів, двигунів внутрішнього згоряння, старту ракети, механік скидання боєприпасів, динаміку руху судна на хвилях. За необхідності, в процесі моделювання можуть одночасно використовуватися різні методи перебудови динамічної сітки. Динамічні сітки сумісні з більшістю моделей ANSYS CFD [24], включно з моделями руйнування струменя, моделями горіння, багатофазними моделями, зокрема розрахунок вільної поверхні та течії стисливої речовини. Крім того, в ANSYS CFD [24] доступні моделі ковзних сіток і множинних обертових систем координат (або MFR), які використовуються для проєктування насосів, змішувальних баків і турбомашин.

В ANSYS CFD [24] присутній найширший спектр різноманітних моделей турбулентності, що включає випробувані часом $k - \varepsilon$, $k - \omega$ та, звичайно, модель Рейнольдсових напружень (або RSM) для анізотропних або сильно закручених течій. Завдяки постійному збільшенню продуктивності ПК і зниженню вартості, моделі великих вихорів (або LES) і більш економічні моделі не приєднаного вихору (або DES) стали надзвичайно популярними під час розв'язання різних промислових завдань. Нові інноваційні моделі, що дають можливість розраховувати турбулентно-ламінальний перехід, і сучасна модель (або SAS), що автоматично визначає масштаб турбулентних вихорів, зазвичай використовуються у випадках, коли точності стаціонарних моделей турбулентності є недостатньо. Різні пристінкові функції та метод enhanced wall treatment дають змогу максимально точно описати потоки речовини, обмежені стінками.

Комплекс ANSYS CFD [24] протягом багатьох років є лідером серед програмних продуктів, що займаються CFD моделюванням обертових машин. Програмний комплекс є лідером у галузі, де вимоги до швидкості, точності та стійкості розрахунку надзвичайно високі.

ANSYS CFD [24] вдало комбінує в собі повний набір моделей, можливість наскрізного розрахунку стаціонарних чи, навіть, обертових компонентів

рідких або газоподібних. Крім того є можливість виконати моделювання бульбашкових потоків в рідині, або реактори зі зрошуваним шаром. Облік теплообміну між різними фазами також може бути аналітично врахований, це дає змогу моделювати гетерогенні та гомогенні реакції.

Модель VOF застосовується для моделювання течій із вільною поверхнею, наприклад, океанських хвиль, де поверхня розділу фаз відіграє першорядну роль. Модель дискретних фаз (або DPM) може застосовуватися для проектування розпилювачів рідкого палива, розпилювальних сушарок, безперервного волокна, вугільних топок, тощо. Модель кавітації може використовуватись під час проектування насосів і паливних форсунок [22-29].

4.2 Дослідження конструкції двороторної ВЕУ в програмному комплексі ANSYS

У кваліфікаційній роботі ми розглядаємо декілька варіантів задачі дослідження обтікання ВЕУ: традиційна конструкція ВЕУ із одним ротором, двороторна конструкція ВЕУ: діаметр першого вітроколеса однаковий із другим вітроколесом, двороторна конструкція ВЕУ із різними діаметрами вітроколес, з урахуванням невеликої відстані до землі та без урахування, за наявності схематизованої вежі ВЕУ та без вежі ВЕУ, з урахуванням обтікання вітровим потоком гондоли та без урахування.

Виконаємо весь необхідний комплекс обчислень у програмному комплексі ANSYS Fluent [30]. Створимо геометрію моделі однороторної та двороторних конструкцій ВЕУ з можливістю виконання контр обертання у CAD-редакторі ANSYS DM [25]. ANSYS DM використовується не лише для створення конструкторської геометрії яка максимально наближається до реальної, а й для створення спеціальної розрахункової сітки. Геометрія моделі традиційної конструкції ВЕУ з одним ротором у програмному комплексі ANSYS DM [25] представлена на рисунку 4.4. На рисунку 4.5 зображено двороторну конструкцію

ВЕУ із можливістю виконання контр обертання крил у програмному комплексі ANSYS DM [25] для подальшої роботи із математичною та фізичною моделями, вибору розрахункових областей та підобластей, виконання цілого циклу параметричних і методичних розрахунків.

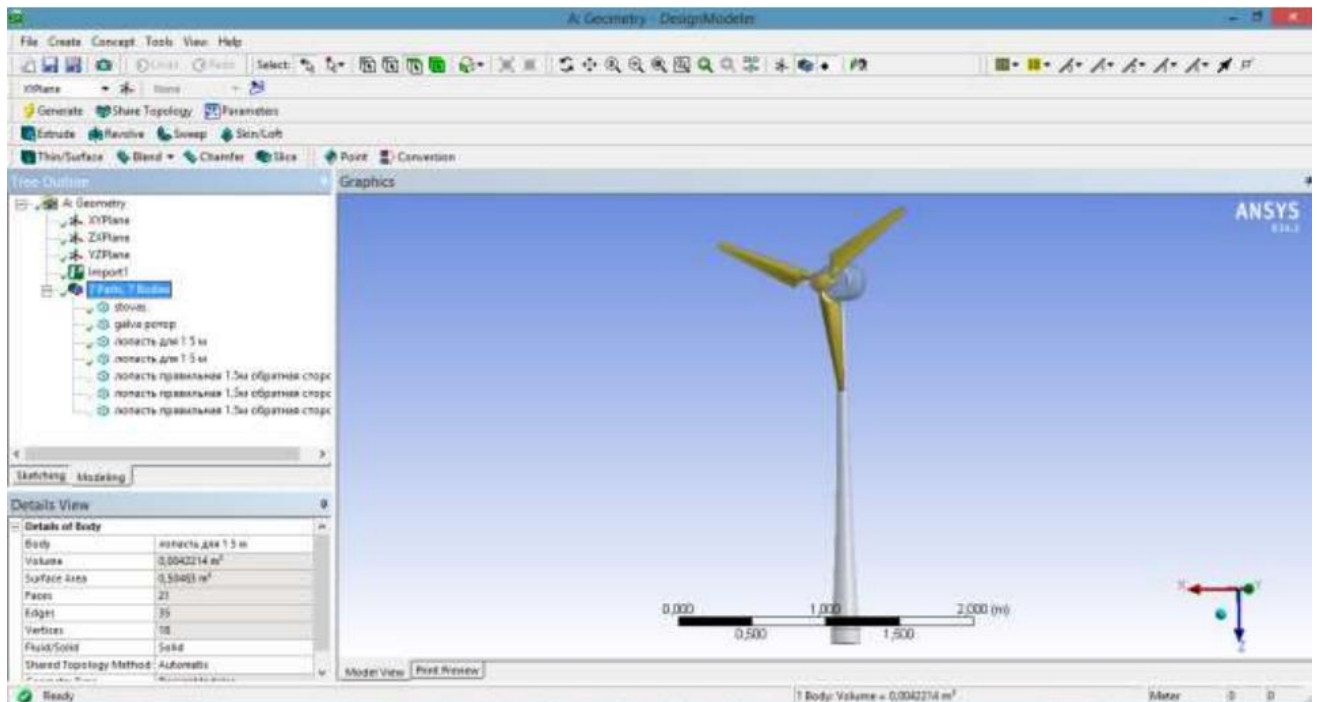
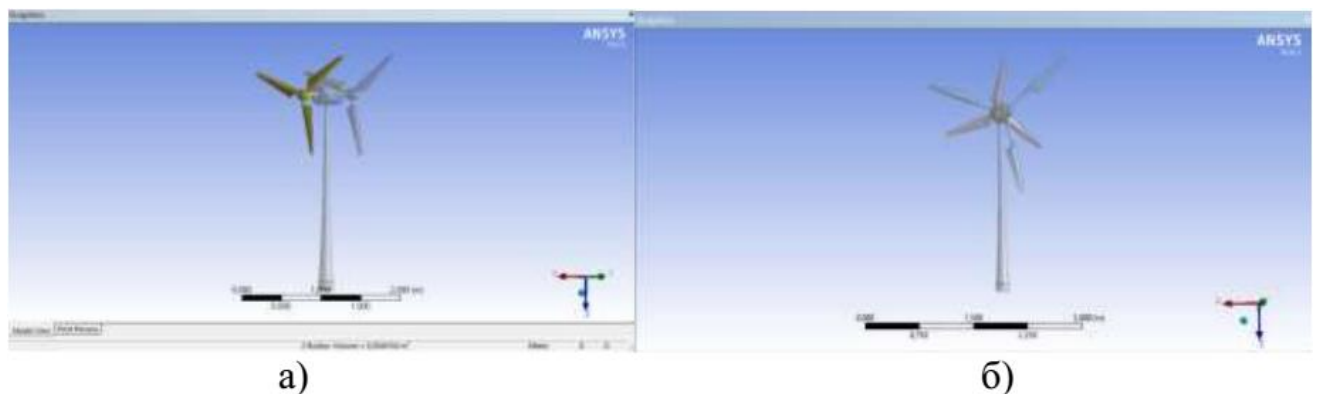


Рисунок 4.4 - Геометрія моделі традиційної конструкції ВЕУ з одним ротором у програмному комплексі ANSYS DM [25]



а) ВЕУ з однаковими діаметрами вітроколіс; б) ВЕУ з різними діаметрами вітроколіс

Рисунок 4.5 - Геометрія моделі однороторної конструкції ВЕУ в ANSYS DesignModeler [25]:

Існує достатньо велика кількість інженерних завдань, які можуть бути

довжиною твірної 100 м, що описує стаціонарний поступальний рух середовища, і внутрішні, циліндричні домени, що обертаються з постійною величиною кутової швидкості, що охоплюють крила ВЕУ, радіусами 2,3 м і довжиною твірної 0,5 м (рис. 4.6-4.7).

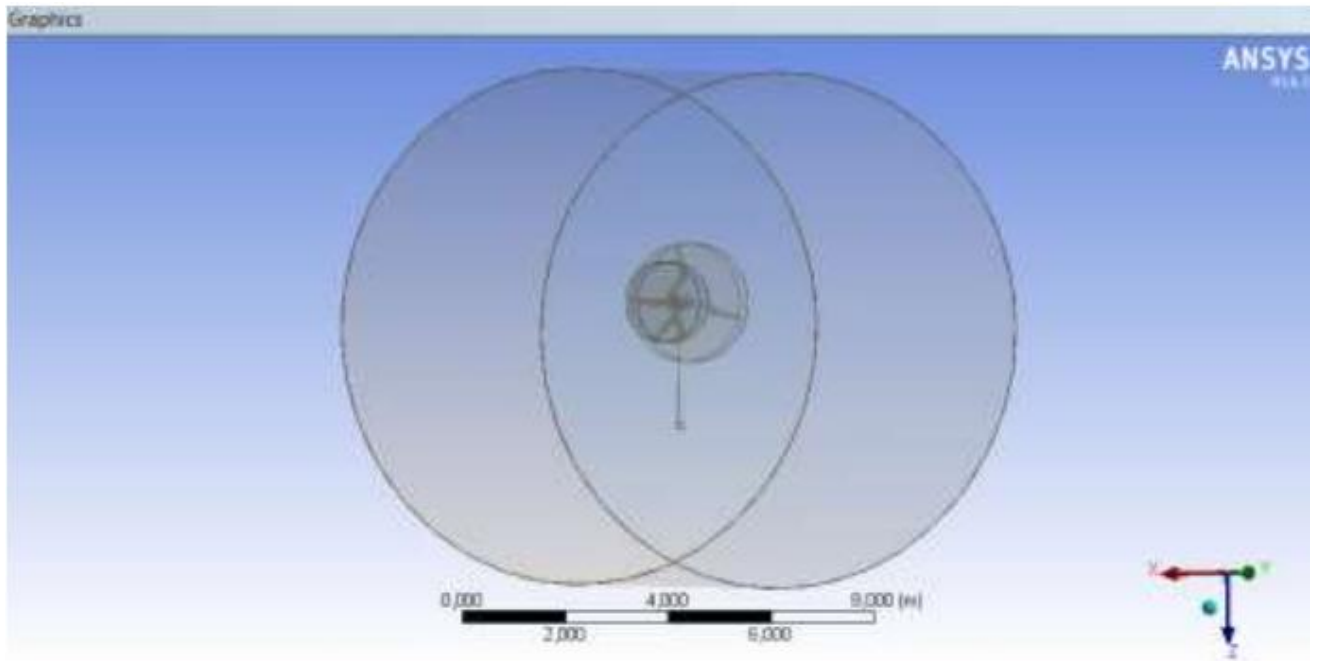


Рисунок 4.6 – Загальний вигляд розрахункової області для двороторної конструкції ВЕУ

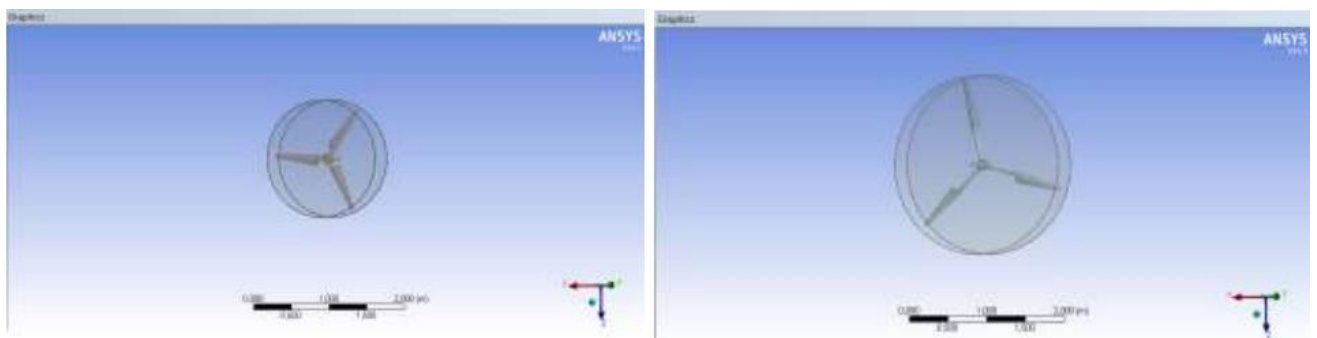


Рисунок 4.7 – Загальний вигляд спеціальних доменів вітроколеса ВЕУ, що обертаються

Оскільки вітроколесо оснащено однаковими трьома крилами, будемо виконувати всі наступні розрахунки для одного крила вітроколеса ВЕУ з одним ротором (рис. 4.8) і з одним крилом в кожного вітроколеса двороторної конструкції ВЕУ з можливістю виконання контробротання (рис. 4.9-4.10), при

цьому вкажемо величини періодичності вхідної та вихідної грані. Було виконано серії спеціальних аналітичних розрахунків, які дали можливість виконати формування топології, форму і розміри розрахункової області для конструкцій ВЕУ, які найбільше відповідають цілям виконаного комп'ютерного дослідження.

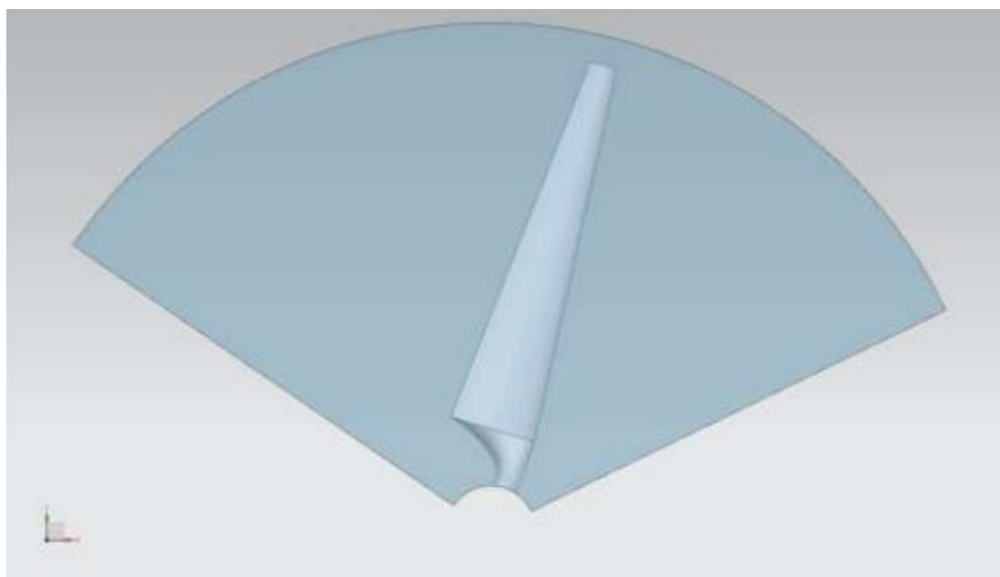


Рисунок 4.8 – Загальний вигляд спеціального розрахункового домену вітроколеса з меншим діаметром

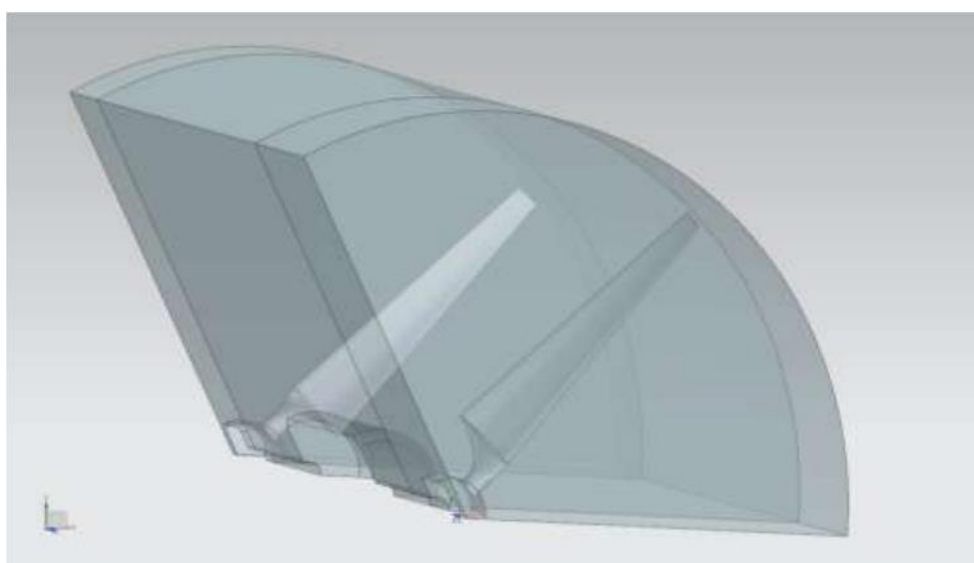


Рисунок 4.9 – Загальний вигляд спеціального розрахункового домену двох вітроколіс з однаковими діаметрами

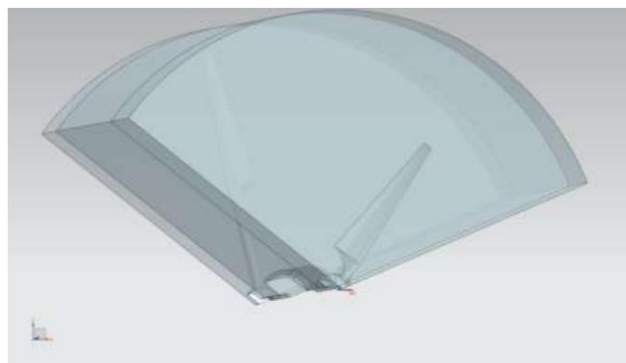


Рисунок 4.10 – Загальний вигляд спеціального розрахункового домену двох вітроколів із різними діаметрами

Створення спеціальної розрахункової сітки виконувалось в напівавтоматичному режимі в ANSYS Meshing [26]. ANSYS Meshing [26] є препроцесором середовища ANSYS Fluent [30] для генерації розрахункової сітки і дає змогу витягти геометрію спеціальної розрахункової області для виконання CFD аналізу з твердотільної CAD-збірки й автоматично побудувати спеціальну сітку з призматичними шарами на стінках. Було автоматично згенеровано тривимірну гібридну сітку з призматичними шарами в областях приграничного шару на твердих поверхнях загальним об'ємом 8,9 млн. комірок (з них 7,5 млн. в спеціальному обертовому домені і 1,4 млн. у зовнішньому нерухомому домені). Фрагмент сітки на поверхнях крил вітроколів, головних валів наведено на рис. 4.11-4.13.

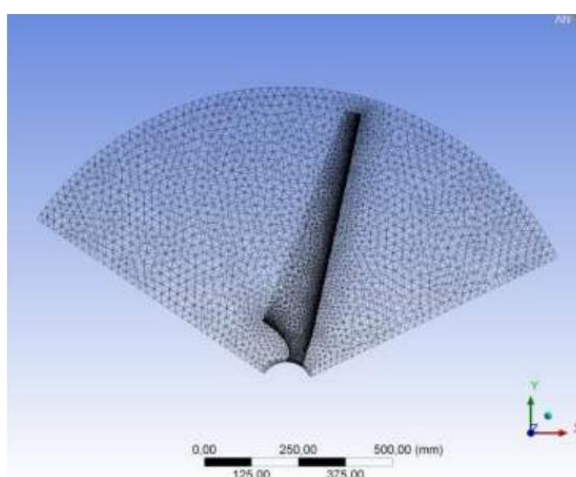


Рисунок 4.11 – Вигляд фрагменту розрахункової сітки на поверхні вітроколеса з меншим діаметром

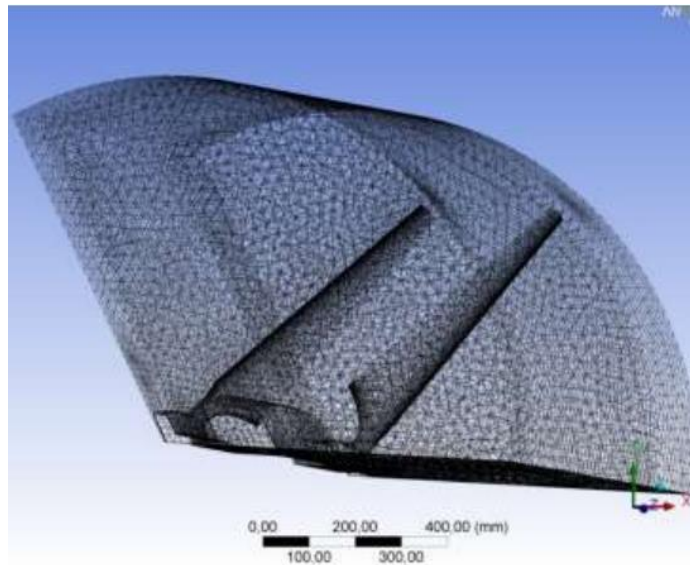


Рисунок 4.12 – Вигляд фрагменту розрахункової сітки на поверхні двох вітроколів із однаковими діаметрами

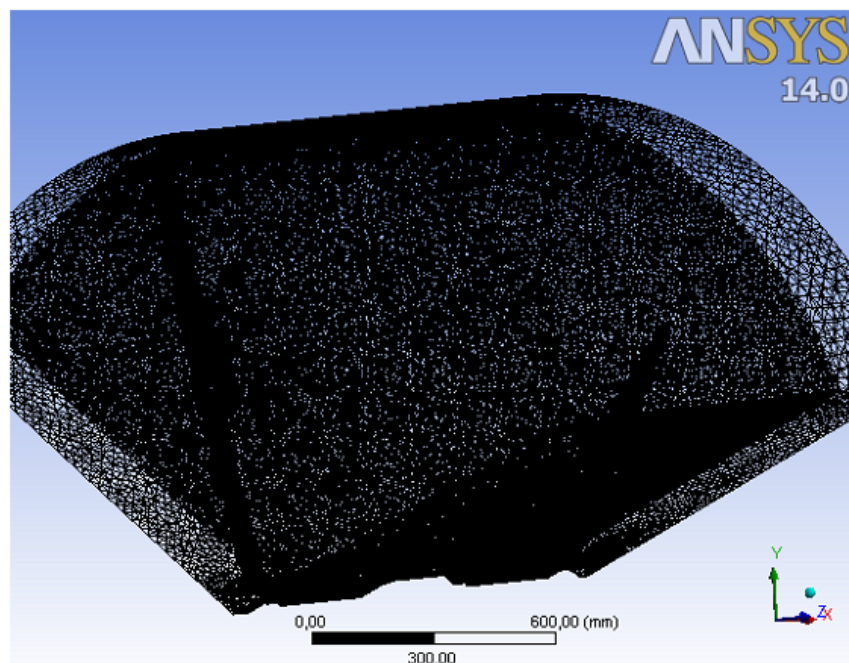


Рисунок 4.13 – Вигляд фрагменту розрахункової сітки на поверхні двох вітроколів із різними діаметрами

Одна із головних переваг ANSYS Workbench [23] є можливість передачі даних між досить широким набором систем інженерного аналізу, що входять до складу програмного пакета ANSYS. Модель конструкції, побудована в ANSYS Workbench [23] може також використовуватися для computational fluid dynamics розрахунку (або CFD) за допомогою програми ANSYS Fluent [30].

переходу дають можливість спрогнозувати можливі зміни режимів у приграничному шарі речовини. Налаштовуємо проєкт в ANSYS Fluent [30], для адаптації під поставлене технічне завдання. Для підвищення ефективності обчислень ANSYS Fluent [30] дає можливість виконати автоматизацію процесу проведення аналітичних розрахунків для різних параметрів проєкту без використання додаткового програмування. Експериментальні дослідження проводили для трьох значень швидкості вітрового потоку, відповідно для 3,5,7 м/с. Для обміну потоками на границях обертового та нерухомого доменів використовували стандартні інтерфейси програмного забезпечення «Stage» та «Frozen Rotor», водночас перший сектор із обертовою рамкою, другий сектор статичний, третій сектор теж обертовий, але в протилежному напрямі.

Час розрахунку одного режиму обтікання конструкції ВЕУ (фіксовані значення швидкості вітрового потоку та числа обертів ротора) становить у середньому 30 годин (у стаціонарній постановці).

Далі провели серію комп'ютерних досліджень для однороторної конструкції ВЕУ (рис. 4.14) і для двороторних конструкцій ВЕУ з можливістю виконання контр обертанням (рис. 4.15), що дають змогу виявити основні закономірності обтікання конструкцій ВЕУ з одним ротором та з двома роторами з можливістю виконання контр обертання і характерні особливості течії вітрового потоку.

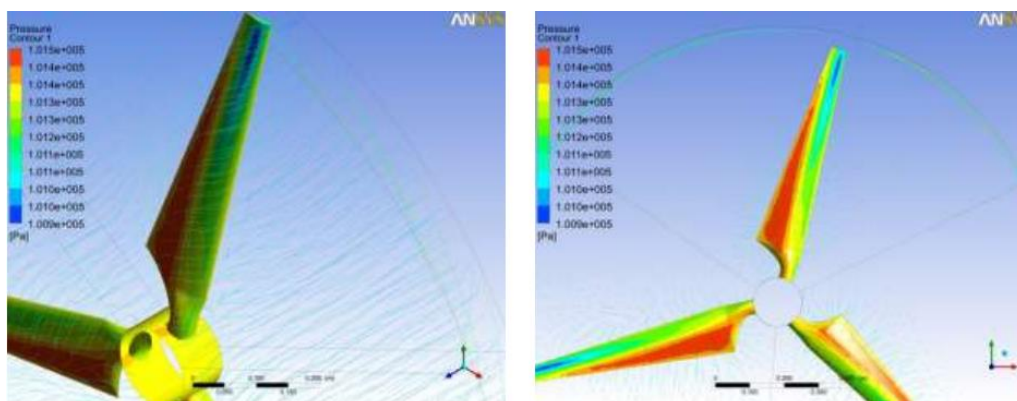


Рисунок 4.14 – Загальний вигляд площини на виході з обертової розрахункової області за крилами однороторної конструкції ВЕУ

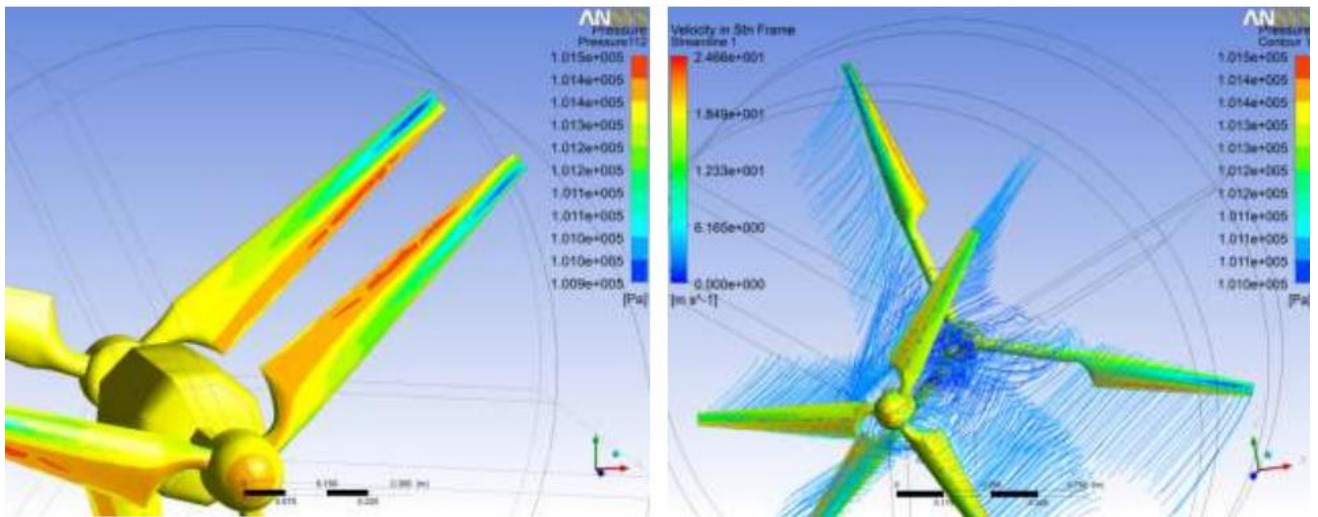


Рисунок 4.15 - Загальний вигляд площини на виході з обертової розрахункової області за крилами двороторної конструкції ВЕУ

За результатами експериментальних досліджень в програмному комплексі ANSYS згідно циклів методичних і параметричних розрахунків, результати записано в табличному вигляді в залежності для крутного моменту та механічної потужності (див. додатки).

За табличними даними (див. Додаток А) ми побудували графічні залежності моментних характеристик та характеристик потужності конструкцій ВЕУ від зміни швидкості вітрового потоку.

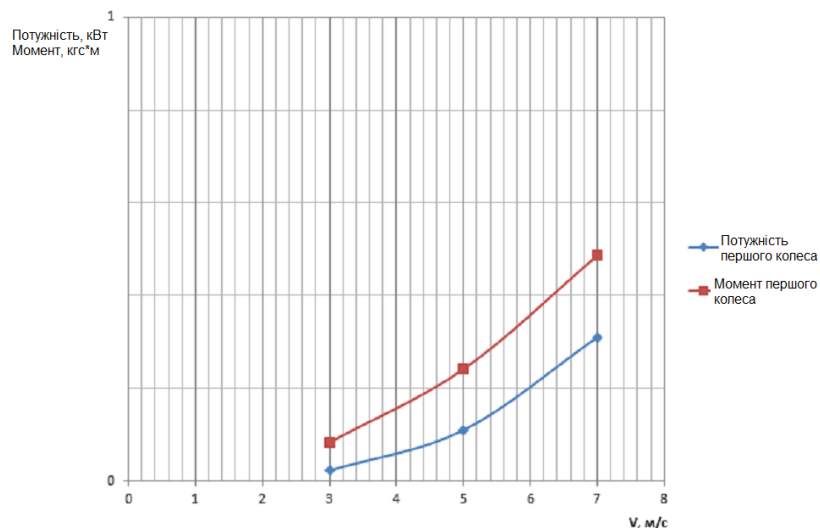


Рисунок 4.16 – Графічні залежності потужності і крутного моменту для однороторної конструкції ВЕУ

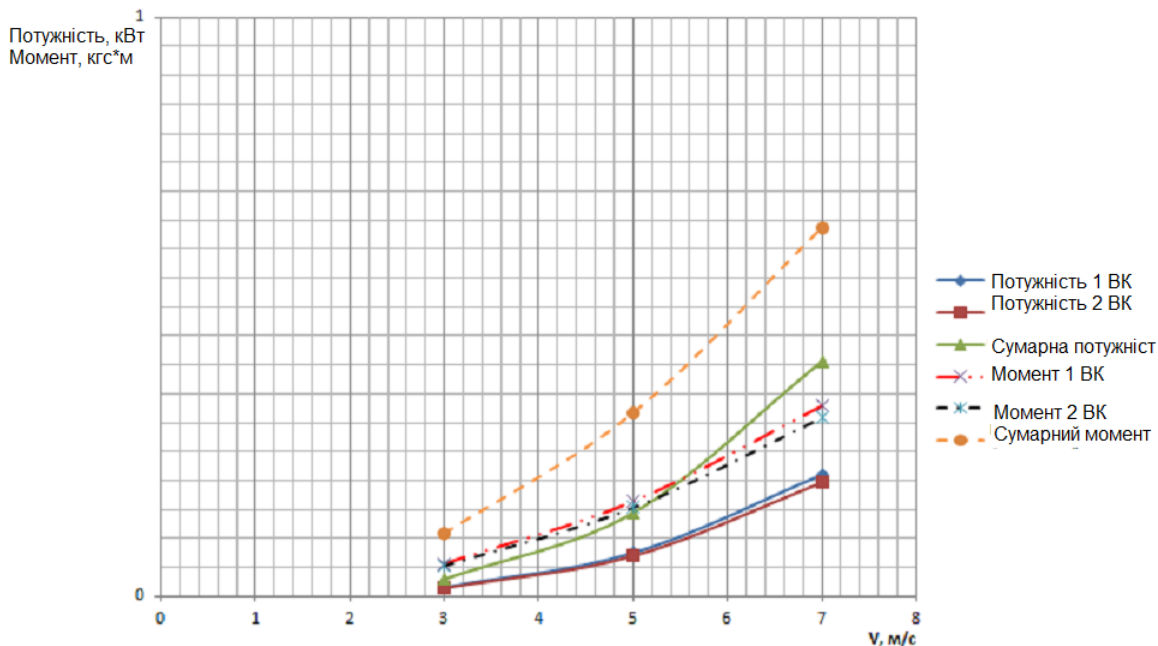


Рисунок 4.17 - Графічні залежності потужності і крутного моменту для двороторної конструкції ВЕУ з можливістю контр обертання, однакових за діаметром крил

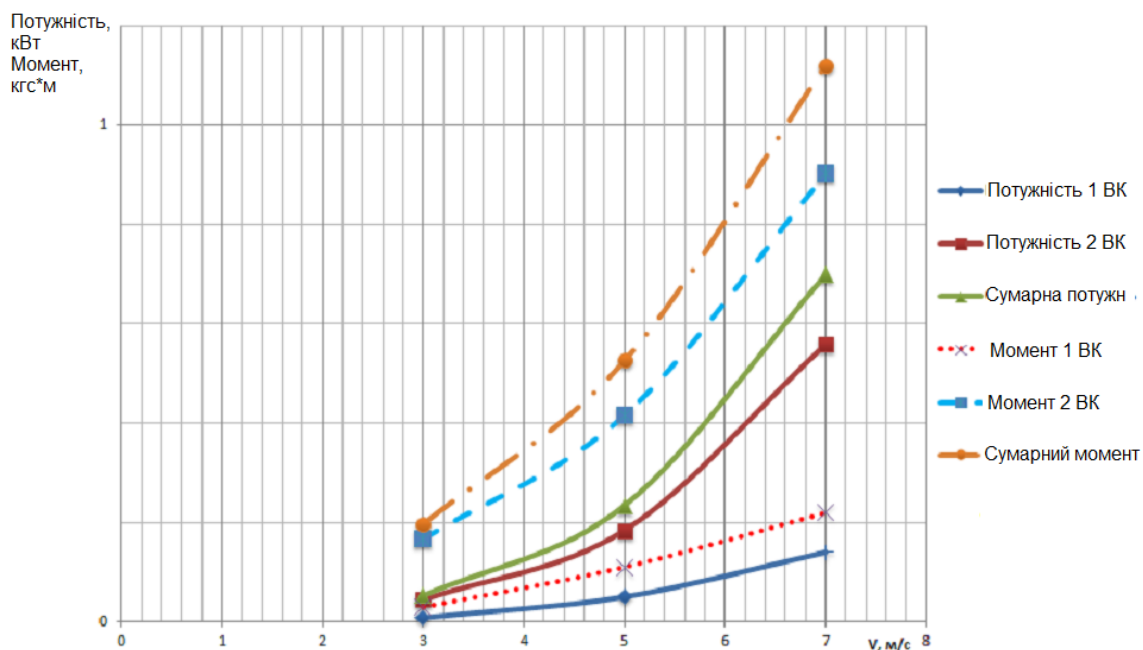


Рисунок 4.18 - Графічні залежності потужності і крутного моменту для двороторної конструкції ВЕУ з можливістю контр обертання, однакові за діаметром крила

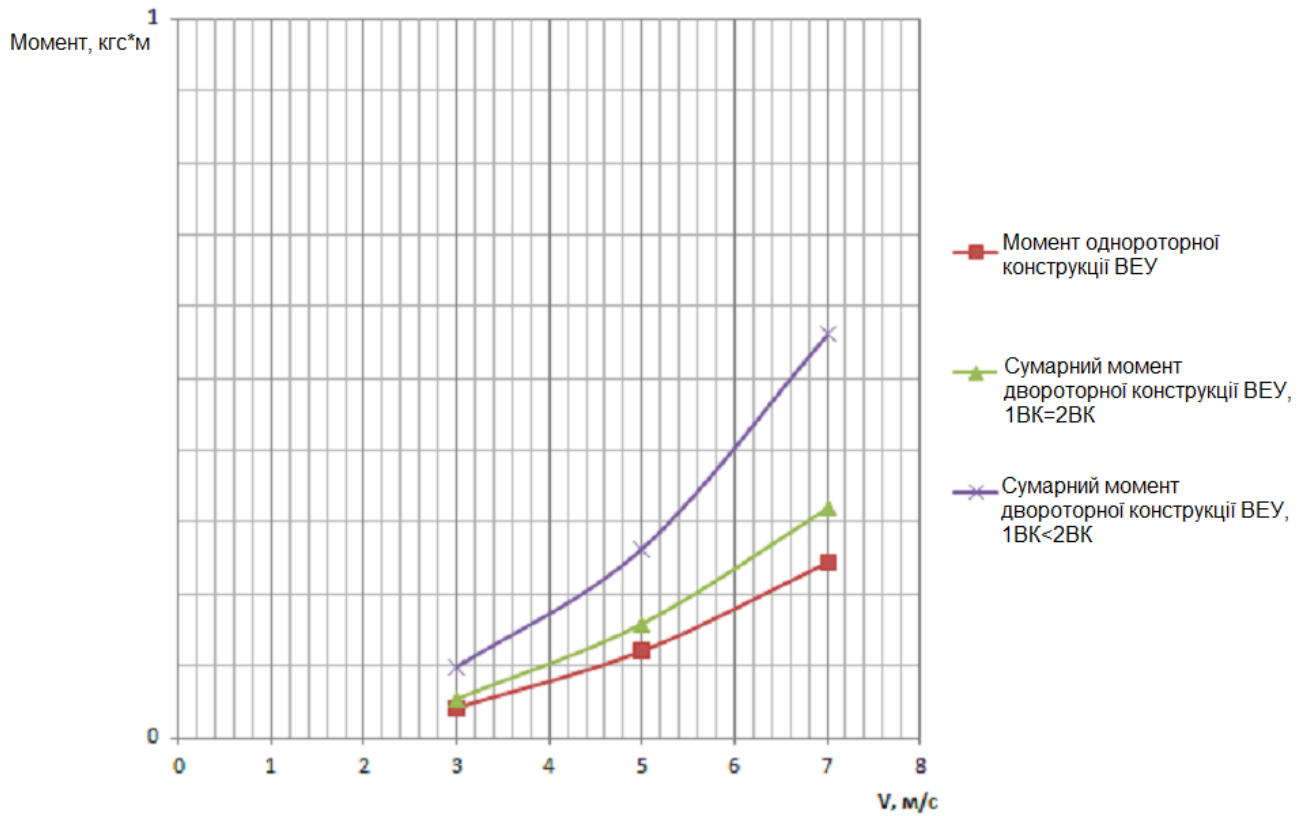


Рисунок 4.19 - Графічні залежності порівняння сумарних крутних моментів конструкцій ВЕУ

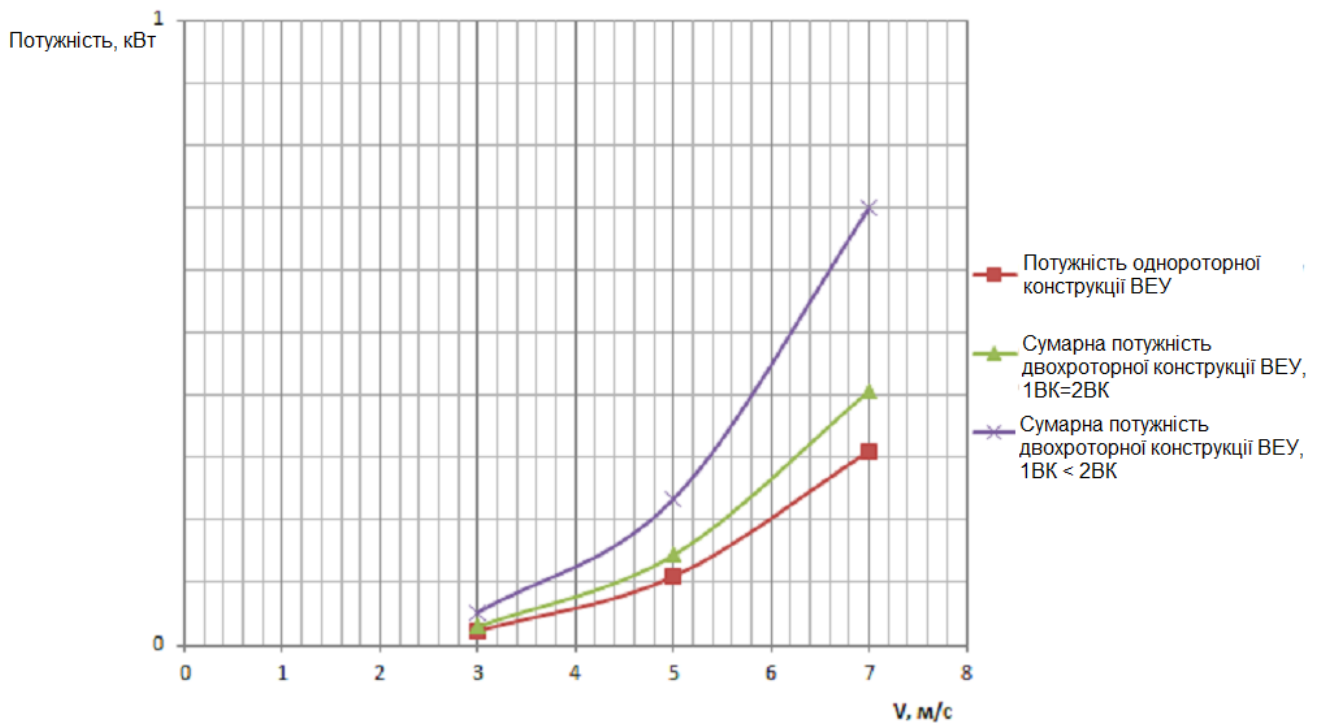


Рисунок 4.20 - Графічні залежності порівняння сумарних потужностей моделей конструкцій ВЕУ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.
80

Коефіцієнт використання енергії вітру, визначаємо з наступного відношення:

$$\xi = \frac{P_{BT}}{P_p} = \frac{M_{BT} \cdot \omega}{0,5 \cdot S_{обт} \cdot \rho \cdot V^3}$$

Результати обрахунку зведемо до табличного вигляду.

Таблиця 4.1 - Результати K_{iee} ВЕУ при дослідженні в програмному комплексі ANSYS [22]

Метод дослідження	K_{iee} ВЕУ при швидкості 3 м/с,%	K_{iee} ВЕУ при швидкості 5 м/с,%	K_{iee} ВЕУ при швидкості 7 м/с,%
Однороторна конструкція ВЕУ	39,1	40,7	42,0
Двороторна конструкція ВЕУ, 1ВК = 2ВК	52,2	53,8	55,1
Двороторна конструкція ВЕУ, 1ВК < 2ВК	41,1	42,5	44,5

На рисунку 4.21 представлено залежність K_{iee} при зміні швидкості вітрового потоку, для трьох варіантів дослідження конструкцій ВЕУ.

У таблиці 4.1 представлено результати розрахунків коефіцієнту K_{iee} , виконані згідно із запропонованими моделями конструкцій ВЕУ. Відповідно до графічних залежностей (рис. 4.21) і табличних даних, очевидно, що коефіцієнт використання енергії вітрового потоку в двороторній конструкції ВЕУ з можливістю виконання контробротання за різних діаметрів встановлених вітроколів вищий, ніж коефіцієнт K_{iee} однороторної конструкції ВЕУ

стандартного типу, але поступається за характеристиками двороторній конструкції ВЕУ із можливістю виконання контр обертання за однакових діаметрів встановлених вітроколів.

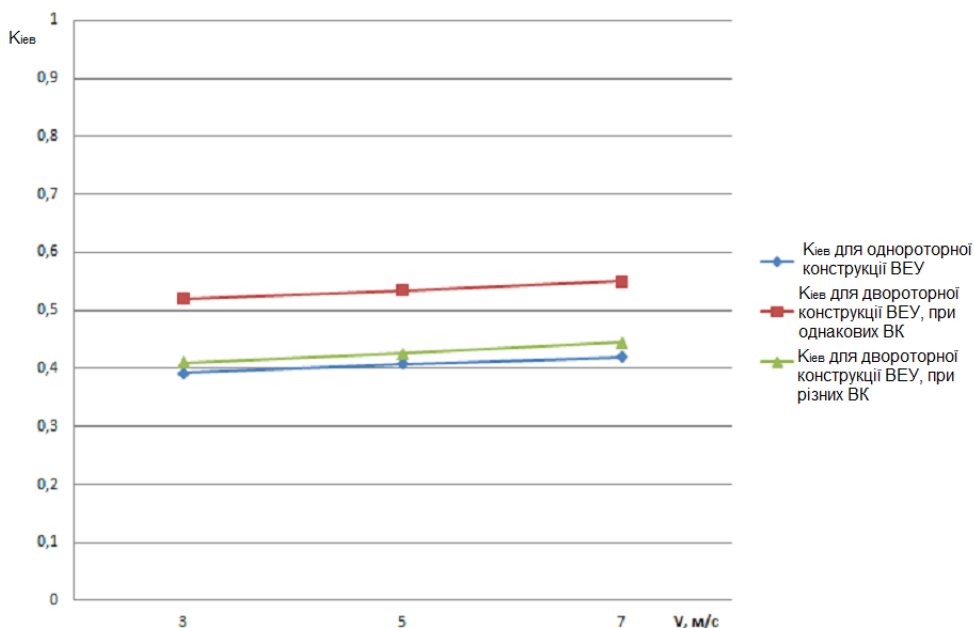


Рисунок 4.21 - Графічні залежності зміни коефіцієнту K_{iev} при зміні швидкості вітрового потоку

Модель двороторної конструкції ВЕУ з можливістю виконання контр обертання при однакових діаметрах встановлених вітроколів є більш ефектною конструкцією в порівнянні з першим і третім варіантами моделювання. Внесок другого встановленого колеса в конструкцію ВЕУ з можливістю виконання контр обертання, при однакових діаметрах встановлених вітроколів в коефіцієнт K_{iev} , згідно з розробленою моделлю складає 13,1 %.

Висновки до розділу

Внесок другого встановленого вітроколеса в конструкції ВЕУ з можливістю виконання контр обертання, при однакових діаметрах встановлених вітроколів в коефіцієнт K_{iev} , згідно з розробленою моделлю складає 13%. Розроблена модель конструкції ВЕУ з можливістю виконання контр обертання

показує кращі наближення до аналітичних результатів. Згідно з результатами можна суттєво підвищити ефективність роботи конструкції ВЕУ, використовуючи двороторну установку з можливістю виконання контр обертання крил. Така модель починає досить ефективно працювати при низьких швидкостях вітрового потоку, що дає можливість трохи розширити рентабельність ВЕУ для електропостачання приватних будинків, окремих ферм або господарств, які розташовані у віддаленні від вже прокладених високовольтних ліній електропередачі.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		83

Висновки

Актуальність вибору як об'єкта дослідження конструкції ВЕУ малої потужності з горизонтальною віссю обертання, визначається перспективністю даних конструкцій до вдосконалення в силу досить високого попиту на світовому ринку, простотою використання енергії вітрового потоку, достатнім коефіцієнтом використання енергії вітрового потоку, простотою і надійністю монтажу, експлуатації та можливого ремонту, доступними для користувачів, які не мають доступу до централізованої загальної мережі електропостачання. Так як однороторна конструкція ВЕУ пропускає досить багато вітрового потоку, а отже і енергії вітрового потоку, частину даної енергії можливо буде отримати через монтаж другого вітроколеса слідом за першим (двороторна конструкція ВЕУ з можливістю виконання контр обертання).

Представлена модель конструкції двороторної ВЕУ в програмі SolidWorks 2024, може бути описана як система, що складається з двох встановлених на одній осі вітроколес, розділених необхідною відстанню, одне вітроколесо обертається за годинниковою стрілкою, а інше - проти годинникової стрілки.

Розроблено методику комп'ютерного моделювання роботи та розрахунок обтікання, розрахунок головних аеродинамічних сил і моментів, що можуть виникати на однороторній і двороторній конструкціях ВЕУ під час обтікання вітровим потоком у програмному комплексі ANSYS. Під час комп'ютерного моделювання конструкцій ВЕУ розглянуто декілька варіантів моделювання: а) стандартна конструкція ВЕУ з одним ротором; б) двороторна конструкція ВЕУ: вітроколеса однакові за розміром діаметру; в) двороторна конструкція ВЕУ з встановленими різними за діаметром вітроколесами. За результатами проведеного моделювання в програмному комплексі ANSYS, було порівняно отримані дані однороторної конструкції ВЕУ та двороторної конструкції ВЕУ з можливістю контр обертання. За результатами порівняння визначили, що внесок другого встановленого вітроколеса в коефіцієнт K_{iev} згідно із розробленою

					<i>MPMA 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		84

моделлю конструкції з однаковими вітроколесами складає 13,1%. Теоретична оцінка внеску в коефіцієнт K_{iev} конструкції ВЕУ з двома встановленими вітроколесами, отримані відповідно до теорій реального та ідеального вітряків Г.Х. Сабініна, складає 12,4% та 4,8% відповідно.

Запропонована модель конструкції починає досить ефективно працювати за низьких швидкостей вітрового потоку, що дає можливість розширити рентабельність ВЕУ для електропостачання приватних будинків, окремих ферм або господарств, які знаходяться на відстані від вже встановлених високовольтних ліній електропередачі.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		85

ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-turbogrid>

30. Ansys Fluent. Fluid Simulation Software. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		89

Додатки

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						90
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		