

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

_____ Віктор СИНЕГЛАЗОВ

“ ____ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
“МАГІСТР”

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»

Тема: «Автоматизована інтелектуальна система проектування вітроенергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором»

Виконавець: студент групи КП-226М Станіславчук Олександр Валентинович

Керівник: доктор технічних наук, професор Синеглазов Віктор Михайлович

Консультант розділу

«Охорона навколишнього середовища» _____ Ольховик Ю.О.
(підпис)

Консультант розділу

«Охорона праці» _____ Кульбаба К.П.
(підпис)

Нормоконтролер: _____ Філяшкін М.К.
(підпис)

Київ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор СИНЄГЛАЗОВ
“ _____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи студента

Станіславчук Олександр Валентинович

1. Тема роботи: «Автоматизована інтелектуальна система проектування вітроенергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором»

2. Термін виконання роботи: з _____ 2023 р. до _____ 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи:

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці): 1. Відновлювальні джерела енергії, як майбутнє світової енергетики. 2. Проблеми побудови інтелектуальної системи проектування вітроенергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором. 3. Інструменти дизайну та оптимізації лопатей вітроенергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором. 4. Багатооб'єктивна оптимізація ВЕУ.

5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу: 1. Загальна блок-схема САПР; 2. Загальна схема проектування роторів. 3. Структурна схема САПР; 4. Алгоритм роботи САПР; 5. Результати досліджень синтезованих контурів управління.

6. Календарний план-графік:

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Аналіз літературних джерел	22.05.2023	
2.	Збір інформації	23.05. 2023	
3.	Необхідність використовувати відновлювальні джерела в Україні	24.05.2023- 25.05.2023	
4.	Вітроенергетичні установки з гібридним ротором обертання та їх переваги	26.05.2023 – 27.05.2023	
5.	Проблеми побудови інтелектуальної системи проектування вітроенергетичних установок	28.05.2023 – 29.05.2023	
6.	Математичні моделі задач оптимізації ВЕУ	30.05.2023	
7.	Розробка структури і алгоритмів САПР вітроенергетичних установок	31.05.2023 – 02.06.2023	
8.	Розробка математичної моделі для проектування ВЕУ	03.06.2023 – 06.06.2023	
9.	Охорона праці	12.06.2023	
10.	Охорона навколишнього середовища	12.06.2023	
11.	Висновки по роботі	12.06.2023	
12.	Оформлення пояснювальної записки	13.06.2023	
13.	Створення презентації	14.06.2023	

7. Консультанти з окремих розділів роботи: (Для магістерської роботи)

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Старший викладач Кульбаба К.П.		
Охорона навколишнього середовища	Канд. біолог. наук, доцент Ольховик Ю.О		

8. Дата видачі завдання _____

Керівник: _____ Синєглазов В.М.

Завдання прийняв до виконання _____ Станіславчук О. В.

_____ ” _____ 2023 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота за освітньо-професійною програмою автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології на тему “Автоматизована інтелектуальна система проектування вітроенергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором”. Кваліфікаційна робота включає: сторінки, рисунків, таблиць, посилання, авторські програми.

Розглянута класифікація та способи реалізації вертикально-осьових ВСУ. Описані основні їх види, а також вказані параметри за якими визначають ефективність того чи іншого типу ротора; Досліджено аеродинамічні характеристики ротора Савоніуса, Дар'є, Гібридного ротору барабанного типу. Розраховано основні величини та встановлено як вони залежать від зміни геометричних розмірів ротора. Розроблена конструкція вітрогенератора;

В роботі розроблено алгоритм розрахунку та побудови вертикально осьових роторів під різні умови, в залежності від топографічних параметрів, сили вітру, та багатьох різних факторів. Програмно реалізовано додаток для підбору ідеальної форми ротору вертикально-осьової установки, що включає в себе: ротор Дар'є, Савоніуса, комбінований ротор і т.п. Кінцевий результат додатку буде залежати від вхідних даних користувача.

Додаток розроблений на мові програмування Dart, платформа Flutter.

Графічне моделювання виконане в додатку Solidworks

Ключові слова: вертикально-осьові ротори, ротор Дар'є, ротор Савоніуса, комбінований ротор.

Перелік скорочень

- ВЕУ – вітроенергетична установка;
- ВО – вертикально-осьовий;
- ADWT – адаптивна вітряна турбіна Дар’є;
- VAWT – вітряні турбіни з вертикальною віссю обертання;
- TSR – коефіцієнт швидкості наконечника;
- Re – число Рейнольдса;
- AHDT – адаптивна гібридна турбіна Дар’є;
- RANS – середнє Рейнольдове за Нав’є-Стоксом;
- CFD – обчислювальна гідродинаміка;
- ВДЕ – відновлювальні джерела енергії;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- ВВО – вітрогенератор з вертикальною віссю обертання;
- ВГО – вітрогенератор з горизонтальною віссю обертання;
- САПР – система автоматизованого проектування.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Перелік умовних позначень.....	5
Вступ.....	8
1. Відновлювальні джерела енергії, як майбутнє світової енергетики.	11
1.1. Необхідність використовувати відновлювальні джерела в Україні.....	11
1.2. Вітроенергетичні установки з вертикально-осьовим ротором обертання.Класифікація.Складові.....	13
1.3. Вітроенергетичні установки з гібридним ротором обертання та їх переваги.....	16
1.4. Необхідність створення автоматизованої інтелектуальної системи проектування вітроенергетичних установок з гібридним вертикально- осьовим ротором.....	18
2. Проблеми побудови інтелектуальної системи проектування вітро- енергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором.....	34
2.1.Математичні моделі задач оптимізації ВЕУ.....	34
2.1.1 Мінімізація вартості енергії.....	35
2.1.2 Максимізація річного виробництва енергії.....	36
2.1.3 Мінімізація маси вітрової лопаті.....	37
2.1.4 Формулювання багатоцільної оптимізації.....	37
2.2 Оптимізація.....	38
2.2.1 Товщина оболонки та профіля.....	40
2.2.2 Рівень шуму.....	42

3. Інструменти дизайну та оптимізації лопатей вітроенергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором.....	47
3.1 Огляд аеродинаміки вітроенергетичних установок.....	47
3.1.1 Теорія імпульсу лопатевого елемента.....	47
3.1.2 Розв’язувачі обчислювальної гідродинаміки.....	49
3.2 Числові інструменти проектування ВЕУ.	53
3.2.1 Коди підготовки аерійного крила.....	53
3.2.2 Моделі роторів.....	54
3.2.3 Рішення аеродинамічних навантажень.....	55
3.2.4 Геометричний опис.....	56
3.3 Програмне забезпечення для проектування структур вітротурбіни.....	56
3.3.1 Статичні інструменти.....	56
3.3.2 Динамічні інструменти.....	58
3.4 Інструменти Co-Blade.....	58
4. Багатооб’єктивна оптимізація ВЕУ.....	61
4.1 Математичне формулювання.....	62
4.2 WINDESIGN - загальна структура.....	63
4.2.1 Монооб’єктивна оптимізація - WINDESIGN.....	63
4.2.2 Багатооб’єктивна оптимізація - WINDESIGN.....	65
5. Охорона навколишнього середовища	71
6. Охорона праці	78
7. Висновки.....	94
8. Список використаної літератури.....	

ВСТУП

Енергія вітру є технологічно розвиненим джерелом енергії з величезним потенціалом. Вона стає все більш конкурентоспроможна, займає менше простору землі, оскільки простягається вертикально, потребує мінімального обслуговування та ідеально інтегрується з моделлю циклічної економіки.

Протягом тисячоліть людство усвідомлювало, наскільки цінною може бути енергія вітру в нашому повсякденному житті, від вітрильників до вітряків. Понад століття ми також можемо перетворювати рух великих повітряних мас в електричну енергію для використання безпосередньо там, де вона генерується, або в іншому місці чи в інший час. Одним словом, сьогодні вітроенергетика має всі необхідні передумови для того, щоб відігравати провідну роль у глобальному енергетичному переході та переході до використання відновлювальних джерел енергії.

Багато переваг вітрової енергії є загальними для інших відновлюваних джерел енергії. Перш за все, це її роль у боротьбі зі зміною клімату: використання енергії вітру означає скорочення використання викопного палива, тим самим скорочуючи викиди вуглекислого газу, дрібних часток та інших речовин, що змінюють клімат, відповідальних за парниковий ефект. Крім того, енергія вітру також може допомогти досягти енергетичної самодостатності, пропонуючи незаперечні економічні вигоди для країн, які її запровадили, а також є кроком у напрямку сталого розвитку, оскільки вона фактично безкоштовна після встановлення вітрової турбіни. Більше того, вітер є багатим джерелом енергії, яке є одночасно невичерпним і необмеженим у часі, доступним на більшості частин поверхні Землі.

Серед особливостей вітрової енергії, які роблять її такою перспективною формою зеленої енергії, є можливість використовувати її в поєднанні з сонячною енергією. Крім співіснування на одній установці, обидві форми енергії також мають кілька характеристик, які доповнюють один одного.

Є, однак, деякі аспекти енергії вітру, які відрізняють її від інших відновлюваних джерел енергії, таких як гідроелектростанція, геотермальна та сонячна енергія. Ми розділили їх на 10 пунктів, щоб продемонструвати, як,

рухаючись вперед, енергія вітру може стати другим за значенням джерелом зеленої енергії в усьому світі та головним героєм сталого майбутнього для багатьох країн.

Мало того, що вітер присутній майже всюди на Землі, ми також маємо точну інформацію про те, де він дме найчастіше та найсильніше. Це питання доступності: оскільки добре відомо, де вітер дме найсильніше, можна встановити вітряні установки на основі нашої значної обізнаності про місцеві умови. Чим вітряніша місцевість, тим більше енергії вона може виробляти, компенсуючи витрати на початкові інвестиції.

Як і багато інших відновлюваних джерел енергії, енергія вітру також є вигідною, оскільки її можна використовувати за допомогою мікромереж навіть у місцях, де немає підключення до електричної мережі. У більш ізольованих районах, віддалених від міст, це дає важливу можливість, оскільки може призвести до значної економії через відсутність необхідності будувати дорогу інфраструктуру. На відміну від геотермальної або гідроелектроенергії, вітер можна використовувати в глобальному масштабі, за винятком тих небагатьох областей, у яких не вигідно встановлювати вітрові турбіни.

Часто переривчастість вітру від одного моменту до іншого або від одного дня до наступного розглядається як один із недоліків вітрової енергії. Однак, як і у випадку з сонячною енергією, у цієї медалі є інша сторона: вітер зазвичай не залежить від конкретного часу доби чи чергування дня й ночі, хоча він має сезонний чи річний ритм. Отже, загалом, це ресурс, який у середньостроковій та довгостроковій перспективі пропонує чудову гарантію регулярності, відрізняючись мінливістю, яка не слідує тій же моделі, що й сонячна енергія.

Перетворення енергії вітру в електрику вже досягло вражаючих показників. ККД коливається від 40% до 50%: дуже близько до максимального теоретичного рівня, який за законом Беца становить 59%.

Незважаючи на те, що вони встановлені на суші, вітрові турбіни не займають багато місця. Лопаті простягаються вертикально, а розмір біля основи майже незначний, особливо в порівнянні з фотоелектричними установками, що робить енергію вітру сумісною з іншими видами використання землі одночасно.

Хоча візуальний аспект і низький рівень шумового забруднення, спричиненого обертанням лопатей турбіни, все ще тривають, щоб зробити вітряні установки ще більш екологічно чистими, варто зазначити, що фактичний вплив сьогодні, тим не менш, надзвичайно обмежений. Енергія вітру фактично є екологічним джерелом із найменшим загальним впливом, оскільки будь-які викиди та споживання ресурсів обмежуються виключно виробництвом, транспортуванням та встановленням установки. Крім того, у багатьох країнах існують сертифікати, які необхідно отримати перед початком роботи над вітроенергетичним проектом, щоб переконатися, що будь-який побічний вплив на флору та фауну зведено до мінімуму. Хоча в більшості випадків вітряні турбіни встановлюються в горах, на пагорбах або на морі, коли вони розташовані в полях або на пологих схилах, землю все ще можна використовувати для вирощування сільськогосподарських культур або як пасовище для тварин, не створюючи жодних перешкод для діяльності.

Порівняно з іншими джерелами енергії вітрова енергія має дуже низькі витрати на встановлення та експлуатацію. Строки будівництва короткі: від двох до двадцяти чотирьох місяців залежно від розміру заводу. Крім того, технологічний прогрес ще більше знижує витрати, а вартість кіловат-години виробленої енергії стала незначною. Нарешті, енергія вітру стає все більш доступною завдяки національним заохоченням, які зменшили вартість для кінцевого користувача та зменшили витрати в цілому завдяки все більш низькій вартості цієї технології.

Утримувати вітрову електростанцію в роботі дуже просто. Якщо немає поломок або виняткових подій, які, тим не менш, стаються дедалі рідше завдяки моделям, які стають все більш надійними, і цифровим системам моніторингу, які забезпечують все більш високі рівні продуктивності, технічне обслуговування є мінімальним і недорогим. Насправді вежі та турбіни можуть працювати роками, не потребуючи жодного втручання; з невеликими коригуваннями вони можуть продовжувати працювати протягом періодів, що перевищують двадцять років.

Навіть у значно зменшених масштабах, наприклад, для окремого будинку, енергія вітру може запропонувати численні переваги. Завдяки міні-вітроенергетики та мікровітроенергетики (системи потужністю до 200 кіловат і 20 кіловат

відповідно) енергію вітру можна використовувати на домашньому рівні для покриття енергетичних потреб будівлі або сім'ї. Як правило, домашня вітрова енергія використовується в поєднанні з іншими екологічно чистими джерелами, такими як сонячна або геотермальна, щоб скористатися перевагами, які пропонує кожен із них.

Порівняно з іншими джерелами енергії, екологічно чистими чи ні, енергія вітру вже є зрілою технологією, можливо тому, що її використовували в різних формах протягом тисячоліть. Проте є деякі аспекти, над якими ми все ще працюємо: особливо над покращенням деяких конкретних характеристик функціонування цієї технології. Наприклад, розробляються рішення для протидії накопиченню льоду на лопатях турбіни, що може знизити ефективність і збільшити знос.

Ще одне питання, на якому зосереджені інновації, – це питання встановлення стацій таким чином, щоб вони гармоніювали з навколишнім ландшафтом. Крім того, у майбутньому зростає інтерес до плавучих офшорних вітрових електростанцій, де ні люди, ні риби не будуть турбуватися своїм існуванням. Усе це робить енергію вітру ще більш досконалою технологією на шляху до декарбонізації та сталого розвитку.

РОЗДІЛ 1

ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЯК МАЙБУТНЄ СВІТОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Необхідність використовувати відновлювальні джерела в Україні

У сучасному світі, коли питання зміни клімату, енергетичної безпеки та сталого розвитку стають все більш актуальними, Україна, безперечно, стоїть перед важливим вибором - продовжувати традиційний підхід до виробництва енергії або активно впроваджувати відновлювальні джерела енергії (ВДЕ). В цьому есе розглянемо необхідність використання відновлювальних джерел енергії в Україні з погляду екології, економіки та соціальної стійкості.

Екологічний аспект:

Однією з найбільш важливих причин використання ВДЕ в Україні є екологічна необхідність. Традиційні джерела енергії, такі як вугілля та газ, призводять до значних викидів парникових газів і інших забруднюючих речовин. Застосування сонячних панелей, вітряних турбін, гідроелектростанцій та інших ВДЕ дозволяє значно зменшити вплив енергетичного сектору на забруднення довкілля та зміну клімату. Впровадження чистих енергетичних технологій - це крок до збереження біорізноманіття та забезпечення чистого повітря для нас та майбутніх поколінь.

Економічний аспект:

Використання ВДЕ також має великий потенціал для економіки України. Інвестиції в галузь відновлювальної енергетики стимулюють розвиток місцевого виробництва та інноваційних технологій. Створення нових робочих місць у сфері проектування, виробництва, монтажу та обслуговування ВДЕ сприяє росту економіки та зниженню безробіття. Крім того, перехід до чистих джерел енергії зменшує енергетичну залежність країни, а це може мати позитивний вплив на економічну стійкість та конкурентоспроможність України на світовому ринку.

Соціальний аспект:

Забезпечення стабільності енергопостачання є ключовим елементом соціальної стійкості країни. Використання ВДЕ розширює можливості доступу до енергії для віддалених регіонів та сільських поселень, де будівництво традиційної енергетичної

інфраструктури може бути витратним та неефективним. Розвиток ВДЕ також дозволяє забезпечити енергією соціально вразливі групи населення, зменшуючи енергетичну бідність та полегшуючи доступ до освіти, охорони здоров'я та інших соціальних послуг.

Україна, обираючи шлях розвитку своєї енергетичної системи, повинна активно враховувати важливість використання відновлювальних джерел енергії. Це не лише відповідь на виклики сучасності, а й стратегічний крок до сталого та екологічно чистого майбутнього. Використання ВДЕ в Україні - це необхідність, що визначає енергетичну, економічну та соціальну стійкість країни у XXI столітті.

Підсумовуючи вищесказане можна розділити переваги ВДЕ в Україні:

Однією з ключових переваг використання ВДЕ є їхній екологічний внесок. Сонячна, вітрова та гідроенергетика не супроводжуються викидами парникових газів та інших забруднюючих речовин. Заміна традиційних джерел, таких як вугілля та природний газ, ВДЕ допомагає знижувати вплив енергетичного сектору на довкілля та прискорює перехід до низьковуглецевого суспільства.

Використання відновлювальних джерел дозволяє Україні зменшити свою залежність від імпортованих енергетичних ресурсів. Незалежність в постачанні енергії стає ключовою в енергетичній політиці країни. Споживання сонячної енергії, вітроенергії та гідроенергії дозволяє Україні бути менш вразливою до геополітичних ризиків та коливань цін на енергоносії.

Інвестиції у сектор ВДЕ сприяють економічному зростанню та створенню нових робочих місць. Виробництво, встановлення та обслуговування відновлювальних технологій стають джерелами доходу для бізнесу та робочих місць для населення.

4. Енергетична Ефективність та Зменшення Витрат:

Відновлювальні джерела енергії, особливо сонячна та вітрова енергія, стають все більш ефективними та доступними. Розвиток технологій дозволяє забезпечити високу енергетичну видачу та зменшити витрати на виробництво енергії.

1.2 Вітроенергетичні установки з вертикально-осьовим ротором обертання.Класифікація.Складові

Розглядаючи плюси і мінуси вітроенергетики, переваги вітроенергетики численні. Це причини для інвестування у потужності з виробництва вітрової енергії.

До переваг вітрової енергетики можна віднести:

1. Вітер є видом чистої енергії

По-перше, як працює енергія вітру? Починається з турбіни, яку вітер обертає, коли дме. Кінетична енергія вітру перетворює генератор у структуру, яка створює електрику. Сучасні вітряні турбіни надзвичайно ефективно перетворюють навіть легкий вітерець на електрику.

Одна з переваг вітрової енергії полягає в тому, що це чиста енергія, тобто вона не виділяє парникових газів під час виробництва електроенергії. Ваш вуглецевий слід – це сукупність усіх газів, таких як вуглекислий газ, метан і закис азоту, які утворюються в результаті спалювання викопного палива. Якщо ви можете спалювати менше викопного палива для отримання енергії, замінюючи його чистою, відновлюваною енергією, наприклад вітром, ви зменшуєте свій вуглецевий слід.

2. Вітер є відновлюваним джерелом енергії

Ще однією перевагою вітрової енергії є те, що вона є відновлюваною енергією. Він походить від вітру, який є природним ресурсом, який не витрачається. Чим зелена енергія відрізняється від відновлюваної? Окрім того, що він походить із необмеженого ресурсу, він не виробляє парникових газів. У цьому аспекті енергія вітру схожа на енергію сонця.

3. Енергія вітру має низькі експлуатаційні витрати

Оскільки енергія вітру є відновлюваним джерелом енергії, немає постійних витрат на придбання палива. Після того, як вітряну турбіну встановлено, єдина реальна вартість – це технічне обслуговування. Оскільки в майбутньому світ декарбонізуватиме виробництво електроенергії, вітер стане чистим, відновлюваним і недорогим варіантом.

4. Вітрові турбіни економлять простір

Іншим фактором, що пояснює плюси і мінуси вітроенергетики, є те, що вона економить простір і добре підходить для інших видів землекористування. Вітрові турбіни можна розмістити по полях із достатнім простором між ними, щоб бути продуктивними. Оскільки вони підняті над землею, простір під ними відкритий для інших цілей, наприклад для сільського господарства.

5. Виробництво вітрової енергії сприяє внутрішньому економічному зростанню

Використання енергії вітру є економічно вигідним, крім того, що її виробництво недороге. Він покладається на місцевий ресурс і створює місцеві робочі місця. Інвестиції у вітроенергетику зростають. За останні 10 років потужність вітрової генерації зросла на 30 відсотків.

ВЕУ з вертикальною віссю обертання (рис 1.1) мають переваги перед установками з горизонтальною віссю, які полягають у тому, що зникає необхідність у пристроях для орієнтації на вітер, спрощується конструкція та знижуються гіроскопічні навантаження, що зумовлюють додаткові напруження в лопатях, системі передачі та інших елементах установки, з'являється можливість установки редуктора з генератором на підставі вежі. Конструктивна схема ВЕУ із вертикальною віссю обертання наведена на рис.1.1.

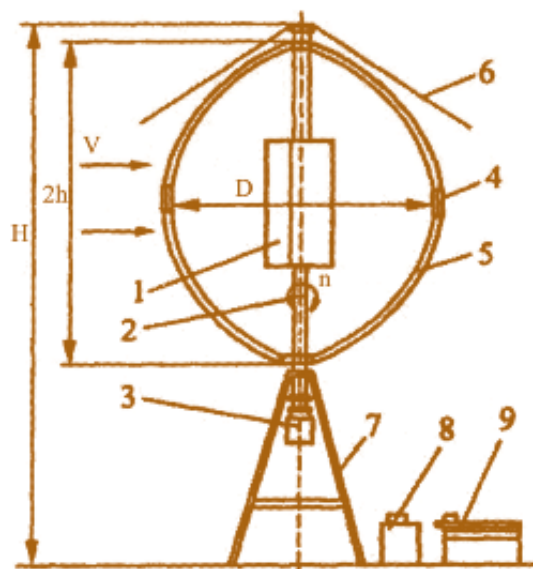


Рис.1.1. Вітроенергетична установка з вертикальною віссю обертання
Основні переваги вітрогенераторів з вертикальною віссю (ВВО)

- Генератор з вертикальною віссю обертання не страждає від гіроскопічних неустойок, як це може бути з вітрогенератором із горизонтальною віссю (ВГО);
- Лопаті зі скловолокна дуже жорсткі, але вони надійні при дуже сильному вітрі. Вони підтримуються на обох кінцях, тому конструкція більш надійна;
- Вертикальні вітрогенератори прекрасно працюють з генераторами прямого двигуна;
- Завдяки безпечному кронциркулю шахти можна легко домогтися гальмування установки, причому це не вимагає великих затрат;
- Генератор знаходиться на рівні землі, що дозволяє знизити вартість обслуговування в порівнянні з ВГО.

Вітроенергетичні установки з вертикальною віссю обертання (ВВОВ) мають ряд переваг і відрізняються від традиційних горизонтальних вітряків. Давайте розглянемо будову такої установки:

1. Мачта:

Мачта є структурою, яка утримує вітрогенератор та підтримує його на висоті. Вона може бути виготовлена з металу або композитних матеріалів. Мачта для ВВОВ може мати іншу конструкцію, оскільки напрямок вітру не впливає на ефективність генератора.

2. Ротор:

Ротор - це обертаюча частина вітрогенератора, де розміщуються лопаті. У ВВОВ лопаті розташовані вертикально навколо центрального вала, що приводить генератор.

3. Лопаті:

Лопаті у ВВОВ розташовані паралельно вісі обертання, і вони можуть мати різні форми та конструкції. Вони використовуються для захоплення енергії вітру і передачі її на генератор для виробництва електроенергії.

4. Генератор:

Генератор конвертує механічну енергію, отриману від руху лопатей, в електричну енергію. Часто використовуються синхронні генератори, які підключені до вала ротора.

5. Трансмiсія:

Трансмiсія використовується для передачі обертового моменту від ротора до генератора. У ВВОВ вона може бути меншою та менш складною, оскільки вона не потребує механiзмів для зміни напрямку руху лопатей.

6. Керування та Системи Моніторингу:

Вітроенергетичні установки обладнані системами керування та моніторингу, які автоматично або за допомогою оператора регулюють роботу системи залежно від умов вітру.

7. Фундамент:

Фундамент забезпечує стійкість та закріплення вітрогенератора на місцевості. У ВВОВ він може мати іншу конструкцію порівняно з горизонтальними вітряками через специфічний спосіб їхнього розташування.

Хоча ВВОВ не є панацеєю, вони представляють інтерес для певних сценаріїв та умов і можуть знайти своє застосування в специфічних умовах вітроенергетичних проектів.

1.3 Вітроенергетичні установки з гібридним ротором обертання та їх переваги

Гібридні ротори з вертикальною віссю, які поєднують конструкції Савоніуса і Дар'є, представляють інноваційний підхід до технології вітрових турбін. Як Савоніуса, так і Дар'є є типами вітрових турбін з вертикальною віссю з відмінними характеристиками, і їх інтеграція спрямована на використання сильних сторін кожної конструкції. Ось огляд гібридної конфігурації з роторами Савоніуса і Дар'є:

Ротор Савоніуса:

Конструкція: ротори Савоніуса мають просту конструкцію, що складається з двох або більше лопатей у формі черпака, які нагадують напівциліндри. Ці лопаті встановлені на вертикальній осі.

Робота: ротори Савоніуса відомі своєю здатністю вловлювати вітер з будь-якого напрямку, що робить їх всенаправленими. Однак вони зазвичай мають нижчий ККД порівняно з деякими іншими конструкціями турбін.

Ротор Дар'є:

Конструкція: Ротори Дар'є мають дві або більше лопатей у формі аеродинамічного профілю, розташованих у вертикальній або гвинтовій конфігурації. Лопаті з'єднані з центральним вертикальним валом.

Робота: під час обертання ротори Дар'є досягають підйомної сили через форму профілю. Вони, як правило, більш ефективні, ніж ротори Савоніуса, але мають вимоги до швидкості вітру, що вмикається, і можуть відчувати циклічні навантаження.

Гібридні ротори з вертикальною віссю :

ГВО ВЕУ (рис 1.2), які поєднують конструкції Савоніуса і Дар'є, прагнуть отримати вигоду з сильних сторін кожного типу.



Рис.1.2. Гібридна вітроенергетична установка з вертикальною віссю обертання

Компонент Савоніуса сприяє здатності ротора починати обертатися при низькій швидкості вітру, забезпечуючи роботу турбіни навіть при слабкому бризі.

Компонент Дар'є підвищує загальну ефективність ротора, особливо при високій швидкості вітру, дозволяючи збільшити виробництво електроенергії.

Здатність компонента Савоніуса вловлювати вітер з будь-якого напрямку доповнює ефективність компонента Дар'є при високій швидкості вітру.

Ця всенаправлена здатність робить ГВО ВЕУ адаптованими до мінливих режимів вітру та придатними для місць із змінним напрямком вітру.

Характеристика компонента Савоніуса запускатися при низьких швидкостях вітру сприяє загальній ефективності ГВО ВЕУ, забезпечуючи генерацію електроенергії в умовах, коли інші турбіни можуть простоювати.

ГВО ВЕУ спрямовані на досягнення покращеної продуктивності в широкому діапазоні швидкостей вітру, що робить їх універсальними в різних умовах навколишнього середовища.

Розробка ГВО ВЕУ передбачає постійні дослідження та експерименти для оптимізації комбінації компонентів Савоніуса і Дар'є.

Інженери та дослідники досліджують варіації форм, розмірів і конфігурацій лез, щоб знайти найефективнішу гібридну конструкцію.

ГВО ВЕУ з компонентами Савоніуса і Дар'є можуть знайти застосування в автономному виробництві електроенергії, електрифікації сільської місцевості та

розподілених енергетичних системах, де поєднання можливостей низької та високої швидкості вітру є вигідним.

Таким чином, інтеграція конструкцій Савоніуса і Дар'є у ГВО ВЕУ спрямована на створення турбіни, яка може ефективно вловлювати енергію вітру в широкому діапазоні швидкостей вітру, що робить її універсальним і потенційно ефективним рішенням у сфері вітрових турбін з вертикальною віссю. Постійні дослідження та розробки мають вирішальне значення для розкриття повного потенціалу цього гібридного підходу.

1.4 Необхідність створення автоматизованої інтелектуальної системи проектування вітроенергетичних установок з гібридним вертикальноосьовим ротором

Профіль вітрової турбіни повинен задовольняти наступним аеродинамічним вимогам:

1. Високий коефіцієнт підйомної сили (C_L/C_D) і високий коефіцієнт підйомної сили (C_L)
2. Хороша продуктивність під час стохастичної поведінки швидкості вітру
3. Низька чутливість до шорсткості передньої кромки

Знижена чутливість до шорсткості (головним чином передньої шорсткості) означає, що лопаті вітрової турбіни повинні бути ефективними в брудних умовах (Sagol, Reggio, & Ilincă, 2013). в

Крім того, коефіцієнт моменту не може бути занадто високим, оскільки це збільшить кручення лопаті у вітряній турбіні з регульованим кроком низький коефіцієнт моменту призводить до зниження контролю сили. Через пориви вітру локальний кут атаки може раптово змінюватися і знаходитися в передзривній або звалювальній зонах (F. Grasso, 2011). Отже, вибір сімейства аеродинамічних профілів має вирішальне значення конструкція лопатей вітрових турбін. Тому вкрай важливо розглянути в цьому розділі видатні підходи до оптимізації форми профілю

вітрової турбіни. Нижче ми розглянемо найактуальніші дослідження оптимізації форми аеродинамічного профілю протягом останніх двох десятиліть.

Бажані характеристики аеродинамічного профілю для лопатей вітрових турбін можна розділити на дві основні категорії: конструктивні та аеродинамічні. По всьому розподілу лопатей вітрової турбіни, різні фізичні характеристики є ключовими в корені, середині та кінчику. Корінь в основному розроблений щодо структурних проблем, тоді як наконечник визначається для аеродинаміки міркування (Bizzarrini, Grasso, & Coiro, 2011). Найбільш значущі структурні параметри – максимальна товщина профілю та його розташування по хордах.

Профіль

товщина повинна забезпечувати необхідну міцність і жорсткість лопаті. Розташування максимальної товщини по хорді забезпечує краще проникнення лонжерона всередину профілю розділи. Що стосується верхньої частини, то основним аеродинамічним параметром є коефіцієнт підйомної сили. Це співвідношення в основному пов'язане з поведінкою звалювання та $C_{L,max}$ профілю. Відносно високе значення коефіцієнту підйому дозволяє проектувальнику зменшити хорду і, отже, навантаження на парковану умовах на високих швидкостях. Нижня хорда біля вістря також зменшує вагу лопаті та амплітуду коливального навантаження внаслідок поривів вітру.

Бургер і Хартфілд досліджували доцільність використання поєднання методу вихрової решітки з генетичним алгоритмом для оптимізації аеродинаміки продуктивність лопаті вітрової турбіни з горизонтальною віссю.

Лі та ін. представили вдосконалену техніку оптимізації використання методів поверхні відгуку для покращення співвідношення підйомної сили та лобового опору для двовимірних аеродинамічних профілів вітрової турбіни.

У [2] автори зосередилися на на дизайн аеродинамічного профілю в зоні вершини лопаті за допомогою числових моделей. Грассо представив платформу гібридної оптимізації на основі генетичних і градієнтних методів алгоритми розробки нового сімейства аеродинамічних профілів, призначених для кореневої області вітрової

турбіни лезо. Мотивом було підвищення аеродинамічної ефективності $\frac{L}{D}$ разом із секцією момент опору (I_{xx}) перетину профілю. Тому що ці два параметри суперечливі один з одним, Грассо поєднав обидві цілі за допомогою зваженої лінійної комбінації (1.1) :

$$\min f(\vec{x}) = k\left(\frac{L}{D}\right) + (1 - k)I_{xx}$$

де k — ваговий параметр, що змінюється від 0 до 1,

$\frac{L}{D}$ — відношення підйомної сили до лобового опору,

I_{xx} — перерізний момент опору.

В останні роки для аеродинамічних профілів були запропоновані тупі задні кромки або плоскі аеродинамічні профілі внутрішні області великих лопатей вітрової турбіни, оскільки вони забезпечують деякі структурні та переваги аеродинамічних характеристик. Чен та ін. застосувати багатоцільовий код генетичного алгоритму для оптимального дизайну серії Flatback. Двома цілями були максимальний коефіцієнт підйому та максимум підйомна сила. Було показано, що багатооб'єктивна схема генерує плоскі аеродинамічні профілі з кращими результатами, ніж ті, що отримані за допомогою єдиного алгоритму GA.

Рібейро та ін. об'єднали рівняння RANS у сталий стан з одним рівнянням моделі турбулентності та алгоритмом оптимізації. Використовуються одно- та багатооб'єктні генетичні алгоритми, а штучні нейронні мережі використовувалися як сурогатна модель для генерації оптимальних форм профілю. Jeong та ін. мінімізували коливання непостійне аеродинамічне навантаження в умовах турбулентного вітру. Зазначалося, що позаплан флуктуаційне непостійне аеродинамічне навантаження є більш значущим, ніж навантаження в площині для структурних втома лопаті. Середньоквадратичне значення згинального моменту поза площиною було зменшено приблизно на 20% і його середнє значення було зменшено приблизно на 5%.

Лу та ін. розробили надійну оптимізацію конструкції (ОК) для вітру турбінні аеродинамічні профілі шляхом максимізації C_L / C_D та C_L аеродинамічного профілю разом із мінімізацією чутливості шорсткості на передній кромці, пов'язаної з невизначеністю профілю геометрії.

У цьому розділі ми розглядаємо найбільш релевантні дослідження оптимізації лопатей вітрових турбін проведені за останні 20 років.

Одне з перших досліджень було проведено в 1996 році Селігом і Каверстоуном-Керроллом. Вони досліджували максимізацію виробництва енергії без або мало обмежень щодо навантажень.

Через рік Giguère і Selig представили багатодисциплінарну платформа оптимізації для оптимальної геометрії лопатей ВЕУ (рис 1.3). А поєднання двох цілей було використано для отримання кривої компромісу, отриманої за допомогою а функція обміну. Розглядалася лише структура лопаті, але й вплив ротора інші компоненти представлені в моделі витрат. Ці компоненти включають концентратор, трансмісія, контролер, гондола та вежа. Вартість кожного компонента моделюється за допомогою відносний підхід, коли вартість отримана з базової моделі. Крім того, вартість кожен компонент корелюється з відповідними змінними дизайну та нормалізується з вартість від базової лінії (за винятком контролера, який не покладається на базову вартість).

Наступна процедура була використана для оцінки ваги лопаті та кінцевої вартості (рис 1.3).

1. Навантаження на вигин закрилка на кожному сегменті визначається розподілом тяги для даний стан навантаження (зазначений користувачем або ІЕС 50-річний екстремальний вітер швидкості). Коефіцієнт навантаження ІЕС 1,35 застосовується до статичних навантажень на вигин клапанів.

2. Розраховується необхідний момент інерції кожного сегмента за допомогою вигину закрилка навантаження, щоб відповідати встановленому рівню напруги σ (один для втулки та обшивки, а інший для лонжерона) уздовж лопаті.

3. Знаходиться необхідна товщина втулки і лонжерона, нехтуючи інерцією обшивки і лонжерон і перетинки зрізу навколо власної осі обертання.
4. Вибирається необхідна кількість шарів з розподілу товщини шкіри.
5. Розрахунок прогину вістря.
6. Розраховується площа поперечного перерізу на кожному сегменті.
7. Обсяг матеріалу оцінюється шляхом лінійної екстраполяції хреста секційно-площа.
8. Нарешті, вага лопаті оцінюється за кількістю лопатей N , об'ємом MVB та густина ρV

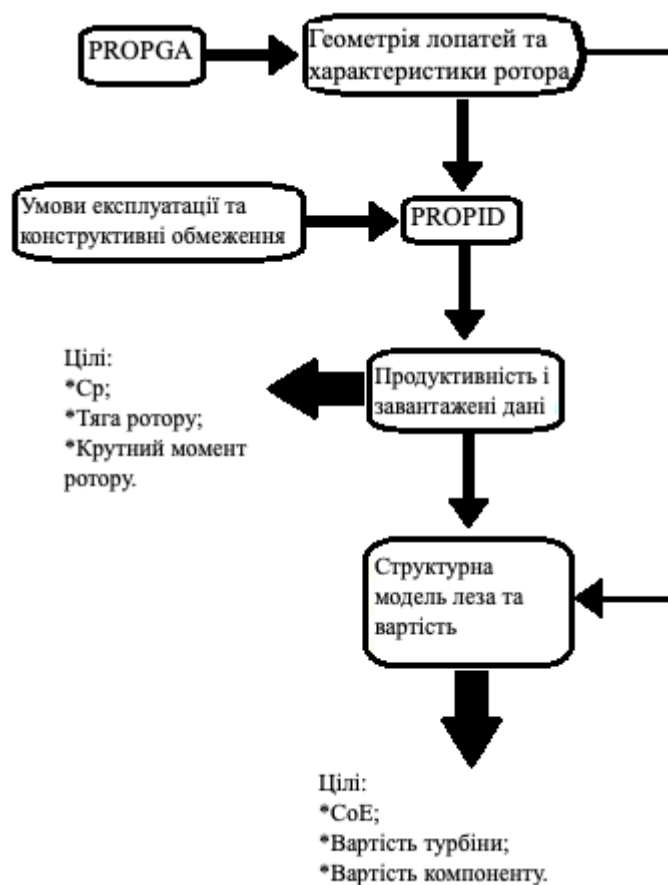


Рис 1.3: Блок-схема

Блок-схема оптимізації, яку пропонує Giguère et Selig спонукали дослідників до додаткового проведення в галузі оптимізації вітрових турбін. Таким же чином Фуглсанг і Мадсен розробили відомий код для мультидисциплінарної оптимізації роторів ВЕУ (рис. 1.4) на основі їх попередніх робота в Національній лабораторії Risø. Змінні конструкції поділяються на 3 категорії: форма ротора, профіль

характеристики та регулювання лопаті. Метод проектування продемонстрував, що змінила ротора форма призвела до максимально допустимого натягу на більш ніж 80 % лопаті та зменшення 3,5 % вартості енергії.

Подібним чином Маалаві та Бадр розробили комп'ютер програму та нове математичне формулювання на основі безрозмірних величин для генерації оптимальна конфігурація ротора з найбільшою потужністю. Аеродинамічний аналіз на основі, а параметрами конструкції є акорд і розподіл скручування, кількість лопатей, сімейство секцій крила, розмір втулки та швидкість наконечника також.

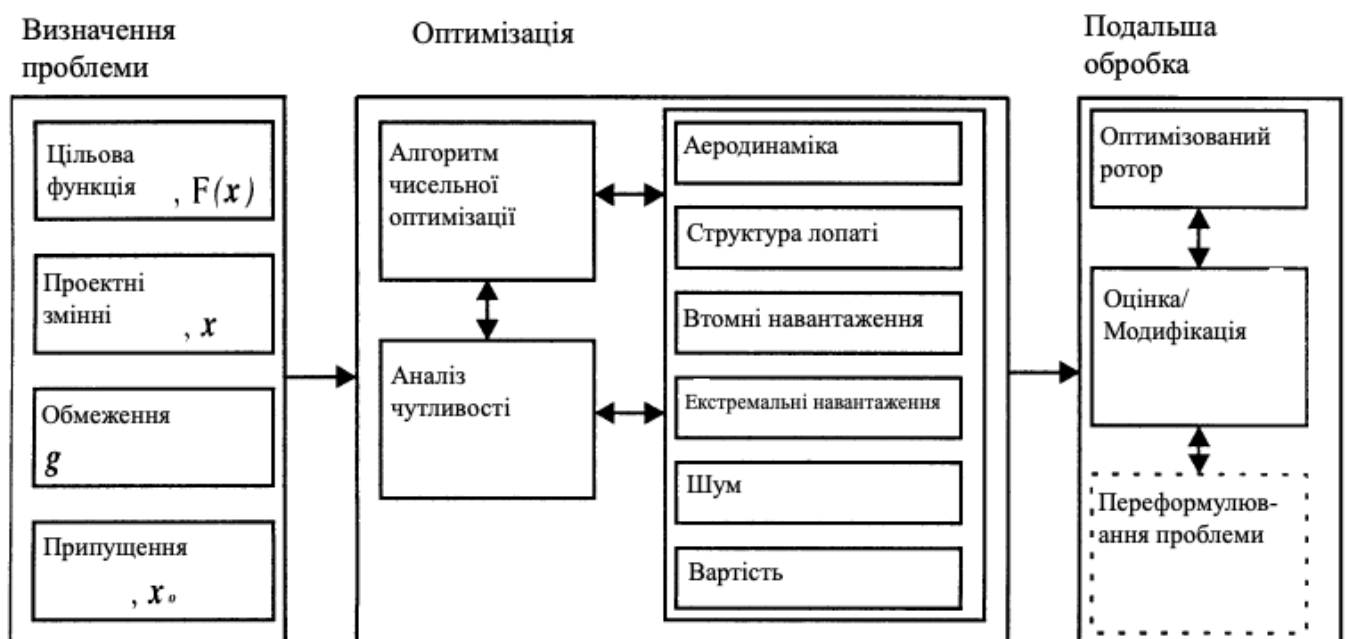


Рис 1.4: Числовий алгоритм

Швидко вперед до 2005 року, Jureczko та ін. досліджували оптимізація лопаті вітряної турбіни як суто структурна проблема за умов фіксованої аеродинамічна форма. Однак модель ефективна лише в модальних, статичних і лінійних перехідних процесах аналіз. Постановка задачі багатокритеріальної дискретної оптимізації змусила авторів брати до уваги численні критерії, які часом можуть бути суперечливими. Юречко та ін. (Юречко et al., 2005) сформулював задачу оптимізації на основі 5 різних критеріїв:

1. Мінімізація генерованих вібрацій
2. Максимізація генерованого виходу
3. Мінімізація витрат на матеріал лопаті

4. Забезпечити локальну та глобальну стабільність конструкції лопаті

5. Забезпечити вимоги до міцності конструкції лопаті

Причина першого критерію полягає в тому, що мінімальна вібрація лопаті гарантує вищу стабільність. Однак слід бути обережним, відокремлюючи власну частоту лопаті від гармонічної вібрації, пов'язаної з обертанням ротора, щоб запобігти виникненню резонанс. Висока амплітуда вібрації призводить до руйнування конструкції ВЕУ. Тим не менш, амплітуда вібрації є функцією щільності матеріалу, товщини оболонки та розташування конструктивних ребер уздовж лопаті. Отже, при мінімізації лопаті. Враховуючи вібрацію, потрібно вжити належних заходів, щоб забезпечити необхідну жорсткість. Це постановка задачі оптимізації також задовольняє другий критерій; максимізація генерованої потужності, оскільки потужність вітрової турбіни також залежить від оптимальної форми. Третій і четвертий критерії є складним завданням, оскільки мінімізація витрат на матеріалів лопаті досягається мінімізацією маси лопаті. Конфлікт між обома принципів виникає тому, що мінімізація ваги ставить під загрозу стабільність лопаті, і в порядку щоб отримати кращу стійкість, вага повинна бути максимальною. Нарешті зустріти силу вимога додається гранична умова на переміщення в поперечному напрямку.

Мендес і Грейнер підготували метод для отримання оптимального розподілу хорди та кручення в лопатях вітрових турбін. Розподіли розраховуються для максимізації середня потужність в залежності від розподілу вітру Вейбулла. Щоб оптимізувати акорд і твіст розподілу, ефективна реалізація теорії БЕМ розробити модель оптимізації на основі розширеної компактний генетичний алгоритм (ESGA) для максимізації річної виробленої енергії 1,3 МВт вітряної турбіни з регульованим зривом. Порівняно з оригінальними лопатями розроблені леза продемонстрували а кращі аеродинамічні характеристики. Насправді результати підтвердили, що при меншій швидкості вітру потужність майже вдвічі більша, ніж у оригінальних лез. Річний приріст 7,5 % вихід енергії був зафіксований.

Лі та ін. представили надійну процедуру оптимізації вітрової турбіни лопаті в шельфі Корейського півострова. Форма леза оптимізована для отримання

максимуму річне виробництво електроенергії. Спосіб складається з двох кроків; робочий стан оптимізація (крок 1) і геометрична конструкція форми леза та аналіз продуктивності леза оптимізація (крок 2).

Можливість мультидисциплінарного дизайну (MDF) підхід використовується для вирішення проблеми оптимізації лопаті вітряної турбіни Kenway і Мартінс. Лезо створено з використанням 7 конструктивних змінних: хорда, кручення, лонжерон (товщина, розташування та довжина), товщина профілю та швидкість обертання. до щоб продемонструвати потенціал оптимізації для конкретного місця, використовувався корпус вітряної турбіни потужністю 5 кВт результати показують можливе збільшення виробництва на 3-4 %.

У 2009 році Джейхан та інші досліджували аеродинамічні характеристики лопатей вітряної турбіни з горизонтальною віссю з використанням теорії ВЕМ і генетичний алгоритм. Виробництво електроенергії зросло на 40-80%. записано на 100 кВт ВЕУ. У тому ж році Кліфтон-Сміт і Вуд застосував числовий метод диференціальної еволюції (DE) для максимізації як потужності, так і стартова продуктивність. Результати показують, що стартовий час можна покращити у 20 разів з невеликим зниженням коефіцієнта потужності. Подібним чином Belessis та ін. досліджували можливості конструкції вітряної турбіни на основі генетичного алгоритму інструмент, що демонструє 10% річний приріст енергії для вітряних турбін потужністю 100, 300 і 500 кВт.

Xudong та ін. представили інструмент розробки для оптимізації лопатей вітряних турбін, з'єднання між аеродинамічним і аеропружним кодом для врахування структурної динаміки представлений 11 ступенями свободи. Хорда, закрутка і відносна товщина леза були оптимізовані. Трилопатевою вітряну турбіну оптимізували з урахуванням трьох власних мод (перша та друга стулки та перша реброва мода) разом із осьовою переміщення всього ротора і азимутальне зміщення лопатей. Подальша інформація щодо аеродинамічного/аеропружного коду можна знайти в [4], про аеродинамічну модель та вартість моделі. У цьому дослідженні Xudong та інші обмежив функцію придатності вартістю ротора, де загальні витрати

на виробництво, оцінюються транспортування та монтаж ротора вітрової турбіни. Відносна величина загальної вартості ротора визначається як:

$$f(\vec{x}) = C_oE = \frac{C_{\text{ротору}}}{AEP}$$

$$C_{\text{ротору}} = b_{\text{ротору}} + (1 - b_{\text{ротору}})W_{\text{ротору}}$$

де b_i — постійна частина вартості ротора (за припущенням 0,1), а $W_{\text{ротору}}$ — вага параметру ротора, розрахована за розподілом маси хорди та лопаті:

$$W_{\text{ротору}} = \sum_{i=1}^N \frac{m_i C_{i,opt}}{M_{tot} C_{i,org}}$$

де m_i — маса i -го перерізу лопаті; $C_{i,opt}$ — усереднена хорда i -го перерізу оптимізованої лопаті; $C_{i,org}$ — усереднена хорда i -го поперечного перерізу вихідної лопаті; M_{tot} — загальна маса леза.

Передбачається, що вітряна турбіна працює 8700 годин на рік, і оцінюється її АЕР наступним чином:

$$AEP = 8760 \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} [P(V_{i+1}) + P(V_i)] f(V_i < V < V_{i+1})$$

де $P(V_i)$ — потужність при швидкості вітру V_i .

Натхненний Xudong та ін. Eke і Onyewudiala застосували GA для оптимізації параметрів форми (хорда, скручування та відносна товщина) з використанням тієї ж моделі вартості та формулювання АЕР. Їхні результати показали зниження річного виробництва енергії на 0,8%. і зниження на 1,9% вартості ротора, отже, зменшення вартості енергії ротора на 1,115%.

Wang та ін. представили багатоцільовий алгоритм, де максимальний коефіцієнт потужності CP при розрахунковій швидкості вітру (9 м/с) і мінімальна лопать маси сприймаються як суперечливі цілі. Аеродинамічні навантаження, що діють на лопаті, складають розраховано за допомогою модифікованої теорії БЕМ.

Масове поширення і загальна маса леза отримуються з рівнянь нормального напруження в умові тонкостінної балки, що вільно згинається. Дві цілі можна сформулювати так:

$$f_1 = \max(C_p \mid V = 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$f_2 = \min \int_{R_{hub}}^R m_i dr$$

У 2013 році Chen та ін. нещодавно створили оптимізовану модель для оптимізувати товщину та розташування ковпачків лонжеронів, що з'єднують програму кінцевих елементів алгоритм PSO. Початкова конструкція шарів композитної конструкції леза складається з комбінація 6 ламінатних матеріалів (рис 1.5):

1. Односпрямований ламінат
2. Двоосьовий ламінат
3. Триосьовий ламінат
4. Матеріал покриття
5. Додаткова смола
6. Матеріал серцевини з піни

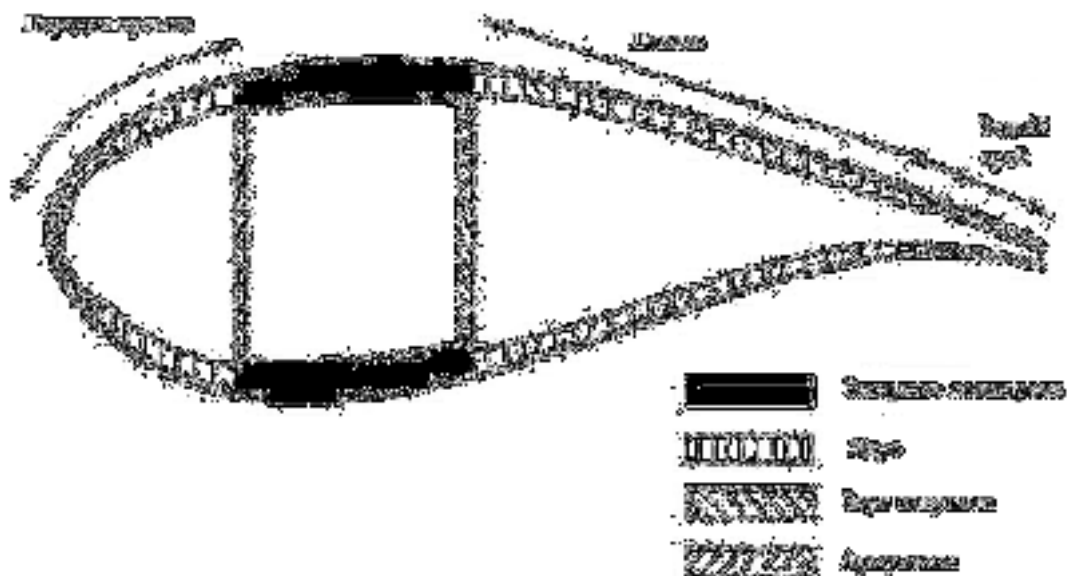


Рис 1.5: Матеріал леза

Diveux та ін. використовували глобальну модель вартості для вітрової турбіни та її компонентів, натхненна параметрами, щоб розробити спеціальний інструмент оптимізації дизайну вітру турбіни біля Середземного моря. Загальна вартість вітрової турбіни C_{WT} є сумою всіх вартостей компонентів C_{comp} змінена коефіцієнтом калібрування F_{WT} , який враховує деякі невідомі параметри, такі як маржа виробника. Річна операція і витрати на технічне обслуговування є фіксованими на рівні 2-5% від початкової інвестиційної вартості та коефіцієнта актуалізації а було включено наступним чином:

$$C_{WT} = F_{WT} \sum_{i=1}^N C_{comp}$$

$$\text{Вартість} = (a + 0.025) C_{ITZ}$$

Річна вироблена електроенергія визначається інтегруванням швидкості вітру розподілу та вироблення енергії за 1 рік [кВт·год]. Diveux та ін. використовувати емпіричний модель для коефіцієнта потужності на основі Вілсона та Ліссамана:

$$E_{AP} = 8.76 \frac{\rho_{air}}{2} S_R \int_{V_I}^{V_2} V^3 f(V) C_p(V) \eta_{GB}(V) dV$$

де E_{AP} — річне виробництво енергії, S_R — площа обертання ротора (m^2), $f(V)$ — функція щільності Вейбулла швидкості вітру,

η_{GB} — ефективність коробки передач, η_G — ефективність генератора

Результати вказали, що оптимальні вітряні турбіни для даних Середземноморських умов вимагають більших параметрів потужності.

Застосувати багатоцільовий еволюційний алгоритм (МОЕА) для оптимізації конструкції ВЕУ з регульованим зривом із компромісом між співвідношення АЕР на площі вітроелектростанції (для максимізації) та вартості енергії (для мінімізації). Альтернативною цільовою функцією, яка досліджується замість річної енергії, є густина АЕР;

співвідношення цієї останньої та площі вітряного парку R^2 , параметр, який дизайнер прагне максимізувати. Мотивом використання цього показника є той факт, що Кількість турбін, які можна встановити на даній території, обернено пропорційна квадрату радіуса турбіни. Отже, щільність АЕР визначається як [кВт·год/м²]:

$$AEP_{щільності} = \frac{AEP}{R^2}$$

де АЕР — річне виробництво енергії, а R — радіус вітропарку.

МОЕА обробляє обрані параметри конструкції та шукає групу оптимальних рішень, що відповідають набору концепцій Парето та основних принципів генетичного програмування. Обраними проектними змінними є швидкість наконечника співвідношення втулка/наконечник, розподіл хорди та скручування. Такі параметри аеродинамічного профілю, як C_L і C_D функцію кута атаки. Товщина оболонки вздовж лопаті, кут конуса, кут нахилу та кількість лопатей вважаються постійними під час оптимізації.

Числовий алгоритм оптимізації що поєднується з аеропружною та економічною моделлю, що дозволяє оптимізувати автономну квартиру місцеві та офшорні вітрові турбіни для різних видів експлуатації та вітрових умов. Робота використовується для визначення потенціалу сайту спеціальна конструкція для офшорних вітрових турбінних електростанцій шляхом оптимізації конструкції для конкретного місця еталонна вітрова турбіна потужністю 1,5 МВт з регульованою зупинкою з урахуванням висоти втулки, швидкості ротора, ротора діаметр і номінальна потужність як розрахункові змінні.

У 2010 році ретельний опис процедури мультидисциплінарної оптимізації дизайну. Оптимізація реалізована через максимізацію функції заслуг за умов обмежень, що дотримуються відповідного дизайну вимоги. Боттасо та ін. припустив, що вага співвідноситься з вартістю, але не використовує конкретну модель витрат, стверджуючи, що а надійна модель витрат не пропонується громадськості. Багатоцільовий дизайн не сформульований як це оптимальна задача Парето, а скоріше як сукупні витрати, визначені як відношення річних виробництва

енергії до загальної ваги. Завдання оптимізації є вкладеною оптимізацією з обмеженнями проблема, яка має серед своїх обмежень другий набір обмежень. Так як пряме розв'язання проблема може вимагати значних обчислювальних зусиль, Bottasso та ін. застосував послідовну оптимізацію з обмеженнями, де процедуру поділено на дві частини етапи. На першому етапі розраховується максимальний АЕР для мінімальної ваги леза.

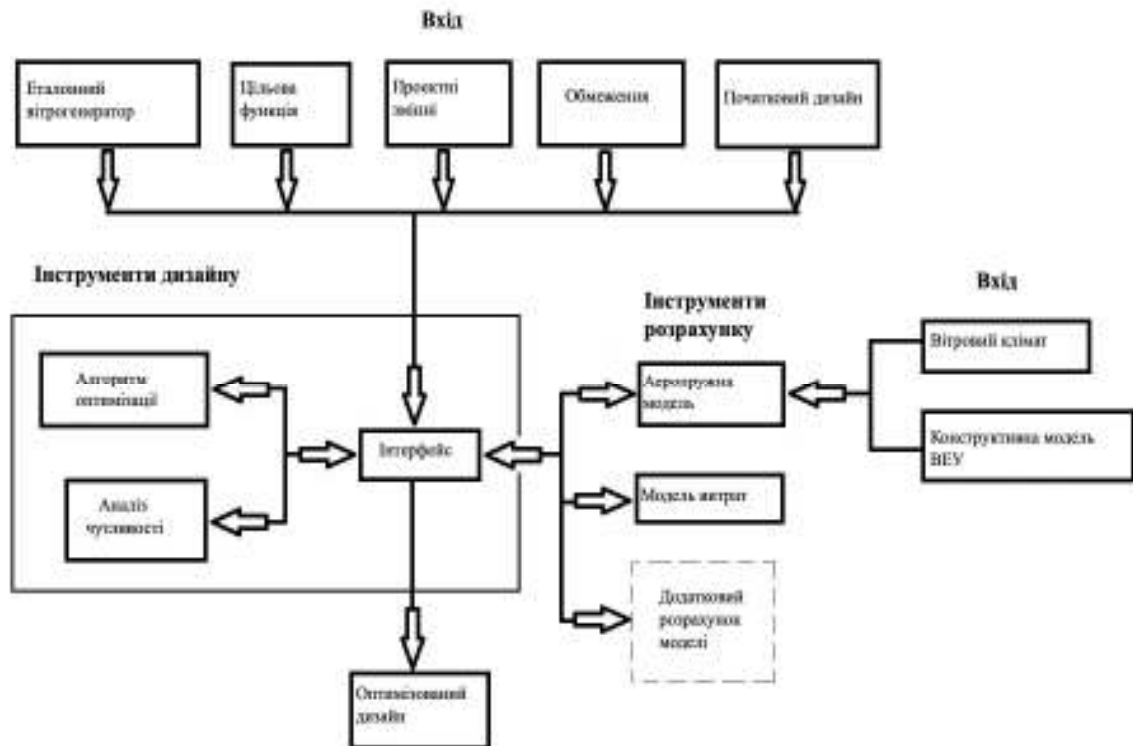


Рис 1.6: Інструмент проектування

Кусяк та ін. представив підхід, керований даними, для вивчення вплив керування турбінами на їх вібрації та вихідну потужність. Автори розробили модель для прогнозування вібрацій і виробленої потужності за допомогою нейронних мереж. Щоб проілюструвати важливість трьох цілей (двох вібрацій і вихідної потужності), зважена сума ці цілі мінімізуються:

$$\min(w_1 y_1(t) + w_2 y_2(t) + w_3 \frac{1}{y_3(t)})$$

де $y_1(t)$ – розрахункова вібрація трансмісії; $y_2(t)$ модель вібрації вежі; $y_3(t)$ - модель розрахункової потужності.

Макі та ін. (Maki, Sbragio, & Vlahopoulos, 2012) провели нову багаторівневу систему алгоритм проектування (MLS) для аналізу вітрової турбіни. Подібний загальний інженерний проект оптимізаційні моделі представлені (рис 1.7).

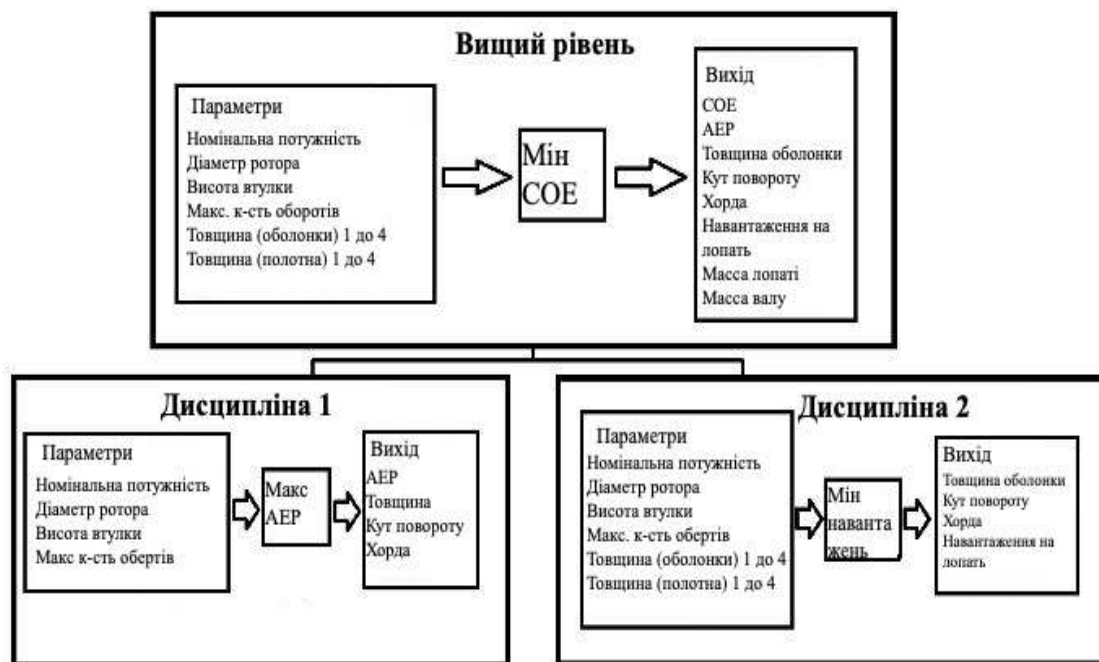


Рис 1.7: Блок-схема схеми оптимізації

Вартість енергії є ціллю загального рівня системи, стверджуючи, що робота, що оптимізувати відношення підйомної сили до лобового опору не відображати найменших витрат енергії. Макі та ін. надихнув їх роботи з інших областей інженерії, які шукають єдиний загальний глобальний оптимальний дизайн, наприклад в морська архітектура, автомобільна інженерія, механічна інженерії, у біомедичній інженерії та інші. Конструктивні параметри (діаметр ротора, швидкість обертання, максимальна номінальна потужність, висота втулки, структурна характеристика лопаті, геометрична характеристика лопаті). розділені на параметри лопаті та параметри ротора, щоб знайти мінімальну вартість енергії всю систему. Аналіз дизайну системи було розроблено за допомогою інструментів NREL з моделлю вартості та масштабування з роботи Fingersh та ін. Дві дисципліни технічного проектування, які складають оптимізацію дизайну вітру турбіна це:

1. Оптимальна конструкція геометрії лопаті для максимального річного виробництва енергії
2. Конструкція леза для мінімального згинального моменту в корені

У переконливому дослідженні, проведеному Ning та ін., автори досліджують вплив різних цільових функцій на якість оптимальних рішень.

Було розглянуто три різні цільові функції оптимізації:

1. Максимізація річного виробництва енергії (AEP)
2. Мінімізація відношення маси турбіни до AEP
3. Мінімізація вартості енергії (CoE)

Нін та ін. припустив, що вагові навантаження додаються до аеродинамічні навантаження при куті нахилу 0 градусів і азимутальному положенні 3 години, яке враховується гідний випадок для крайніх навантажень. Корекція 2D профілю враховує обертальні ефекти у розв'язнику з використанням Du-Selig для підйому та Eggers для тяг. Метод, запропонований Вітерна, був використовується для екстраполяції результатів для діапазону від -180° до $+180^\circ$. Геометрія NREL 5MW використовувався як довідник з попередня оцінка NUMAD для початкової стоянки і матеріали були отримано з бази даних Манделла. А параметризація розподілу хорди, крутки та лонжерона по довжині лопаті завершено для забезпечення ефективності та гнучкості в описі геометрії. Вартість моделі використовувався в [5] був запропонований Fingersh, але деякі були внесені зміни в інструмент оптимізації. Одним із головних коригувань було обчислення маси лопаті з використанням структурних моделей, а не законів масштабування. інший модифікація полягає в тому, що вартість леза мала бути лінійною функцією маси леза та маса вежі була оцінена з використанням аргументів масштабування на основі фізики.

Перша цільова функція Ning та ін. було послідовним максимізація AEP з наступною мінімізацією маси лопаті. AEP може бути проводиться з використанням різних стратегій, а саме:

1. позбавлений обчислення маси лопаті
2. з масовими обмеженнями використанням сурогатів

При максимізації AEP за допомогою першого методу стратегія оптимізації призводить до дизайн кількох лопатей з однаковим AEP для різних мас лопатей; значення існування слабких локальних оптимальних рішень.

Обмеження по масі леза накладалися в різних формах. Одна з можливостей обмеження маси лопаті обмежує згинальний момент кореня. Однак корінь згинається обмеження моменту не змінює рішення, оскільки основною метою є максимізація АЕР, який має тенденцію до зменшення згинального моменту кореня. Інший сурогат надихається з конструкція літака з використанням часткового масштабування ваги крила, де вага крила ділиться на частину, яка масштабується відповідно до площі форми плану, та інша, яка масштабує необхідне навантаження (S. A. Ning & Kroo, 2010). У цій стратегії оптимальне рішення реалізується шляхом зменшення кореня хорда в обмін на більшу хорду в максимальному місці хорди. Аеродинаміка продуктивність леза покращена, але конструкція вартує, тому обмеження напруги на корені леза встановлено. Цей сурогат змінює проблему оптимізації; застосування послідовного алгоритму, де максимізація АЕР супроводжується мінімізацією маси леза. Альтернативний підхід змушує структурний аналіз диктувати форму леза, тоді як аеродинамічний аналіз визначає лише форму профілю; це відоме як форма леза та розчеплення профілю. Такий підхід змінює оптимізацію через структурний аналіз необхідно повторити останній раз, щоб гарантувати виконання обмежень. Результати кожного сурогату порівнювали з мінімальною вартістю енергії рецептури і максимальною зменшення енергії на 0,35% було зафіксовано внаслідок роз'єднання лопаті та аеродинамічного профілю та 0,3% зменшення масштабування порцій. Хоча обидва підходи призводять до зниження вартості енергії, вони все ще поступаються показникам, які поєднують аеродинамічні та структурні характеристики.

Нині та ін. дійшли висновку, що максимізація АЕР, а потім мінімізація маси послідовно неефективна. Коли дизайнери визначилися з вибором матеріалу, розумним вибором буде мінімізувати відношення маси турбіни до річного виробництва енергії. Результати показали, що навіть якщо не використовуються відповідні моделі гондоли та вежі, постійна оцінка їх має бути включена маса; інакше потенційне зменшення маси ротора надмірно підкреслюється, що може призвести до перебільшених аеродинамічних характеристик. Якщо вибрано фіксовану масу башти, потім оптимізація показала хороші результати при

фіксованому діаметрі ротора, але при змінному діаметрі конструкції, були передбачені неточні діаметри. З іншого боку, коли вежі дозволено змінити розмір, слід бути обережним, оскільки маса вежі становить велику частину загальної маси, але вартість вежі є досить малою для загальної вартості. Таким чином, мінімізація співвідношення m/AEP може бути ризикованою надмірне підкреслення ролі вежі, якщо ретельний догляд при будівництві проблеми не становить переслідуючий. Рівнозначно цільова функція може надто стимулювати розв'язувач зменшувати маса вежі за рахунок аеродинамічних характеристик

РОЗДІЛ 2

ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ГІБРИДНИМ ВЕРТИКАЛЬНО ОСЬОВИМ РОТОРОМ

2.1 Математичні моделі задач оптимізації ВЕУ

У попередньому розділі ми представили найбільш релевантні дослідження, проведені в області оптимізації вітрових турбін. Щоб представити ефективний і надійний інструмент для проектування лопатей вітрової турбіни, необхідно провести ретельне дослідження математичних моделей. Відповідно, у цьому розділі ми розглянемо структуру математичних моделей, які використовуються в задачах оптимізації вітротурбін (ЗОВ). Зрештою, цільові функції оцінюються з наступною класифікацією обмежень конструкції вітрової турбіни.

Параметри, які дизайнери прагнуть оптимізувати, за останні роки змінилися. На початку конструктори зосереджувалися на максимізації коефіцієнта потужності

C_P (частка потужності вітру, яку може отримати вітряна турбіна). Ця стратегія оптимізації безпосередньо вплинула на форму леза, що призвело до більших кореневих хорд, більшої конусності та дуже високого кручення леза. Зі збільшенням розміру ротора для виробництва більшої потужності проблеми, що виникають під час транспортування та виробництва, почали заважати конструкції. У міру того, як максимізація коефіцієнта потужності відбувається при певному співвідношенні кінцевих обертів на турбінах з фіксованою швидкістю, що регулюються зривом, тенденція змістилася в бік другого оптимізаційного параметра - максимізації виробництва енергії. Максимізація виробництва енергії досягається протягом певного періоду часу (наприклад, один рік) і спектра швидкості вітру, а не певної швидкості вітру. Поглиблені знання про вплив обертальних ефектів у зриві принесли нове покоління лопатей вітряних турбін з меншими корінними хордами та меншим скручуванням.

Оскільки вітрова енергетика все ще не в змозі конкурувати з традиційними джерелами енергії на викопному паливі та підвищити свою економічність, основна

мета змістилася в бік мінімізації вартості енергії (CoE: співвідношення загальних витрат і річного виробництва енергії). У цій стратегії навантаження перетворюються на витрати за допомогою введення моделі витрат і шляхом незначного зменшення коефіцієнта потужності навантаження на вітрову турбіну можна значно зменшити. Цей тип оптимізації призвів до тонких лез із меншою міцністю. Конструкція ротора вітрової турбіни є складною, оскільки змінні конструкції є динамічними, а деякі мають суперечливу поведінку в рамках визначення CoE. Наприклад, діаметр ротора збільшується для більшого захоплення енергії, але це призводить до більших навантажень, що збільшує вартість енергії.

В [5], автори стверджують, що головною метою вітряних турбін є мінімізація вартості енергії, а не максимізація аеродинамічних характеристик лопаті вітру, щоб зробити енергію вітру конкурентоспроможною з іншими джерелами енергії. Одним із найбільш ранніх підходів було стримування зростання ваги лопаті зі збільшенням її довжини шляхом обмеження довжини хорди та збільшення натомість коефіцієнтів підйомної сили аеродинамічних профілів вітрових турбін. Ця стратегія натхненна тим фактом, що лопаті є одним із найважливіших компонентів вітрових турбін, а їх структура має значний вплив на стабільність і вартість вітряної турбіни. Отже, щоб знизити вартість, вага повинна зменшитися, але для забезпечення стабільності вагу потрібно збільшити. Отже, розробка леза з мінімальною масою леза вимагає правильного балансу між масою та стабільністю. Розміри вітрових турбін стають все більшими, і можна припустити, що гравітаційне та інерційне навантаження стають такими ж значними, як і аеродинамічні навантаження, отже, важливість зменшення ваги. Однак загальними альтернативами для вибору цільової функції є максимізація річного виробництва енергії або коефіцієнта потужності, мінімізація маси лопаті та максимізація тяги та крутного моменту ротора.

У цьому розділі цільові функції, які досліджувалися, розділені на чотири основні категорії: мінімізація вартості енергії, максимізація виробництва електроенергії, мінімізація маси лопаті та група мультидисциплінарних оптимізацій.

2.1.1 Мінімізація вартості енергії

Вартість енергії (CoE) є параметром, який розглядається як головна і загальна цільова функція в наступних джерелах [5-6]. По суті, він виражається як співвідношення між загальною річною вартістю C_{TA} та річним виробництвом енергії. Тому що витрати на експлуатацію та обслуговування складають невеликий відсоток капіталу вартість, а оскільки добре сконструйована вітрова турбіна з низькою вартістю енергії має аеродинамічно ефективний ротор, цільова функція іноді обмежується вартістю ротора.

$$CoE = \frac{C_{TA}}{AEP}$$

У морській вітровій енергетиці мета полягає в тому, щоб максимізувати різницю між вартістю енергії (залежно від очікуваного періоду окупності) і вартістю енергії. Наприклад, Снел стверджує, що в морських вітряних турбінах вартість турбіни не є домінуючою, оскільки інші елементи, такі як фундамент, встановлення та вартість електричного кабелю, є високими, і, отже, розробник шукає більших розмірів ротора для більш економічно приваблива система.

2.1.2 Максимізація рчного виробництва енергії

Метою аеродинамічної оптимізації є відсутність надійної структурної та вартісної моделі. Хоча найпопулярнішою метою поточної оптимізації вітрових турбін є мінімізація вартості енергії, деякі тенденції спрямовані на оптимізацію аеродинамічних характеристик вітрових турбін за допомогою:

1. Максимізація виробництва електроенергії при фіксованій швидкості вітру
2. Максимізація AEP для заданого розподілу вітру

Максимальна річна енергія для даного розподілу була досліджена в наступних джерелах [5-6]. Річна енергія зазвичай розраховується шляхом інтегрування потужності вітряної турбіни в поєднанні з розподілом швидкості вітру (наприклад, Вейбулла) за спектром швидкості вітру.

$$AEP = \int_{V_{min}}^{V_{max}} P(V) f(V) dV$$

тут $P(V)$ – крива потужності вітрової турбіни, $f(V)$ – розподіл швидкості вітру.

2.1.3 Мінімізація маси вітрової лопаті

В [6], мінімальна маса леза була визначена як основна цільова функція. Юречко та ін. розробили чисельну модель лопаті вітрової турбіни для виконання багатокритеріальної дискретно-неперервної оптимізації лопатей вітрової турбіни з масою лопаті як основною цільовою функцією, а критерії переведені в обмеження. Ляо та ін. розробили багатокритеріальну обмежену модель дизайну, яка інтегрує алгоритм оптимізації роя частинок є FAST.

Нін та ін. перевірили мінімізацію співвідношення маси турбіни до АЕР як одну з трьох перевірених цільових функцій. У недавньому журналі Chen та ін. стверджують, що менша маса леза буде сприятливою для покращення довговічності втомі на основі вимог до міцності та жорсткості леза. Тому в якості цільової функції була обрана мінімальна маса лопаті вітрової турбіни.

2.1.4 Формулювання багатоцільової оптимізації

У джерелах [5-8], автори застосовують багатоцільову модель оптимізації.

Гігер і Селіг вибрали для одночасної оптимізації геометрії леза для двох цілей серед наступних варіантів:

- 1. Мінімізуйте витрати на енергію турбіни чи будь-якого компонента
- 2. Збільште АЕР або коефіцієнт потужності
- 3. Мінімальна тяга або крутний момент ротора

АЕР і СоЕ об'єднані за допомогою відповідних ваг у [7]. Але оскільки обидва показники мають суперечливі цілі, варіація АЕР як функції СоЕ є фундаментальною. Це відомо в оптимізації як пошук набору оптимальних проектних рішень Парето.

Беніні та ін. намагаються досягти найкращого компромісу між двома показниками; співвідношення річного виробництва енергії та площі вітропарку, параметр, який максимізується одночасно з мінімізацією вартості енергії.

Боттассо та ін. представили мультидисциплінарну оптимізацію вітряної турбіни як багатоцільову задачу проектування, де компроміс між максимізацією річного виробництва енергії (AEP) і мінімізацією ваги.

Кусяк та ін. представили багатоцільову модель оптимізації, враховуючи три цілі: потужність вітрової турбіни, вібрацію приводу та вежі.

Того ж року Kusiak та Zheng представили двоцільову оптимізацію, компроміс між коефіцієнтом потужності та вихідною енергією вітрової турбіни.

Grujić та ін. розробили мультидисциплінарну процедуру оптимізації дизайну на основі дворівневої схеми оптимізації. Wang та ін. представили багатоцільовий алгоритм, що поєднує максимальний коефіцієнт потужності та мінімальну масу лева.

2.2 Оптимізація

В інженерній оптимізації оптимізація з обмеженнями — це математичний процес оптимізації цільової функції щодо вектора змінних проекту за набору обмежень. Загалом, накладення обмежень на проблему збільшує складність формулювання з ризиком ускладнення дизайну. У цьому розділі ми перелічуємо конструктивні обмеження, які використовуються для оптимізації продуктивності вітрових турбін. Після критичного огляду літератури обмеження, застосовані в дослідженнях проектування вітрових турбін, розділили на три категорії: геометричні, аеродинамічні та фізичні обмеження.

У наступних посиланнях [5-8], використовуються обмеження на зміщення локальних вузлів (u) та/або максимальне відхилення кінчика (δ).

Два набори обмежень переміщення були встановлені Jureczko та ін. Перше обмеження переміщення встановлюється для окремих вузлів у числовій моделі

лопаті для забезпечення глобальної стабільності. Друге обмеження стосується кінчика леза, щоб гарантувати локальну стабільність.

$$u(\vec{x}) \leq u_{\max}$$

$$\delta \leq \delta_{\max}$$

де $u(x)$ і δ – відповідно локальні переміщення та прогин вершини вузлів уздовж моделі лопаті, u_{\max} (0,1 м) і δ_{\max} (0,15 м) – межі.

Ляо та ін. вирішили розглянути один варіант навантаження, щоб передбачити прогин кінчика в оптимальній конструкції; той, який генерує таке ж відхилення кінчика для початкового леза після аналізу FOCUS5.

Нін та ін. розрахували прогин конструкції на номінальній швидкості в положенні азимута 3 години; який вважається найгіршим випадком навантаження, обмежуючи відхилення в межах 10% від прогину вершини базової лінії δ_0 (2,44 м).

$$\delta \leq 1.1 \delta_0$$

Щоб запобігти проблемам безпеки, між кінчиком леза та землею встановлюється просвіт. Наприклад, Diveux та ін. (T Diveux et al., 2001) встановили безпечну дистанцію 15 м.

$$\frac{D_R}{2} + 15 = H_{hub}$$

де D_R — діаметр ротора, H_{hub} — висота втулки.

Подібно до генерованих напруг у конструкції, деформації стримуються в наступних посиленнях, виражені за допомогою нерівності:

$$\epsilon(\vec{x}) \leq \epsilon_{ult}$$

де ϵ – локальна деформація в локальних вузлах моделі лопаті, а ϵ_{ult} – гранична деформація.

Боттасо та ін. обмежує максимальні деформації секційних аеродинамічних профілів, оцінені за допомогою теорії анізотропного променя. Нін та ін. додали умову максимальної деформації, де кінцева деформація ϵ_{ult} обмежена деформацією при 50-річних умовах екстремального вітру, зміненого частковим коефіцієнтом

безпеки для навантажень γ_f і частковим коефіцієнтом безпеки для матеріалів γ_m як відповідно до вимог ІЕС.

$$-\gamma_f\gamma_m\epsilon_{50} \leq \epsilon_{ult} \leq \gamma_f\gamma_m\epsilon_{50}$$

Макі та ін. переконалися, що найбільша деформація леза в кожній із чотирьох вибраних секцій леза не перевищує межі 0,003.

Лі та ін. включили нижню межу міцності, яку можна змінити, змінивши кількість лопатей або більш реалістично, змінивши хорду лопаті.

$$\sigma = \frac{B \int c(r) dr}{\pi R^2} \geq \sigma_{LL}$$

де σ – твердість лопаті, B – кількість лопатей, c – розподіл хорд, R – радіус лопаті, а σ_{LL} – максимальна міцність 0,0345.

2.2.1 Товщина оболонки та профіля

Умова здійсненності накладається на товщину оболонки та поверхню крила лопаті вітрової турбіни в наступних джерелах [7-8]. Наприклад, Беніні та Гоффоло обмежили товщину оболонки половиною товщини профілю лопаті при будь-якому радіусі.

Крім того, Grazzo також встановлює мінімальну товщину задньої кромки 0,25 і мінімальний радіус передньої кромки 0,015с, щоб забезпечити придатність аеродинамічного профілю та забезпечити належне відділення задньої кромки. У [8] було обрано мінімальну товщину аеродинамічного профілю 35% хорди та мінімальну товщину оболонки на задній кромці 1% (з урахуванням виробничих вимог) хорди.

Bizzarrini і Грассо встановлюють мінімальну товщину аеродинамічного профілю 18 % хорди на кінчику та товщину задньої кромки 0,25 % хорди, щоб забезпечити практичність і здійсненність аеродинамічного профілю з моменту виготовлення.

Макі та ін. переконалися, що товщина оболонки t_s і перетинки t_w зменшуються вздовж прольоту. Два додаткових обмеження нерівності щодо їх товщини в термінах максимальної товщини перерізу t були додані наступним чином (рис 2.1):

$$t_s \leq \frac{1}{2}t \quad t_w \leq 2t$$

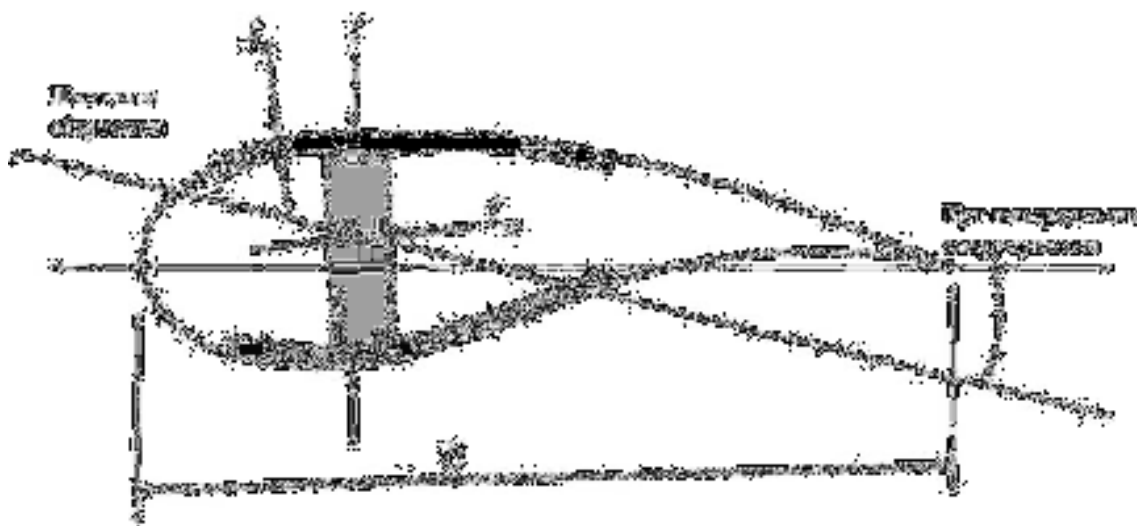


Рис 2.1: Діаграма розрізу лопаті.

Петрон та ін. вставили геометричне обмеження, щоб уникнути перетину верхньої та нижньої поверхонь профілю. Крім того, обмежена зміна кривизни верхньої та нижньої поверхонь профілю. Наприклад, внутрішня частина лопаті розроблена з більш товстим аеродинамічним профілем, щоб витримувати навантаження, тоді як зовнішня частина може бути виготовлена з більш тонкого аеродинамічного профілю.

Два різних аеродинамічних обмеження накладаються для контролю поведінки аеродинамічного профілю поблизу зриву. Перший досягається шляхом встановлення точки розділення, що гарантує надійність роботи аеродинамічного профілю у разі пориву. По-друге, щоб контролювати характер зриву, абсолютне значення нахилу за межами кута зриву обмежується певним пороговим значенням. Так само Грассо неможливо і $0,1c$ на стороні тиску беруться для виникнення відриву потоку (зриву) на аеродинамічному профілі. У конструкції аеродинамічного

профілю для внутрішньої частини лопаті Грассо додає верхню межу 1,8 для коефіцієнта підйому при 15 градусах AoA та максимальне падіння C_L менше 0,3 між 15 і 16 градусами все це, щоб уникнути надмірної продуктивності підйому, яка може призвести до раптового зриву. J_u та ін. обмежують значення коефіцієнта лобового опору при оптимізації геометрії профілю, щоб запобігти його небажаному підвищенню під час оптимізації C_L/CD та C_L профілів мінімальним значенням -0,08 для моментного коефіцієнта C_m щодо обмежити кручення леза на основі порівняльного аналізу, зробленог. Подібним чином, максимальне значення C_m - 0,15 було призначено для умов проектування (6 градусів кута атаки).

Грассо також встановлює мінімальний діапазон у 7 градусів між початком значного відриву та AoA, змушуючи положення точки відриву на стороні всмоктування становити мінімум 90% хорди на 14 ступені AoA. Нарешті, щоб уникнути раптового зриву, проект виконується шляхом фіксації перехідної умови, довжина 0,01с на стороні всмоктування та 0,1с на стороні тиску береться для виникнення відриву потоку (зриву) на профілі. У конструкції аеродинамічного профілю для внутрішньої частини лопаті Грассо додає верхню межу 1,8 для коефіцієнта підйому при 15 градусах AoA та максимальне падіння C_L менше 0,3 між 15 і 16 градусами (на основі [8]) все це, щоб уникнути надмірної продуктивності підйому, яка може призвести до раптового зриву. J_u та ін. обмежують значення коефіцієнта лобового опору під час оптимізації геометрії профілю, щоб запобігти його небажаному підвищенню під час оптимізації $\frac{C_L}{C_D}$ та C_L профілю.

2.2.2 Рівень шуму.

Обмеження рівнів шуму були використані в наступних посиланнях обмежують рівень шуму, який випромінюють лопаті вітрової турбіни, використовуючи напівемпіричні моделі аеродинамічного шуму, запропоновані Бруксом і Лоусоном, які в основному залежать від: течії потоку, кута атаки та турбулентного припливу.

Гігер і Селіг встановили, що основними джерелами аеродинамічного шуму є взаємодія верхівка-вихор/задня кромка, турбулентний приплив і товщина задньої кромки. Аеродинамічний шум можна зменшити, прийнявши правильну форму наконечника і гострішу задню кромку над зовнішньою частиною лопатей згідно . Однак Giguère та Selig вирішили обмежити або зафіксувати кінцеву швидкість ротора, а не використовувати шумову модель, щоб заощадити обчислювальний час. З метою обмеження рівня шуму та звукового забруднення Diveux та ін. зафіксували максимальну швидкість кінця ротора 80 м/с. Подібним чином, різні обмеження для швидкості кінчика лопаті використовуються в посиланнях [8] для обмеження випромінювання шуму.

$$V_{tip} = \frac{\pi N D_R}{60} \leq V_{tip.max}$$

Лі та ін. розглянули ефект стисливості як обмеження рівня шуму та запропонували обмеження на основі верхньої межі числа Маха на кінчику лопаті:

$$MN_{tip} = \sqrt{MN^2 + \left(\frac{\pi n D}{a}\right)^2} \leq 0.3$$

де MN — число Маха, як і швидкість звуку, а n — оберт лопаті за секунду.

Хуан та ін. провели оптимізацію аеродинамічного профілю, щоб мінімізувати рівень шуму шляхом обмеження коефіцієнта підйомної сили та максимального коефіцієнта підйомної сили. Нін та ін. наклали обмеження на максимальну швидкість наконечника як еквівалент обмеження шуму та застосували його безпосередньо в аналізі.

Відокремлення власної частоти лопаті від гармонійних коливань, спричинених обертанням ротора, введено як обмеження для запобігання резонансу. У [9] було застосовано частотне розділення, тоді як у автори змусили деякі власні частоти ω лежати в межах допустимої межі [ωнижній; ωверхній]. Інша вимога полягає в тому, щоб перша лопатева заслінка, ω_{1f} власна частота (і, отже, усі подальші частоти) була більшою, ніж частота трьох обертів на номінальній швидкості ротора ω_{3p} :

$$\omega_{1f} \geq S_f \omega_{3p} (\Omega)$$

з S_f коефіцієнт безпечного розриву між обома частотами.

Нін та ін. припустив коефіцієнт розриву безпеки 1,1 відповідно до вимог ІЕС, тоді як Bottasso та ін. обирає проміжок безпеки 1,2. Подібний підхід був використаний Liao та ін., щоб зменшити вібрацію, розділивши власну частоту лопаті та швидкість ротора, уникаючи резонансу. Це виражається наступним чином:

$$|\omega(x_i, t_i) - \omega^*| \leq \Delta$$

де $\omega(x_i, t_i)$ – частота перших клаптів оптимальної лопаті, ω^* – цільова частота, а Δ – допуск.

Читач має посилання щодо оптимальної частотної конструкції лопатей вітрових турбін, де оптимальна конструкція переслідується з огляду на максимальний проектний критерій частоти.

Нін та ін. обчислили вигин панелі за допомогою простого методу, запропонованого Біром. Запас прогину розраховується як:

$$b_m = \frac{\epsilon_{50} \gamma_f - \epsilon_{cr}}{\epsilon_{ult}}$$

де b_m — межа вигину, ϵ_{50} деформація при 50-річних екстремальних умовах, γ — коефіцієнт безпеки, ϵ_{cr} критична деформація на прогин, ϵ_{ult} — гранична деформація.

Аналіз втоми лопатей вітрової турбіни, який включає аналіз підрахунку циклу дощового потоку, визначення діаграми Гудмена та деградацію Майнера, наведено в [8]. Нін та ін. [9] розраховали кореневу міцність на втому протягом 20 років експлуатації. Щоб спростити оцінку втоми, крива S-N для кореневої ділянки параметризована як:

$$S_f = aN^b$$

де b приймається рівним -10 (композитні матеріали, армовані склом, а a відкалібровано таким чином, щоб через 20 років коренева напруга мала 10% запас

до напруги втоми ($\sigma_{root} = 0.9S_f$).

Нін та ін. стверджує, що повний аналіз втоми протягом усього терміну служби є складним процесом, натомість більш простим підходом є використання гравітаційних навантажень, оскільки вони можуть бути більш значущими, ніж аеродинамічні навантаження, пов'язані з клапанами, для визначення втоми великих леза. Ляо та ін. використовували коефіцієнт міцності на втому (FSF), щоб оцінити, чи є лезо безпечним чи ні. Коли FSF більше 1, структура леза є безпечною та обчислюється FOCUS5.

У процесі оптимізації структурної конструкції леза важливо відповідати вимогам структурної міцності та запобігати поломці. Оріфічі та ін. представили огляд моделей руйнування композиційних матеріалів.

Боттасо та ін. включили обмеження для шкоди, спричиненої навантаженнями під час турбулентного вітру відповідно до розрахункових умов навантаження. Критерій багатоосьового пошкодження застосовано згідно з посиланнями. Збиток розраховується для кількох точок для поперечних перерізів, що цікавлять, і формується вектор збитку, який обмежений верхньою межею 1.

Рішення можна прийняти за погодженням [10], що найбільш відповідний вибір цільових функцій у вітрових турбінах спрямований на мінімізацію вартості енергії, а не на максимізацію аеродинамічних характеристик. Головним чином це пов'язано з тим, що ми все ще вимагаємо, щоб вітроенергетичні системи конкурували з іншими джерелами енергії.

Незважаючи на те, що мінімальна вартість енергії була обрана як єдина головна мета в більшості розглянутих нами статей, багато хто вирішував оптимізацію продуктивності вітряних турбін, використовуючи багатоцільовий процес у процесі оптимізації, використовуючи методи оптимізації Парето для лікування конкуруючих цілей з компромісними кривими, які виявляють слабкі сторони, аномалії та винагороди цілей розробникам вітрових турбін. Таким чином, це вважається корисним на ранній стадії проектування вітрової турбіни, як мінімальна вартість енергії, так і максимальне річне виробництво енергії. З цих причин ми можемо передбачити майбутню оптимізацію проблеми будуть поставлені як мультидисциплінарні (або багатоцільові) проблеми. Фактично, у нашому огляді

ми помітили, що менше 25% проблем оптимізації продуктивності вітрових турбін було вирішено за допомогою багатоцільового алгоритму.

Розробникам не завжди доцільно обумовлювати точні характеристики турбіни до затвердження проекту. Це значною мірою через різні непередбачувані фактори та впливи, такі як фізичні, геометричні та аеродинамічні обмеження. Ретельна оцінка необхідна для вивчення вищевказаних проблем і визначення остаточної конструкції лопаті вітрової турбіни. Відповідно, розробник може шукати гнучкості в конструкції блейд-сервера, і кожне середовище може ідентифікувати кілька потенційно придатних моделей.

Однією з ключових складнощів інженерної оптимізації є розробка функції пристосування. Маючи справу з обмеженими проблемами, такими як WTOP, ми повинні знайти засіб для оцінки близькості нездійсненого рішення до можливого регіону. Тому основна пропозиція авторів у наступному розділі полягає в тому, щоб запропонувати техніку обробки обмежень, яка зберігає поняття GA. У поєднанні з інструментом попереднього проектування Co-Blade, запропонованим генетичним алгоритмом, графічний інструмент winDesign дозволяє розробникам розраховувати оптимальну конструкцію лопатей вітрових турбін за набором різних обмежень.

РОЗДІЛ 3

ІНСТРЕМЕНТИ ДИЗАЙНУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОПАТЕЙ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ГІБРИДНИМ ВЕРТИКАЛЬНО- ОСЬОВИМ РОТОРОМ

У попередньому розділі ми наголошували на двох оригінальних внесках в обчислювальний інтелект головним чином і в генетичних алгоритмах конкретно. Запропонований метод VSH дозволяє нам мати справу з обмеженнями дизайну WTOP без необхідності визначати штрафну функцію придатності. Тоді як методи KGA сприяють більш ефективному процесу вибору під час пошуку оптимальних лопатей вітряних турбін.

У цій главі ми зосередимося на існуючих кодах проектування лопатей вітрових турбін, інструментах і програмних розв'язувачах, які зіграли важливу роль у створенні запропонованої платформи winDesign. Ми розглядаємо комерційні чисельні інструменти та розв'язувачі, які обчислюють:

1. Аеродинаміка ротора (BEM і CFD);
2. Коди підготовки аеродинамічного профілю;
3. Моделі продуктивності ротора;
4. Вирішувачі аеродинамічних навантажень;
5. □ Програмне забезпечення для проектування конструкції вітрової турбіни.

3.1 Огляд аеродинаміки вітроенергетичних установок

Однією з основних дисциплін вітроенергетики є механіка рідини, точніше аеродинаміка. Необхідно описати поле течії навколо ротора, з якого система перетворення відбирає енергію. Крім необхідності опису продуктивності вітряної турбіни, необхідний належний опис режимів потоку для розвитку взаємодії з деформуючою структурою (аеропружність). Крім того, це дозволяє розробникам зменшити виробництво шуму та слід за ротором, який необхідно оцінити, щоб визначити поле припливу для нижніх роторів. У цьому розділі ми розглядаємо сучасний стан аеродинаміки ротора, який використовується в чисельних

інструментах для дослідження дизайну вітрових турбін. Вирішувачі діляться на два класи:

1. Теорія імпульсу лопатевого елемента (BEM).
2. Обчислювальна гідродинаміка (CFD)

3.1.1 Теорія імпульсу лопатевого елемента

Метод імпульсу походить від Фруда, Ланчестера, Беца і Глауерта, де потоки розглядаються в контрольному об'ємі, що складається з потокової труби, що оточує виконавчий механізм. диск. Бетц вивів знамениту межу, межу Беца, яка стверджує, що максимальна енергія, яку можна отримати з вітру, становить $16/27$ його кінетичної енергії. Ця межа передбачає відсутність осьового тиску через розподіл тиску на зовнішню трубу та відсутність радіальних сил на потік. Згідно з ван Куїком, друге припущення не виконується, далі межа стає трохи вищою за межу Беца.

Пізніше Вілсон і Ліссаман запропонували метод, що поєднує теорію імпульсу лопатевого елемента та теорію вихру, припускаючи мале збурення. Ця пізніша модель використовувалася в багатьох інструментах для розрахунку аеродинамічних навантажень через її точність, простоту та легкість інтуїтивного розуміння. Чудове обговорення теорії вітрових турбін як для турбін з горизонтальною, так і з вертикальною віссю представлено Фрізом.

Метод осьового моменту має серйозні недоліки, і було представлено кілька вдосконалень. Однією з серйозних проблем є поведінка повороту або зміщення повороту роторів з регульованим поворотом і роторів із вільним поворотом, проблема, про яку повідомлялося як про другу провідну причину несправностей вітряних електростанцій у Каліфорнії. Хансен та Шеперс та ін. пропонують, щоб на додаток до застосування базової теорії кільцевого моменту до осьової складової швидкості вітру застосовувався азимутальний розподіл який є функцією кута повороту. Форма цього розподілу може бути від Глауерта або навіть Гаонкара та

Петерса . Читачі, зацікавлені в удосконаленні моделей відхилень від повороту, повинні переглянути посилання [10] для отримання більш детальної інформації.

Іншим неправильним припущенням методу осьового моменту є незалежність потоку від часу. Снел та ін. виправдовує відсутність глобальної рівноваги або також називається рівновагою хвиля. Насправді ротор змінюється в часі в результаті зміни швидкості вітру, напрямку вітру, ефектів зсуву вітру, динаміки лопаті та контролю. Крім того, метод імпульсу має серйозний недолік під час високого навантаження на ротор, коли під час цього режиму значна кількість кінетичної енергії перетворюється на великомасштабну турбулентність; відомий як «турбулентний стан неспанья». Зазвичай це вирішується шляхом введення емпіричного поправочного коефіцієнта між осьовими силами та коефіцієнтом індукції.

Для отримання більш детальної інформації щодо коригувальних коефіцієнтів лопаті вітрової турбіни читач може звернутися до Шеперса , Вілсона та Лассамана , Прандтля та Бетца, Shen та ін. , Кліфтон-Сміт і Хоадлі. Незважаючи на те, що існують сучасні виправлення, рішення щодо їх введення в коди змінюється ризиком збільшення складності проблеми з точки зору необхідного часу обчислення.

Можна очікувати, що теорія імпульсу лопатевого елемента залишиться корисною аеродинамічною моделлю для аеропружних розрахунків, але вдосконалення будуть внесені на основі чисельної перевірки, яку нададуть останні обчислювальні розрахунки потоку рідини. Методи зворотного проектування, такі як Larrabee і Adkins та ін., притаманні обмеження теорії елементів лопаті та невизначеності у прогнозуванні аеродинамічних сил можуть сягати 20 %. Ця помилка в основному пов'язана з основними припущеннями, зробленими в традиційній теорії ВЕМ, такими як радіальна незалежність ефектів потоку, недбалість ефектів потоку від повороту, двовимірний потік над лопаткою. Нещодавно впроваджені та вдосконалені математичні моделі для гідродинаміки вітрових турбін на основі теорії імпульсу лопатевого елемента .

3.1.2 Розв'язувачі обчислювальної гідродинаміки

Останніми роками поширеним способом проектування ротора є створення проекту ротора за допомогою інструменту попереднього аналізу за допомогою відносно простого методу, такого як ВЕМ, а потім його оцінка за допомогою аеропружного коду. Рішення про проведення подальшої оцінки за допомогою вирішувача CFD залежить від ефективності чорнової моделі та досвіду розробника. З початку 1990-х років методи CFD для вітрових турбін і скорочені моделі, де об'ємні сили включені в потік, були представлені окрім комерційно доступних кодів CFD («ANSYS, CFX,» ; «ANSYS, Fluent,»). У процесі оптимізації важливо отримати точне значення цільової функції. Ми можемо узагальнити ефективність різних методів розрахунку таким чином:

1. Прямий Нав'є-Стокс (DNS);
2. Симуляція Ейлера (розрахунок нев'язких);
3. Усереднене чисельне моделювання за Рейнольдсом (RANS);
4. Симуляція великих вихрів (LES);
5. Симуляція відокремленого завихрення (DES).

Найбільш точним способом аналізу поля глобального потоку для вітрових турбін було б використання рівнянь Нав'є-Стокса, що залежать від часу. Однак це вимагає вирішення складної системи рівнянь. Насправді для прямого Нав'є-Стокса (DNS) для відповідного значення Рейнольдса знадобиться кілька століть обчислювального часу. Першу роботу, виконану NASA-NREL із застосуванням методу DES.

Найпоширеніший розв'язок рівнянь Нав'є-Стокса досягається шляхом поділу потоку на середню частину та частину, що коливається. Потім рівняння усереднюються; це називається методом Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS). Читач має посилання на літературу [11] для більшого застосування методу RANS в оптимізації аеродинамічних профілів і лопатей вітрових турбін. Метод RANS дає точні коефіцієнти підйомної сили та опору при малому куті атаки перед відривом.

Для сильно відокремленого потоку виникають проблеми з методом RANS, тому рекомендується використовувати Large Eddy Simulation (LES). За даними Mellen та ін. "коли вимоги до роздільної здатності визначені, LES здатний

виробляти правильну загальну поведінку потоку". Подобиці надаються щодо структури потоку та його поведінки, що залежить від часу, які недоступні з розрахунків RANS. Однак виконання вимог роздільної здатності призводить до розрахунків, які є надзвичайно дорогими та наразі непридатними для звичайного використання». Цей останній метод поєднується з RANS, де RANS відповідає за приєднаний потік, тоді як LES вирішує дальній потік; метод називається симуляцією відокремлених вихрів (DES).

Йогансен та ін. показали, що обчислення DES не покращили передбачувані характеристики леза, оскільки LES займає занадто багато часу обчислення. Замість застосування рівнянь Нав'є-Стокса ми можемо використовувати рівняння Ейлера; яка є нев'язкою формою Нав'є-Стокса. Припущення про постійну густину справедливе для аналізу вітряних турбін, оскільки швидкість потоку має максимальну граничну швидкість вітру приблизно 25 м/с, навіть на кінчику лопаті, де швидкість кінчика може досягати 100 м/с. Отже, приймаються припущення щодо течії, де процес створення, дифузії та розсіювання завихреності не розглядається.

Для низьких кутів атаки, коли потік прикріплений до аеродинамічного профілю, розрахунок Ейлера дає розумний розподіл коефіцієнта тиску, але коефіцієнти опору C_D мають тенденцію бути заниженими через недбалість в'язкого опору. Мадсен оцінив рівняння Ейлера для осесиметричного випадку. Особливим рішенням рівнянь Ейлера є метод вихрового сліду.

Останнім часом метод вільного вихрового сліду був застосований до вітряних турбін. Він більш вимогливий, ніж ВЕМ, з точки зору часу обчислення. Поле потоку навколо ротора, як вище, так і вниз за течією, можна моделювати за допомогою методів в'язкості, якщо врахувати завихреність. На практиці цей метод використовують для дослідження індукції в умовах відхилення. Для отримання більш детальної інформації щодо методу хвилі, застосованого до вітряних турбін, а застосування методу вільного вихрового сліду можна знайти в посиланнях [10].

Альтернативою методу сліду є метод поля, де рівняння Ейлера розв'язуються з додаванням завихреності, створеної лопаттю. Загалом, процесорний час, необхідний для роздільної здатності методів вихрового хвилювання, все ще

великий, тому необхідно зробити подальші спрощення. Оскільки слід розширити щонайменше 2 діаметри ротора позаду площини ротора, використовується гібридний метод, такий як REVLМ, який повідомив про 75% скорочення комп'ютерного часу з помилкою 5%. Цей метод припускає, що для одного діаметра ротора за потоком потік розглядається як вільний слід, а решта – як заданий слід.

Додатковим розв'язувачем Ейлера є метод асимптотичного потенціалу прискорення, розроблений Делфтським технологічним університетом для вертольотів. Його розширили Bussel та ін. для вітрових турбін. Метод передбачає невеликі збурення основного потоку, припущення, яке справедливо для вітрових турбін, а не для вертольотів. Цей метод, подібно до методів вихрового сліду, застосовувався головним чином для дослідження полів потоку з метою вдосконалення методу імпульсу.

Вище наголос був зроблений на моделюванні нестационарної аеродинаміки секцій лопаті, але іншою важливою областю, яка потребує розгляду при моделюванні вітрової енергії, є моделювання сліду ротора. Сліди вітрових турбін були темою оцінки з 1970-х років, коли інтерес до енергії вітру став більш значним.

Коли йдеться про смуги вітрових турбін, зазвичай розрізняють два типи: ближні та дальні смуги. Близький слід береться в області безпосередньо за ротором. Вермеєр та ін. вважає, що область ближнього сліду простягається на один або два діаметри ротора вниз за течією. Дальній слід – це область за межами ближнього сліду, і увага приділяється впливу на вітряні турбіни вітрової електростанції (до 10 діаметрів ротора нижче за течією). Таким чином, ближній слід зосереджений на продуктивності процесу вилучення потужності з кінетичної енергії у вхідному потоці, тоді як дальній слід більше фіксований на взаємному впливі вітрових турбін, розподілених у фермі. З іншого боку, через вартість землі та будівельних робіт, вітряні турбіни прагнуть будувати якомога ближче одна до одної.

Вітрові турбіни, встановлені на великих вітряних електростанціях, створюють дві основні проблеми: зниження виробництва електроенергії через дефіцит швидкості в сліді та збільшення динамічних навантажень через високі рівні турбулентності. За даними Sanderse та ін., втрати потужності турбіни, розташованої

нижче за потоком, можуть досягати 40 % в умовах повного хвиля. Шейнман і Розен показали, що нехтування ефектом турбулентності сліду у вхідному потоці може призвести до завищення потужності турбіни більш ніж на 10%. Втрати потужності через нижчу швидкість падаючого вітру у вітряних турбінах, згрупованих у вітрових електростанціях.

У ранньому підході передбачалося, що турбіни діють як розподілені елементи шорсткості, що змінюють навколишній атмосферний потік. Однак найпоширенішим підходом є розгляд кожного окремого сліду вітрової турбіни та вивчення його взаємодії та суперпозиції на сусідніх, таким чином розраховуючи детальне поле потоку, а не поле потоку, усереднений розподіл.

Креспо та ін. розглянули методи моделювання сліду як для вітрових турбін, так і для вітрових електростанцій. Вермеєр та ін. переглянули всі попередні експерименти та аналізи потоку через ротор вітрової турбіни. З огляду зрозуміло, що було проведено лише кілька експериментів у аеродинамічній трубці щодо потоку сліду за ротором.

Sanderse та ін. представили важливий огляд числового розрахунку аеродинаміки сміття вітрових турбін, досліджуючи різні моделі турбулентності, які використовуються для вивчення впливу сміття на вітряні турбіни. Нарешті, моделювання та вимірювання хвилі вітрових турбін в аеродинамічних трубах було проведено за допомогою анемометрії з гарячим дротом (HWA) або вимірювання швидкості зображення частинок (PIV) у наступних дослідженнях.

3.2 Числові інструменти проектування ВЕУ

Було розроблено багато графічних зручних інструментів проектування з метою підготовки аеродинамічного профілю, оптимізації роботи ротора та аеропружного моделювання вітрових турбін з горизонтальною віссю.

Нижче ми перелічуємо найбільш релевантні чисельні інструменти для проектування ВЕУ.

3.2.1 Коди підготовки аерійного крила

Для розрахунку навантажень на лопаті методи ВЕМ вимагають коефіцієнтів підйомної сили та лобового опору розподілу профілю. AirfoilPrep (С. Hansen) — це проектний код, розроблений Windward Engineering & NREL, який використовується для створення файлів даних аеродинамічного профілю з 2D-даних, необхідних для аеродинамічного програмного забезпечення, такого як WT-Perf і AeroDyn. Ключовою особливістю AirfoilPrep є коригування 2D-даних для збільшення обертання: ефект затримки зриву за Дю-Селігом та корекцією Еггерса для опору. Крім того, Вітерна і Янецке або теорія плоскої пластини використовується для екстраполяції коефіцієнтів при великих кутах атаки.

Кілька кодів панелей використовуються дизайнерами при проектуванні та аналізі аеродинамічних профілів. Код Еплера був використаний Танглером і Сомерсом для розробки серії SERI/NREL S8xx. Тим не менш, найбільш стандартним кодом є Xfoil, розроблений Drela. Подібним чином Танглер і Коцурек (James Tangler & Kosurek, 2005) пропонують екстраполяцію поштового зриву і зазвичай використовується. Xfoil використовується в роботі з оптимізації.

Альтернативою Xfoil є код Rfoil, який гарантує кращу конвергенцію навколо максимуму, оскільки різні профілі швидкості для турбулентного прикордонного шару. Коди Xfoil і Rfoil використовуються в дослідженнях для розрахунку коефіцієнта тиску (C_P) для кожної секції лопаті. Відповідно до визначення коефіцієнта тиску можна обчислити тиск p .

$$C_P = \frac{\rho - \rho_\infty}{1/2 \rho U^2}$$

де ρ — густина повітря 1,205 кг/м³; C_P — коефіцієнт тиску; ρ_∞ — стандартний атмосферний тиск; U — відносна швидкість (комбінація осьової швидкості та тангенціальної швидкості, розрахована з теорії ВЕМ).

Код, подібний до XFOIL, названий Javafoil, двовимірний комп'ютерний код для аеродинамічного аналізу, який розв'язує рівняння потоку над аерофоліром за допомогою методу граничного інтегралу.

3.2.2 Моделі роторів

Гігер і Селіг отримують свої прогнози ефективності від PROPID; метод зворотного проектування для HAWT, який базується на теорії БЕМ. Дані аеродинамічного профілю модифікуються в PROPID, щоб включити тривимірні ефекти з використанням моделей затримки зупинки. WT-Perf — це програмне забезпечення, яке обчислює обчислення в стаціонарному стані (без динаміки), яке обчислює потужність, крутний момент, тягу та згинальний момент кореня лопаті на основі теорії БЕМ. WT-Perf включено в процес оптимізації.

Другий код під назвою HARP_Opt (оптимізація продуктивності ротора з горизонтальною віссю), розроблений Сейлом, використовує багатооб'єктивний генетичний алгоритм і теорію БЕМ для розробки HAWT і гідрокінетичних роторів. Теорія БЕМ WT_Perf використовується для прогнозування показників продуктивності ротора. У HARP_Opt цільова функція може бути одиночною або множинною (максимізація АЕР або/і мінімізація маси лопаті). Оскільки це суперечливі цілі, набір оптимальних рішень за Парето ідентифікується за допомогою HARP_Opt. Цей код інтегровано в процес проектування оптимізації. У PROPID використовується для обчислення зміни аеродинамічної ефективності в залежності від співвідношення швидкості кінчика лопаті.

Щоб визначити загальний рівень звукового тиску, Хуан та ін. використовують NAFNoise, Ramachandran та ін. використовують AIBM (подібно до інтегрального методу FW-H) у поєднанні з CFD для оцінки аеродинамічних та аероакустичних характеристик секцій аеродинамічного профілю.

3.2.3 Рішення аеродинамічних навантажень

AeroDyn — ще одне програмне забезпечення NREL, засноване на роботі Пітерса та Хе, яке використовується для обчислення аеродинамічних навантажень на лопаті вітрової турбіни як частини аеропружного рішення. AeroDyn містить дві моделі для розрахунку ефекту слідів вітрової турбіни: теорію BEM і теорію узагальненого динамічного сліду (GDW). AeroDyn інтегровано та використовується в процедурі оптимізації.

Кенуей та Мартінс розробили BEM-код під назвою ruBEM на основі теорії Хансена. Код було розширено для конічних роторів за допомогою моделі Міккельсена та ін.

Іншим методом імпульсу лопатевого елемента для аналізу продуктивності вітрової турбіни є CCBBlade, розроблений Ning (що означає Continuity and Convergence). CCBBlade інтегрує нову стратегію рішення, яка є надійною з кращою конвергенцією на основі ϵ , що дозволяє дизайнерам застосовувати CCBBlade у програмах оптимізації на основі градієнта. Цей код було додано в процесі проектування оптимізації.

3.2.4 Геометричний опис

Одним із найважливіших компонентів чисельної оптимізації є вибір проектних змінних і параметризація цих змінних. Щоб зменшити кількість необхідних параметрів для опису форми профілю без втрати інформації про геометричні характеристики профілю, запропоновано кілька математичних формулювань. Наприклад, загальні параметричні криві та аналітичні функції, які використовуються в описі геометрії при оптимізації вітрових турбін:

- *Крива Безьє
- *Опис сплайнів
- *Опис B-сплайнів
- *Хікс і Хенне
- *Квадратні рівняння
- *Комбінація еліпсів і сплайнів

3.3 Програмне забезпечення для проектування структур вітротурбіни

Дуже небагато комерційних програм на основі кінцевих елементів виявилися надійними інструментами для структурного аналізу вітрових турбін. Тим не менш, вони поділяються на два основних типи кодів: статичні (не залежать від часу) і динамічні (області, що залежать від часу).

3.3.1 Статичні інструменти

Юречко та ін. застосували комерційне програмне забезпечення MSC Patran для обчислення центрів зсуву, центроїдів, моментів інерції та площ перетину.

Комерційне програмне забезпечення кінцевих елементів, таке як ANSYS ("ANSYS"), ABAQUS (Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, 2001) і SolidWorks, використовується для структурного аналізу компонентів вітрових турбін.

Було розроблено інструмент структурного аналізу під назвою pBEAM (Polynomial Beam Element Analysis Module), який використовує балкові елементи Ейлера-Бернуллі з 12 ступенями свободи (трьома поступальними і трьома обертальними на кожному кінці елемента), щоб дізнатися більше. Цей код використовувався для структурного аналізу лопаті вітрової турбіни в наступних посиланнях.

Внутрішній код структурного аналізу під назвою ruFEA використовується Kenway і Martins. Він моделює внутрішній лонжерон лопаті вітрової турбіни з використанням елементів Тимошенка з 6 ступенями свободи. Подібний код створили Liao та ін. для перевірки коду Prelayers, який обчислює властивості секційних шарів за допомогою PreComp.

Автори [11] використовували NuMAD; програмне забезпечення на базі FEM для структурного аналізу лопатей ротора. Крім того, два коди RotorOpt і FOCUS5 були включені як необхідні середовища та інструменти для оптимізації та

проектування вітрової турбіни. Оптимальні результати були перевірені FOCUS5 у наступних посиланнях.

PreComp — це програмне забезпечення, розроблене NREL, яке обчислює властивості перетину композитних лопатей для моделей балкових типів. Вхідними даними для PreComp є зовнішня форма леза та внутрішнє укладання композитних пластин, і використовується модифікована теорія ламінату (CLT) із підходом зсувного потоку. При розрахунку напружень всі навантаження та інерційні властивості передаються пружному центру та головним тузам кожної ділянки. Деякі з його припущень та обмежень: лише прямі лопаті, перетинки вважаються перпендикулярними до хорди, тонкостінні замкнуті секції, відсутність поперечного зсуву та відсутності викривлення в площині. PreComp включено в процес проектування.

Недавня програма під назвою BLADOPT, наступниця PVOPT, є комп'ютерною програмою чисельної оптимізації для проектування лопатей BEU. Акорд і кручення оптимізовані для мінімізації витрат енергії.

Для обчислення форм моди та власних частот лопаті та вежі використовується програмне забезпечення, розроблене NREL під назвою VModes. Використовуючи 15 ступенів свободи та набір лінеаризованих рівнянь, форми мод виводяться за таких припущень: пряма лопатка, консольний корінь лопаті, ізотропний матеріал і відсутність зв'язків між матеріалами.

3.3.2 Динамічні інструменти

Аеропружна модель, яку використовували Fuglsang та ін., це FLEX4, розв'язувач навантажень у часовій області на основі теорії лопатевих елементів. Додаткові ефекти, такі як тіні башти, динамічний зрив, зсув вітру та турбулентність вітру, були включені для більш ефективного коду конструкції вітрової турбіни. Хілмер та ін., генерують випадки навантаження за допомогою програмного забезпечення FLEX5.

Іншим аеропружним комп'ютерним інструментом розробки для ВЕУ є FAST від NREL. Код моделює вітрову турбіну як комбінацію гнучких і жорстких тіл (24 DOF для 3-лопатевої вітрової турбіни, 22 DOF для 2-лопатевої турбіни). Аеродинамічні сили вздовж лопаті створюються AeroDyn. FAST використовується в наступних посиланнях.

Додатковим проектним кодом для дослідження динаміки вітрової турбіни є MSC. ADAMS (ADAMS, 2005) (розшифровується як автоматичний динамічний аналіз механічних систем). Інтерфейс під назвою MSC.ADAMS-to-AeroDyn (ADAMS2AD) (Laino & Hansen, 2001) був розроблений NREL для аналізу складних динамічних моделей вітрових турбін у MSC.ADAMS, оскільки ADAMS дозволяє користувачеві створювати власні бібліотеки динамічних посилань (DLL).) забезпечення прямого зв'язку між програмою та підпрограмами користувача. Отже, комплексну динаміку можна аналізувати в MSC. ADAMS, використовуючи можливості аналізу аеродинаміки AeroDyn.

3.4 Інструменти Co-Blade

Co-blade — це інструмент, який допомагає розробникам обчислювати структурні властивості лопаті вітрової турбіни. Він використовує комбінацію класичної теорії ламінування з теорією Ейлера-Бернуллі, а для виконання аналізу використовується теорія зсувного потоку, застосована до композитних балок. Цей підхід дозволяє здійснювати безпосереднє обчислення структурних властивостей даного леза протягом кількох секунд після виконання.

У цьому розділі ми розглядаємо основні елементи, які були витягнуті з Co-Blade для створення графічного інструменту winDesgin.

Фітнес-функція, яку мінімізує Co-Blade, — це маса леза, яка штрафується за рахунок максимального напруження, прогину, прогину та власної частоти. Конструкційними змінними є ширина по хорді лонжеронного ковпака у внутрішньому та зовнішньому розташуваннях, товщина матеріалу «корінь лопаті»

та товщина пластин усередині LEP, TEP, лонжеронного ковпака та перегородок уздовж довжини. леза. Вони перераховані в таблиці XIII нижче.

Спочатку лопатка зображується у вигляді консольної балки з крильцевими і боковими вигинами, осьовим відхиленням і пружним скручуванням. Додатковий зв'язок між вигином, розтягуванням і крученням враховується через зміщення між центром зсуву балки, центром натягу та центром маси від осі кроку лопаті (див. Помилка! Довідкове джерело не знайдено.). Передбачається, що поперечні перерізи балок є тонкостінними, замкнутими та одно- чи багатокомірковими, а периферія кожного поперечного перерізу балок дискретизована як з'єднання плоских композитних ламінатів.

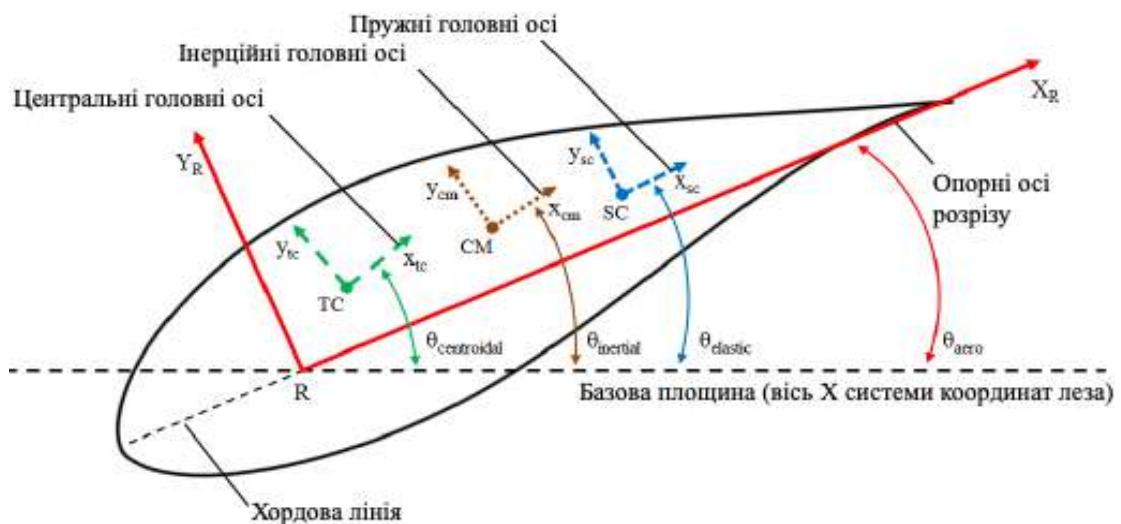


Рис 3.1: Орієнтація систем лопаті.

Що стосується теорії пучка Ейлера-Бернуллі, поперечні перерізи балок вважаються неоднорідними, і кожна властивість матеріалу залежить від розташування в кожному поперечному перерізі. Структурний аналіз кожної окремої частини композитної балки характеризує ефективні механічні властивості, обчислені за допомогою класичної теорії ламінування. Потім кожна окрема частина поперечного перерізу вносить свій внесок у властивості загального перерізу композитної балки. Після розрахунку глобальних властивостей поперечного перерізу прогини та ефективне осьове напруження балки (σ_{zz}) і ефективне

напруження зсуву балки (τ_{zs}) тепер можна обчислити за припущеннями балки Ейлера-Бернуллі.

Було розроблено багато графічних зручних інструментів проектування з метою підготовки аеродинамічного профілю, оптимізації робочих характеристик ротора та аеропружного моделювання вітрових турбін з горизонтальною віссю. У цьому розділі ми розглянули сучасні розв'язувачі потоку вітрових турбін, чисельні інструменти та програмне забезпечення для проектування. Чисельний інструмент під назвою Co-Blade, який використовує комбінацію класичної теорії ламінування (CLT) з теорією Ейлера-Бернуллі та теорією зсуву, застосованою до композитних балок, послужив основою для winDesign.

РОЗДІЛ 4

БАГАТООБЄКТИВАНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВЕУ.

Термін оптимізація означає пошук одного чи кількох можливих рішень, які відповідають екстремальним значенням однієї чи кількох цілей. Методи оптимізації важливі в наукових експериментах, особливо в інженерному проектуванні та прийнятті рішень. Коли проблема полягає в пошуку оптимального рішення однієї цілі, це завдання називається одноцільовою оптимізацією.

Існує багато градієнтних і евристичних алгоритмів, які вирішують одноцільові проблеми оптимізації. Окрім методів детермінованого пошуку, галузь оптимізації розвинулася завдяки введенню стохастичних алгоритмів пошуку, які прагнуть знайти глобальне оптимальне рішення з більшою легкістю. Серед них еволюційні алгоритми (ЕА) імітують еволюційні принципи природи і зараз стають популярними алгоритмами для вирішення складних задач оптимізації.

У інженерній оптимізації розробники іноді зацікавлені в пошуку одного або кількох оптимальних рішень, коли мають справу з двома або більше цільовими функціями. Це відомо як багатоцільова оптимізація, і насправді більшість реальних проблем оптимізації включають кілька цілей. У цьому випадку різні рішення створюють компроміси або конфліктні ситуації між різними цілями. Багатоцільовій оптимізації зазвичай приділяється недостатньо уваги, і цьому є розумне пояснення. Більшість методів, які вирішують задачі багатоцільової оптимізації (МООР), перетворюють кілька цілей в одну функцію. Тому більшість зусиль було вкладено в удосконалення алгоритмів одноцільової оптимізації. Дослідження зосереджені на перетворенні багатоцільових проблем у одноцільові, конвергенції, підходах до обробки обмежень та швидкості цих одноцільових методів.

Давайте обговоримо фундаментальну різницю між одноцільовою оптимізацією та багатоцільовою оптимізацією на прикладі двох конфліктуючих цільових функцій. Очевидно, що кожна цільова функція має унікальне та різне оптимальне рішення. Наприклад, якщо хтось зацікавлений у покупці будинку, прийняття рішення має враховувати вартість і комфорт. Якщо покупець готовий

пожертвувати комфортом, він отримає будинок за найнижчою ціною. Однак, якщо гроші не проблема, покупець може дозволити собі будинок з найкращим комфортом. Між цими двома крайнощами існує багато варіантів будинків з різною ціною та комфортом. Тепер велике питання серед цих компромісів полягає в тому, яке рішення є найкращим для обох цілей? За іронією долі, жоден будинок серед компромісних варіантів не є найкращим як з точки зору вартості, так і комфорту. Без будь-якої додаткової інформації про ці рішення (у нашому прикладі це будинки), жодне рішення з набору компромісів не можна вважати кращим за будь-яке інше. Це принципова різниця між задачею оптимізації з кількома цілями та одноцільовою. З практичної точки зору, після того, як буде знайдено набір компромісних рішень, користувач використовуватиме інформацію вищого рівня, щоб визначити зручне рішення.

4.1 Математичне формулювання

Щоб розробити проект горизонтальної вітрової турбіни за багатоцільовою оптимізацією, необхідно розглянути багато питань. Мотив цього розділу полягає в тому, щоб представити результати тематичного дослідження задачі багатоцільової оптимізації проектування вітрової турбіни за допомогою winDesign.

Багатоцільова задача оптимізації складається з ряду цільових функцій, які потрібно максимізувати або мінімізувати. Подібним чином, для одноцільових проблем МООР піддається набору проектних обмежень, яким має задовольняти будь-яке оптимальне рішення. Ми можемо сформулювати загальну форму задачі багатоцільової оптимізації так:

Згорнути або розгорнути $f_m(\vec{x})$, $m = 1, 2 \dots M$.

На тему $g_j(\vec{x}) \geq 0$, $j = 1, 2 \dots J$.

$$h_k(\vec{x}) = 0, \quad k = 1, 2 \dots K.$$

$$\vec{x}_i^L \leq \vec{x}_i \leq \vec{x}_i^U \quad i = 1, 2 \dots N.$$

Розв'язок \vec{x} є вектором із n змінних $\vec{x} = (x_1, x_2 \dots x_n)^T$. Часто користувач обмежує змінні дизайну між нижньою та верхньою межами \vec{x}_i^L та \vec{x}_i^U відповідно. У наведеній вище проблемі, існує обмеження J нерівності та K рівності, які можуть бути лінійними та/або нелінійними функціями. Рішення \vec{x} вважається здійсненим, якщо задовольняються всі обмеження $(J + K + 2N)$. Через наявність M цільових функцій, які потрібно мінімізувати та/або максимізувати, зазвичай зручно застосовувати принцип подвійності. Останнє означає, що ми можемо перетворити задачу максимізації на задачу мінімізації, помноживши цільову функцію на -1 . Це практичний метод, оскільки для вирішення одного типу розроблено багато алгоритмів оптимізації напр. проблеми мінімізації. Основні труднощі виникають, коли будь-яка цільова функція або функція обмеження є нелінійною; результат МООР стає нелінійною багатоцільовою проблемою. До цього часу методи вирішення таких задач не мають доказів збіжності. На жаль, більшість реальних МООР є нелінійними за своєю природою, що створює серйозну проблему для науковців.

Як було сказано раніше, завдання багатоцільової оптимізації полягає в тому, щоб знайти набір рішень, який називається набором оптимальних рішень за Парето, у якому будь-які два рішення не повинні бути домінованими відносно один одного. Крім того, будь-який розв'язок у просторі пошуку має домінувати принаймні одну точку в наборі Парето. Тому кінцева мета в мультизапереченнях оптимізації полягає в знаходженні набору рішень, максимально наближених до оптимального за Парето фронту і настільки різноманітних, наскільки це можливо. Поняття домінування використовується в більшості алгоритмів МООР. Не вдаючись

у глибокі деталі, розв'язок \vec{X}_1 вважається домінуючим \vec{X}_2 , якщо задовольняються обидві умови:

1. Рішення \vec{X}_1 не гірше за \vec{X}_2 за всіма цілями,
2. Розв'язок \vec{X}_1 точно кращий, ніж \vec{X}_2 принаймні в одній меті.

Класичний спосіб розв'язування задач із кількома цілями – це скаляризація кількох цілей за допомогою вектора відносної переваги. Оскільки в одній симуляції можна знайти лише одне оптимізоване рішення, еволюційні алгоритми сяяли як цікаві методи вирішення МООР. Основна причина полягає в тому, що на відміну від класичних методів ЕА використовує популяцію рішень на кожній ітерації, і тому результатом ЕА є популяція рішень. Ця здатність знаходити кілька рішень за один прогін зробила ЕА ідеальним підходом для вирішення багатоцільових проблем оптимізації.

Відповідно до наявної літератури, перше реальне застосування еволюційних алгоритмів у визначенні компромісних рішень для МООР було запропоновано в докторській дисертації Девіда Шаффера (Schaffer, 1985). Він розробив генетичний алгоритм з векторною оцінкою (VEGA), який продемонстрував здатність генетичного алгоритму вловлювати численні компромісні рішення. Не приділялося багато уваги, доки ще півдесяти років Девід Е. Голдберг не опублікував свою книгу в 1989 році (David E. Goldberg, 1989) про багатоцільовий еволюційний алгоритм (MOEA), використовуючи концепцію домінування.

4.2 WINDESIGN - загальна структура

4.2.1 Монооб'єктивна оптимізація - WINDESIGN

Читача просимо до нашої публікації, опублікованої в Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering. Фітнес-функція, виражена в рівнянні 4.3 складається з добутку всіх 8 штрафів на масу лопаті. Іншими словами, їх проблема мінімізації маси лопаті «підроблена» перевищеними обмеженнями, роблячи цільову

функцію лінійно залежною від них. Якщо ми подивимося на обмеження від p_1 до p_5 , то помітимо, що вони базуються на «огинаючій руйнування при максимальній нарузі». Руйнування пластини передбачається, якщо будь-яка нормальна напруга або напруга зсуву в локальних осях пластини дорівнює або перевищує відповідну граничну міцність односпрямованої пластини, тому цей критерій ігнорує взаємодію напруг. З цієї причини нашим мотивом у цьому розділі є введення квадратичного критерію відмови, такого як критерії відмови Цай-Ву (Рівняння 4.1) для анізотропних матеріалів у запропонованій нами схемі оптимізації.

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + f_{66}\tau_6^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1$$

де f_{ii} і f_i є константами, які можна оцінити при граничних умовах..

Ми визначаємо нашу головну мету як мінімізацію виключно маси лопаті. Однак критерій руйнування Tsai-Wu залежить від основних напруг, отже, критерій руйнування в нашому випадку, критерій руйнування Tsai-Wu є нелінійним обмеженням, і формулювання такої проблеми мінімізації тепер може бути описано в (Рівняння 4.2) :

$$\text{Tsai} - \text{Wu}(\vec{x}) - 1 \leq 0$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{buckle}}\right)^\alpha + \left(\frac{\tau}{\tau_{buckle}}\right)^\beta - 1 \leq 0$$

На тему:

$$\vec{x}_{LB} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{UB} \quad (\text{верхня та нижня межі})$$

$$A\vec{x} \leq \vec{b} \quad (\text{лінійні обмеження})$$

З першої задачі оптимізації згідно з рівнянням. 4.3, після 17 ітерацій з 1017 оцінками отримано масу лопаті 44186 кг. Якщо ми розглянемо нашу проблему оптимізації, введену в (Рівняння 4.2), після 45 ітерацій з 2700 оцінками ми отримаємо загальну масу леза 72348 кг. Отримано набагато більш реалістичну масу лопаті (на 30% більше, ніж перша маса), відповідно до прогнозованої маси лопаті

для SNL-100 згідно з Джексоном та ін. Критерій відмови Tsai-Wu, записаний у (Рівняння 4.1), дозволяє оцінити змінну f «статичної відмови». Значення f може бути більше або менше одиниці. Якщо його значення перевищує одиницю, це означає, що композитний компонент досяг статичного збою.

У двох попередніх результатах моделювання було зроблено порівняння між двома різними формулюваннями цільової функції. Однак можна провести додаткове дослідження, щоб показати ефективність нашої формули мінімізації за квадратичного обмеження відмови на відміну від того, що описано в (Рівнянні 4.3) за теорією максимального напруження, зокрема з перевагою в тому, що межі відмови є нелінійними обмеження, а не лінійна залежність. Щоб показати різницю між обома інтерпретаціями, ми модифікуємо задачу оптимізації (Рівняння 4.2), замінивши штрафні санкції на нелінійні обмеження у вигляді $c(x) - 1 < 0$. Математичне формулювання представлено в Рівнянні 4.3.

Після 44 ітерацій з 2730 оцінками ми отримуємо масу леза 55528,7 кг. Це означає, що отримано більшу масу лопаті порівняно з (Рівнянням 4.3), однак вона значно менша, ніж маса лопаті з формулювання оптимізації за квадратичного обмеження відмови (Рівняння 4.2).

4.2.2 Багатооб'єктивна оптимізація - WINDESIGN

У цьому розділі ми розв'язуємо числовий приклад конструкції лопаті вітрової турбіни winDesign.

Двома суперечливими цільовими функціями є маса леза та річна енергія. Розв'язання такого МООР може бути досягнуто методом скаляризації. Він полягає у формулюванні одноцільової задачі оптимізації так, що оптимальні розв'язки одноцільової задачі оптимізації є оптимальними за Парето розв'язками МООР. Загальне формулювання для скаляризації багатоцільової оптимізації дається як:

$$\min \sum_{i=1}^M w_i f_i(\vec{x})$$

де ваги цілей $w_i > 0$ є параметрами скаляризації.

Ми пропонуємо використовувати наступну фітнес-функцію для мінімізації маси та максимізації річного виробництва енергії:

$$\min\left(\alpha \frac{M(\vec{x})}{M_0} + (\alpha - 1) \frac{AEP(\vec{x})}{AEP_0}\right)$$

Для значення альфа, близького до нуля, відношення мас усувається, а функція пристосування стає $\min\left((\alpha - 1) \frac{AEP(\vec{x})}{AEP_0}\right)$, що означає максимізацію нормалізованої енергії.

Ймовірно, для значення альфа, близького до 1, співвідношення енергії зникає, і тепер проблема полягає в мінімізації маси. Якщо ми запустимо задачу оптимізації для різних значень альфа між 0 і 1, ми зможемо знайти оптимальне рішення за Парето для МООР. Еталонна маса та енергія взяті відповідно з прикладу, коли альфа дорівнює 0.

Під час структурного аналізу розглянемо наступні механічні властивості. У нашому дослідженні ці властивості отримані від леза Sandia 100 m SNL-100. Загальну блок-схему багатоцільового алгоритму оптимізації можна підсумувати на рис 4.2.

Метою є максимальний АЕР і мінімальна маса, а алгоритм winDesign забезпечує оптимальні передні рішення за Парето, як показано на рис 4.1. Маса леза очевидно збільшується зі збільшенням АЕР. Для порівняння з еталонним лезом вибрано три леза з набору Парето. Можна побачити, що АЕР збільшується на 5,19% для леза 2, тоді як маса зменшується на 13,45%

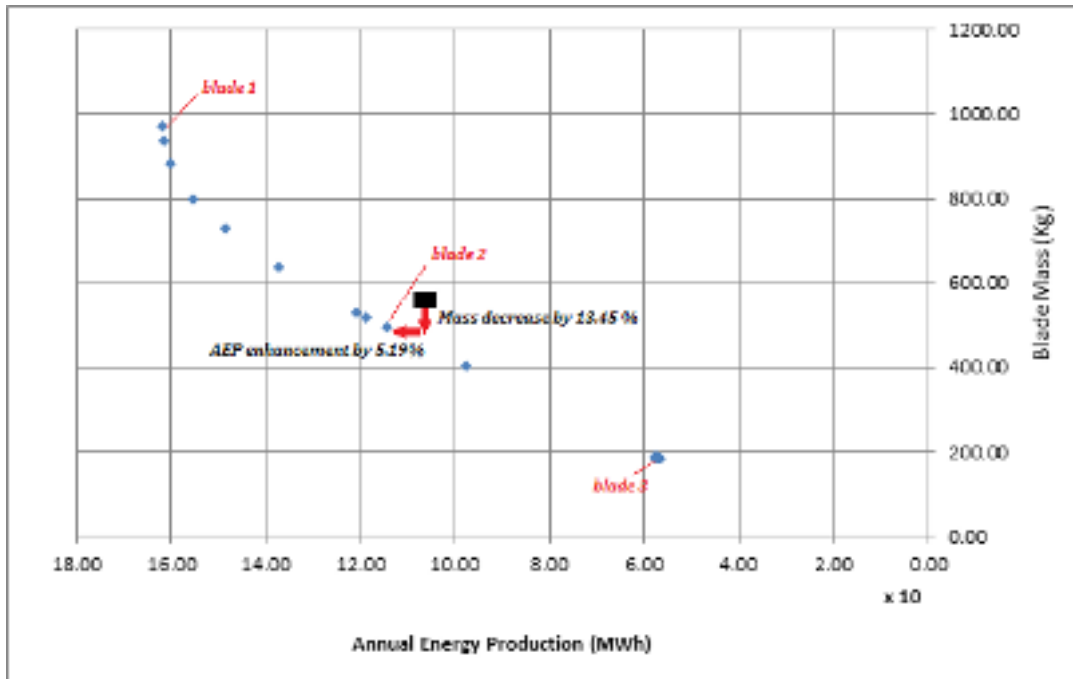


Рис 4.1: Парето для наведеного числового прикладу.

У цьому розділі ми змогли представити фундаментальні принципи багатоцільової оптимізації при проектуванні вітрових турбін. Ми коротко обговорили основи та термінологію багатоцільової оптимізації вітрових турбін. Представлено найпоширеніші алгоритми оптимізації, які використовуються для розв'язання багатоцільових задач оптимізації BEU.

Розроблений чисельний інструмент winDesign здатний надати наступні переваги для проектувальників лопатей вітрових турбін на попередній стадії:

□ Проектування та моделювання композитних лопатей вітрової турбіни за різних конфігурацій турбін (Рис 4.3), властивостей навколишнього середовища (Рис 4.4), цілей оптимізації (Рис 4.5), варіантів аналізу (Рис 4.6) та проектних обмежень.

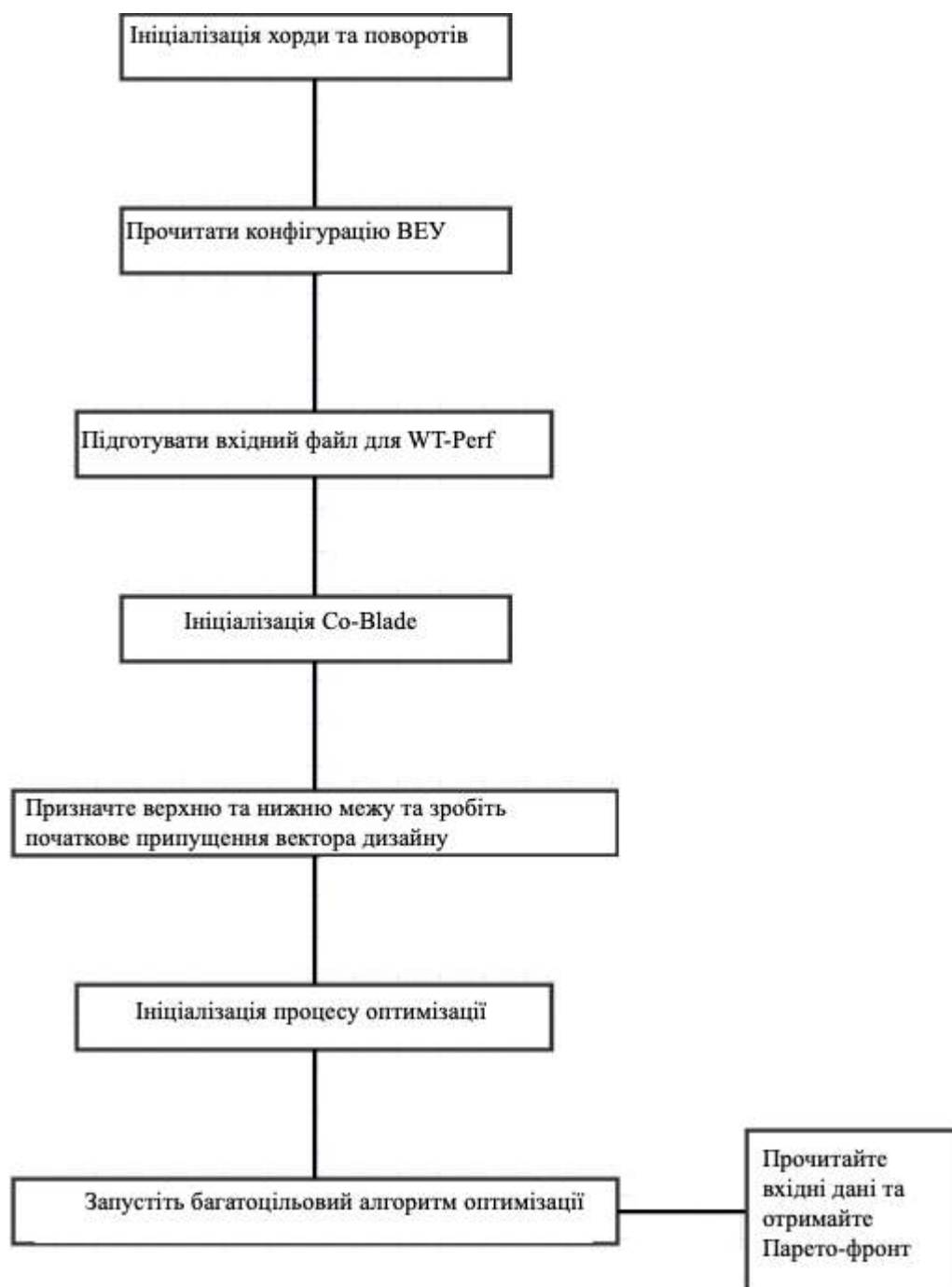


Рис 4.2: Блок-схема алгоритму багаточільової оптимізації.

□Здатність представити фундаментальні принципи багаточільової оптимізації при проектуванні вітрових турбін. Запропонований інструмент winDesign може виконувати оптимізацію за Парето, коли потрібно приймати оптимальні рішення за наявності компромісів між двома суперечливими цілями: АЕР і вагою леза.

□Структурний аналіз та проектування композитних лопатей для вітрових турбін з метою прискорення етапу попереднього проектування.

□ Велика різноманітність 2D і 3D візуалізацій через графічний інтерфейс користувача для забезпечення миттєвого візуального зворотного зв'язку, натхненного Co-Blade.

□ Для заданої зовнішньої форми лопаті розрахункове навантаження обчислюється за допомогою WT-Perf, winDesign може визначити оптимальний складовий склад, розподіл хорди та скручування, що або мінімізує масу лопаті, або максимізує річне виробництво енергії, одночасно задовольняючи обмеження щодо максимального навантаження, прогин, відхилення кінчика та власні частоти.

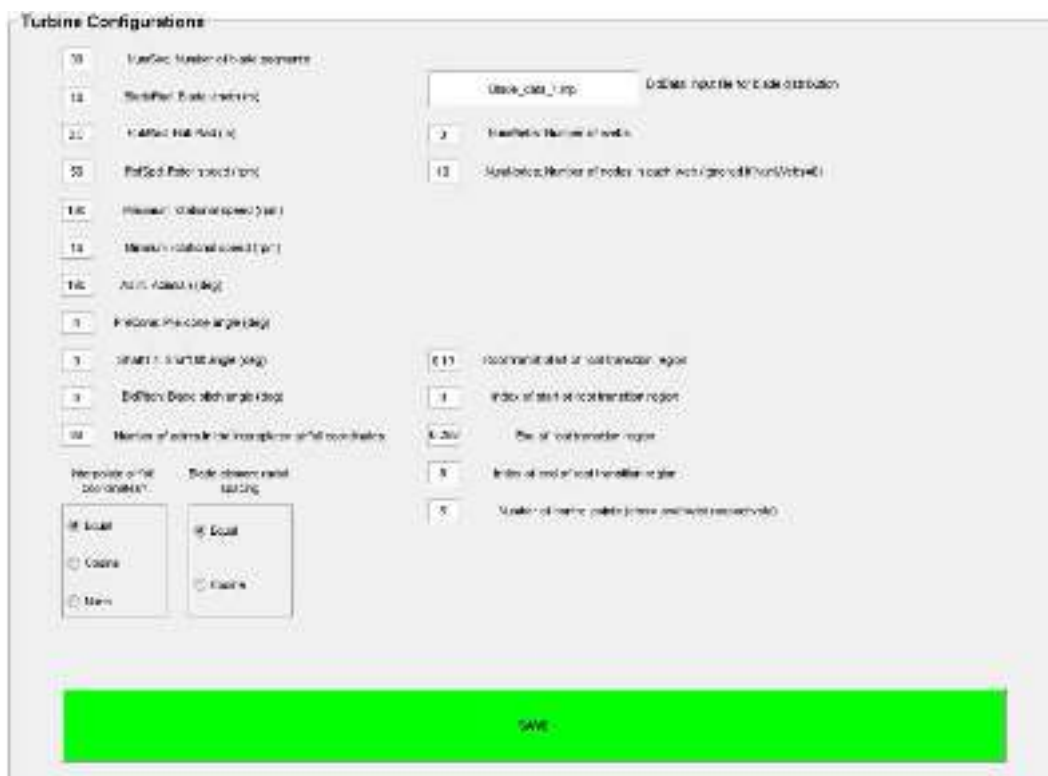


Рис 4.3. Вікно введення конфігурацій турбіни winDesign.

Environmental Properties

1.225	Rho: Fluid density kg/m ³
9.81	Grav: Gravitational acceleration m/s ²
6.03	Long term mean flow (m/s)
1.91	Shape factor
6.8	Scale factor

SAVE

Рис 4.6. Вікно введення властивостей середовища winDesign

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

За словами Чу і Маджумдара, «енергію неможливо зберегти або знищити; проте його можна перетворити з однієї форми в іншу за допомогою певних технологічних засобів». Енергія вітру є одним із найчистіших і відновлюваних способів виробництва електроенергії. У минулому люди використовували енергію вітру для керування кораблями. Сім'я в Південній Дакоті відкрила вітрову енергію в 19 столітті. Сім'я мала невелику вітрову турбіну, яка могла постачати електроенергію лише для домашнього використання. Турбіна, хоч і невелика, забезпечить родину достатньою кількістю енергії для живлення радіо та задоволення потреб сім'ї в електриці

З цієї сім'ї технологія поширилася, і вітроенергетичні ферми були створені по всьому світу. Енергія вітру вимагає використання турбін, які обертаються вітром, і в процесі виробляється енергія. Традиційні турбіни виготовлялися з деревини, мали малі розміри і не могли виробляти велику кількість енергії.

Однак сучасні турбіни великі та з'єднані з ротором, що робить їх більш ефективними порівняно зі звичайними. Оскільки тривають кампанії проти забруднення навколишнього середовища, більшість країн вклали значні кошти у виробництво цього виду енергії, оскільки він не спричиняє забруднення навколишнього середовища, як інші види енергії, такі як нафта та вугілля. Енергія вітру повільно домінує на енергетичному ринку через її дешевизну та очікуване зростання цін на інші джерела енергії, такі як вугілля та нафта.

Незважаючи на те, що енергія вітру вважається найчистішою формою відновлюваної енергії, вона має деякі недоліки. Найбільша проблема вітрової енергії полягає в її надійності. Енергія вітру не є надійним джерелом енергії, оскільки її виробництво повністю залежить від переважаючих погодних умов. Відсутність вітру для обертання турбін означає відсутність виробництва енергії. Енергію вітру можна виробляти лише в районах із сильними вітрами, наприклад у високогір'ї та поблизу великих водних мас, і вона менш ефективна в районах без таких сильних вітрів. Варіації кількості виробленої енергії також очевидні в різні години доби

залежно від сили вітру. Щоб підвищити надійність цього виду енергії, поблизу великих водних масивів, де, ймовірно, вітер є сильним протягом року, були створені вітроенергетичні ферми.

Енергія вітру сьогодні заслужила довіру людей завдяки дешевій вартості виробництва. Згідно зі статистикою, енергія вітру широко використовується в багатьох частинах світу. У Данії, наприклад, енергія вітру забезпечує 25% енергетичних потреб країни. Статистика 2011 року показує, що понад 83 країни світу покладаються на енергію вітру для своїх потреб в електроенергії та освітленні. Ті ж статистичні дані показують, що станом на 2011 рік енергія вітру становила 3% світового споживання електроенергії. Енергія вітру, згідно зі статистичними даними, зростає на 25% на рік, що є вищим темпом порівняно з іншими видами енергії.

Винахід більших турбін із більшими роторами є великим поштовхом для сектора вітроенергетики, оскільки нові турбіни мають здатність виробляти більше енергії порівняно зі старими малими турбінами. Більші турбіни мають перевагу вловлювати велику кількість вітру, оскільки вони мають великі ротори, а втулка розташована на більшій висоті, щоб турбіна могла збільшити швидкість. На відміну від інших видів енергії, вартість енергії вітру поступово знижується.

Традиційне виробництво енергії вітру було дорогим через малу кількість енергії, виробленої невеликими турбінами. Традиційні турбіни були дорогими і мали менші ротори порівняно з сучасними. Однак масою нових турбін слід добре керувати, навіть якщо їхні розміри збільшуються, якщо вони хочуть залишатися ефективними.

Останні кілька років ознаменували численні події у виробництві енергії вітру. Уряди збільшили свої енергетичні бюджети разом із підтримкою досліджень цього виду енергії. Цифри, оприлюднені Всесвітньою вітроенергетичною асоціацією в 2011 році, показали зростання встановленої вітроенергетичної потужності з 24 ГВт у 2001 році до 239 ГВт у 2011 році, що є значним зростанням. Це величезне зростання пояснюється зростаючою стурбованістю щодо забруднення навколишнього середовища та необхідністю збереження навколишнього середовища. Енергії вітру

приписують їй чистоту та нижчу вартість виробництва порівняно з викопним паливом.

Енергія вітру не виділяє парникових газів, і єдине спричинене забруднення – це звукове забруднення. Очікується, що останні розробки у вітроенергетиці зменшать вплив звукового забруднення шляхом створення офшорних ферм замість будівництва ферм на суші. Офшорні вітряні електростанції розташовані далеко від людей, тому звуки не мають великого впливу на людей.

Сьогодні Китай і Європа є ключовими виробниками вітрової енергії з найбільшими офшорними вітроенергетичними фермами. У 2012 році на 55 морських фермах у Європі було близько 1600 турбін, які використовувалися для забезпечення електрикою приблизно 5 мільйонів будинків. Відтоді вітрова енергетика зросла, і наприкінці 2013 року Європа виробила близько 6000 МВт. У Лондоні є найбільша офшорна ферма у світі, а саме. Лондонська антена потужністю 630 МВт. Siemens, яка є німецькою компанією, є ключовим виробником і постачальником турбін, які використовуються для виробництва енергії вітру

Більшість країн світу перемістили свою увагу від будівництва вітряних електростанцій на місцевих землях до будівництва офшорних ферм. Офшорні ферми будуються навколо великих водних мас, де вітер вважається сильнішим, ніж на суші. Крім того, вітри сильні ввечері, коли потреба в енергії висока.

Європа є лідером у будівництві офшорних ферм і є піонером цього великого винаходу. Перша офшорна ферма в Європі була створена в 1991 році, хоча її потужність була відносно невеликою. Однак на початку 2013 року в Європі було 68 морських вітрових електростанцій потужністю 480 МВт. Експерти з питань енергетики прогнозують, що до 2020 року в Європі буде створена вітрова електростанція потужністю 45 МВт, яка вироблятиме електроенергію, достатню для покриття потреб приблизно 4% домогосподарств у Європі.

Енергія вітру є одним із перспективних джерел енергії в майбутньому через технологічний прогрес, який робить її виробництво дешевим. Дослідники почали різні дослідження, спрямовані на те, щоб зробити вітрову енергетику більш привабливою. Незважаючи на те, що виробництво енергії вітру дешевше порівняно з

викопним паливом, воно все одно дорожче, ніж звичайні засоби, такі як ядерна енергія. Таким чином, дослідження сфери витрат є неминучим, якщо джерело енергії має розвиватися. Проте виробництво та використання енергії вітру швидко поширюється з темпом зростання 25% на рік, що є показником того, що це один з найшвидше зростаючих видів енергії.

У Європі, наприклад, статистика показує, що країна інвестує більше у виробництво енергії вітру, ніж у інші види енергії. У 2009 році енергія вітру зайняла 40% енергетичного бюджету, що є явним показником того, що країна дуже довіряє цьому виду енергії. Проте Китай випереджає Європу у виробництві енергії вітру і в тому ж році подвоїв виробництво енергії вітру.

Європа робить величезні інвестиції у вітрову енергію, і за оцінками, до 2020 року енергія вітру забезпечуватиме 14% її потреб в електроенергії. Щоб досягти цієї мети, ЄС планує інвестувати в офшорні об'єкти, щоб підвищити надійність енергопостачання, оскільки офшорні вітри сильні та доступні більшу частину року. Різні країни придумали політику, спрямовану на збільшення бюджету вітрової енергії, щоб отримати вигоди від її використання. Наприклад, Лондон ініціював проект будівництва, мабуть, найбільшої офшорної вітрової електростанції, а саме. London Array, до 2015 року. Будівництво ферми відбувається на узбережжі Кента, і очікується, що на ній буде встановлено 350 турбін, кожна з яких має потужність 1 ГВт.

Останні розробки у вітроенергетиці перенесли фокус з локального будівництва турбін на їх будівництво навколо водних мас, що називається «офшорним вітровим збором». Ця розробка ґрунтується на результатах ряду дослідницьких компаній про те, що офшорні вітряки є надійними та сильними. Офшорні ферми розташовані не лише в Європі, а й в інших країнах світу. Німеччина створила 30 офшорних ферм у Північному Балтійському морі.

З іншого боку, Франція відкрила офшорну вітроенергетичну ферму, а саме. Veulettes sur-Mer, уздовж її берегової лінії, і будівництво додаткових ферм триває. На узбережжі Північного моря ведеться будівництво додаткових 200 вітрових електростанцій, щоб ефективно використовувати вітри, які дмуть цілий рік. На

фермах будуть встановлені турбіни з 60-метровими лопатями, і очікується, що вони збільшать виробництво енергії на 23%.

Енергія вітру приваблює інвесторів з усього світу завдяки дешевій вартості виробництва та багатообіцяючому майбутньому. Великі багатонаціональні компанії були створені по всьому світу для виробництва та продажу турбін виробникам енергії. Німеччина приступила до будівництва глибоководних вітрових електростанцій на відміну від морських. Глибоководна вітроелектростанція в Німеччині є першою у своєму роді у світі та є технологічно передовою. Проте дослідження глибоководного шельфу тривають, і успіх Німеччини в цьому надасть іншу форму майбутньому вітроенергетики. Очікується, що багато інших країн світу приймуть цей проект, якщо він успішно пройде в країні-першопрохідці, Німеччині.

Очікується, що глибоководні офшорні ферми будуть більш надійними у виробництві енергії вітру, ніж поблизу берега. Тому очікується, що вітроенергія збільшиться, якщо країна досягне успіху в цьому проекті.

За останнє десятиліття виробництво енергії вітру зазнало багатьох змін. Великі турбіни, здатні виробляти велику кількість енергії, були розроблені для збільшення виробництва енергії вітру. Офшорні вітрові електростанції були розроблені вздовж водних мас, де вітер надійний. По всьому світу створюється більше офшорних ферм з метою збільшення виробництва енергії в майбутньому. Передбачається, що в найближчому майбутньому енергія вітру зростатиме на 25% на рік. Різні групи агітують за заходи проти забруднення по всьому світу, і, таким чином, очікується, що енергія вітру, будучи безпечною для навколишнього середовища, стане хорошою заміною викопному паливу, яке звинувачують у забрудненні повітря та глобальному потеплінні через викиди парникових газів.

Нещодавно багато країн світу запровадили унікальні тарифи на виробництво та споживання енергії вітру. Хоча тарифи відрізняються від однієї країни до іншої, всі вони спрямовані на зниження цін на вітрові турбіни. Майже в усіх країнах світу вітряні турбіни субсидуються, щоб допомогти окремим особам і фермам легко придбати їх. Субсидування залучило інвесторів у бізнес, що призвело до низьких цін і високої якості турбін через посилення конкуренції. Інновації характерні для

сектору вітроенергетики, що призвело до виробництва ефективних турбін. Цей аспект є чітким показником того, що вітрова енергетика буде розвиватися в майбутньому.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, до 2050 року енергія вітру забезпечуватиме понад 18% світових потреб у енергії. Цей прогноз відрізняється від оприлюдненого в 2009 році МЕА, яке вказувало, що 12% світових потреб в енергії буде забезпечуватися енергією вітру. Щоб досягти цієї мети, агентство розпочало інженерні дослідження у сфері виробництва енергії вітру з метою виробництва ефективних турбін. Той самий звіт показав, що Китай стане найбільшим виробником вітрової енергії у світі. Також прогнозується, що Китай буде лідирувати у виробництві енергії вітру в майбутньому, таким чином обігнавши США та інші європейські країни завдяки величезним інвестиціям країни у виробництво енергії вітру.

У недавньому минулому Китай зробив величезні інвестиції в виробництво енергії та дослідження, а також розпочав будівництво великих морських вітрових електростанцій уздовж свого узбережжя. У 2009 році звіт, опублікований МЕА, показав, що енергія вітру є найсучаснішим відновлюваним джерелом енергії, і з того часу кількість вітряних електростанцій подвоїлася, що є чітким показником того, що енергія вітру буде одним із найбільш використовуваних джерел енергії у світі. Однак у звіті рекомендовано провести додаткові дослідження для підвищення надійності вітрової енергії в майбутньому.

З огляду на великі переваги, отримані від використання енергії вітру, ряд рекомендацій було зроблено в Дорожній карті вітроенергетичних технологій 2013 року. Серед зроблених рекомендацій є вдосконалення обладнання, що використовується на вітроенергетичних фермах, шляхом встановлення набору найкращих міжнародних інженерних практик для покращення якості відповідних машин. Окрім покращення якості, дорожня карта також пропонує запровадити регулювання ринку шляхом встановлення єдиних стандартів для таких об'єктів.

Дорожня карта також пропонує збільшити бюджет на дослідження, спрямовані на покращення об'єктів енергетичних ферм. Енергія вітру, як заміна

викопного палива, представлена у великій кількості та є відновлюваною, що означає низьку собівартість виробництва. Це один з найчистіших видів енергії, оскільки він не виробляє парникових газів або ядерних відходів, як у випадку з викопним паливом. Крім того, енергія вітру потребує мало землі та не спричиняє прямого забруднення навколишнього середовища. Це найефективніший тип джерела енергії в районах, де є сильний вітер.

Очікується, що в майбутньому вартість виробництва енергії з викопного палива зросте, що зробить енергію вітру кращим варіантом для вирішення витрат на виробництво енергії. Проте очікується, що більша частина розвитку вітроенергетики буде здійснюватися в морі через надійність вітру на берегах. Крім того, очікується, що природні ресурси, такі як вугілля, нафта та уран, які використовуються сьогодні для виробництва енергії, будуть вичерпані в найближчому майбутньому, що зробить енергію вітру одним із найкращих варіантів джерел енергії в майбутньому.

Енергія вітру - це форма енергії, яка видобувається з вітру. Це відновлюване джерело енергії, яке дешевше порівняно з викопним паливом. Енергія вітру заслужила довіру людей у всьому світі завдяки дешевій вартості виробництва. Більшість країн світу прийняли політику, спрямовану на подвоєння виробництва енергії вітру в майбутньому, навіть якщо ця мета залежить від швидкості доступного вітру. Однак більшість країн встановили офшорні вітроенергетичні ферми поблизу великих водних мас, щоб підвищити надійність, оскільки сильні вітри у водних масах присутні цілий рік.

Дослідження вказали на можливість отримання надійної енергії з поєднання енергії вітру та води. У минулому виробництво енергії вітру відбувалося за допомогою традиційних вітрових турбін, які могли генерувати лише невелику кількість енергії. Однак на даний момент розроблено великі турбіни, які здатні виробляти велику кількість енергії. Необхідно провести подальші дослідження з удосконалення енергії вітру, щоб підвищити ефективність і надійність цього важливого джерела енергії. Для підвищення надійності вітроенергетики необхідно впроваджувати вдосконалені методи прогнозування погоди. Енергія вітру екологічно чиста і не спричиняє прямого забруднення навколишнього середовища

на відміну від викопного палива. Тому необхідно провести додаткові дослідження для покращення виробництва енергії вітру, оскільки це перспективне джерело енергії.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ

Вказаний розділ присвячений аспектам охорони праці працівників, які забезпечують постійне та цілодобове спостереження за системою пожежної сигналізації на державному підприємстві "Vestas".

Застосування техніки призводить до проблем з охороною здоров'я та умов праці працівників, підсумовуючи такі фактори, як висока інтенсивність праці, монотонність, специфічні умови зорової роботи, обмежена рухливість, наявність електромагнітних випромінювань, електростатичних полів та можливість ураження електричним струмом. Комплексний вплив цих шкідливих факторів призводить до зниження біоенергетичного потенціалу та опірності організму. Важливо відзначити, що не у всіх випадках будуть виявлятися однакові відхилення у стані здоров'я, ймовірно, спостерігатиметься розрив у найбільш навантаженому або ослабленому органі.

З метою забезпечення належних умов праці для персоналу, який обслуговує систему пожежної сигналізації на об'єкті, передбачено реалізацію комплексу заходів з метою поліпшення умов праці.

6.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори у робочій зоні

При встановленні, введенні в експлуатацію та ремонті пожежних систем, згідно з ДСТУ 12.0.003-74, виникають наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Пошкодження конструкцій (драбини та інше виробниче обладнання):

- При прокладці кабелів, монтажі та обслуговуванні сповіщувачів та відеопідсилювачів існує ризик виконання робіт на драбині, яка може вибухнути, спричиняючи падіння та травмування персоналу.

Підвищена температура поверхонь обладнання та матеріалів:

- Під час виконання робіт з використанням паяльника та інших інструментів, які нагріваються, може виникнути підвищена температура поверхонь обладнання та матеріалів.

Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі до 380 В:

- Ризик ураження електричним струмом при дотику до струмопровідних частин та ушкодженні ізоляції, що може призвести до підняття обладнання під напругою 220 В змінного струму.

Розташування робочого місця на значній висоті відносно поверхні землі:

- Більшість обладнання розташовано на висотах від 2 до 2,5 метрів, що створює ризик фізичних та нервово-психічних перевантажень для операторів систем.

Фізичні та нервово-психічні перевантаження:

- Вплив цього фактору поширюється на операторів систем при невдало розробленому графіку чергувань, оскільки системи генерують значні обсяги оперативної інформації протягом робочого часу.

В експлуатації проєктованих пожежних систем передбачається мінімізація ризику виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Однак, найбільш ймовірною залишається небезпека ураження електричним струмом при дотику до струмопровідних частин та ушкодженні ізоляції.

6.2 Заходи щодо зменшення впливу шкідливих факторів на виробництві

Вказані небезпечні та шкідливі фактори у певній мірі впливають на здоров'я працівника. Вплив кожного з цих факторів швидко проявляється і виявляється у людині як втома, запаморочення, головний біль та загальне нездуження, що негативно впливає на продуктивність праці. Постійне перебування в таких умовах може призвести до розвитку хронічних захворювань. Інші фактори можуть негайно

вразити здоров'я людини, спричиняючи біль, травматизм, втрату свідомості, а в окремих випадках - смерть.

6.2.1 Заходи безпеки щодо ураження електричним струмом

Виконання наведених нижче вимог безпеки спрямоване на виключення або максимальне зменшення ризику ураження персоналу електричним струмом та впливу на нього інших потенційно небезпечних факторів:

- Монтаж і експлуатацію систем повинні виконувати лише кваліфіковані фахівці.
- Дотримання вимог безпеки під час виконання електромонтажних робіт.
- Оптимальний робочий графік персоналу, який обслуговує систему.
- Надійне заземлення корпусу елементів системи, живлених від джерела змінного струму 220 В.
- При монтажі та експлуатації уникати дотику інструментів до струмопровідних небезпечних напруг.
- При виконанні паяльних робіт керуватися вимогами "Санітарних правил організації процесів пайки дрібних виробів, що містять свинець" № 952.

Відповідно до "Правил устроювання електроустановок", електроустановки класифікуються за напругою: до 1000 В та вище 1000 В. Заходи забезпечення електробезпеки розробляються, враховуючи клас електроустановки.

I - струм короткого замикання (для електроустановок до 1000 В $I_{кз} = 125/R_{з} 43,1$ А, $R_{з}=2.9$ Ом)

$T_{сп}$ - час спрацьовування захисту ($t_{сп}=0,1$ с)

Електроустановка приєднана до внутрішньої магістралі за допомогою мідних і алюмінієвих провідників типу: ПЕВ, ПЕВД із перетином 4-6 мм. Прокладка заземлюючих провідників із смугової сталі виконана так, щоб була більш доступна для обслуговування, і вкрито конструкцією будинку.

Приєднання дроту, що заземлює, до частин устаткування виконано зварюванням.

6.2.2 Захист від статичної напруги

Статичні електричні розряди можуть виникати при дотику до будь-якого обладнання, яке розташоване в охоронному приміщенні. Хоча такі розряди самі по собі не становлять небезпеки для людини, вони можуть призвести до неприємних відчуттів та спричинити виходження з ладу чи відмову в роботі обладнання. Для зменшення виникнення статичних електричних зарядів вирішено покривати підлогу одношаровим антистатичним лінолеумом з полівінілхлориду.

Загальні заходи для захисту від статичної електрики включають регулярне і місцеве зволоження повітря, для чого використовуються зволожувачі. Заземлення електропровідних частин обладнання використовується для усунення статичних електричних зарядів. Заземлення неметалевих об'єктів досягається нанесенням електропровідного покриття (електропровідної емалі) на їх поверхню. Цей вид заземлення комбінується з захисним заземленням електрообладнання.

6.2.3 Забезпечення освітлення робочого місця

Важливим елементом в комплексі заходів з охорони праці та поліпшення умов праці є створення оптимального світлового середовища. Це означає розумну організацію природного та штучного освітлення приміщень та робочих місць. Вдень у офісах використовується природне одностороннє висвітлення, в той час як у вечірні та

нічні години або при недостатній освітленості застосовується штучне загальне рівномірне освітлення.

Приміщення для роботи з дисплеями та відеотерміналами відноситься до категорії III зорової роботи (висока точність). Нормований рівень освітленості для роботи з дисплеями становить 300 лк.

Заходи щодо зниження дискомфортової блискучості та дзеркальних відображень на екранах здійснюються за допомогою світильників із комбінованим прямим і відбитим напрямком світла, яке контролюється подвійною хрестовою оптикою. Це дозволяє обмежити сліпучий вплив прямого та відбитого світла. Габаритна яскравість світильників в зоні кутів випромінювання не перевищує 200 кд/м², а штучне освітлення використовує люмінесцентні лампи білого і темно-білого кольорів потужністю 80 Вт.

Норми ДБН В.2.5-28:2018 "Природне і штучне освітлення" застосовуються до проектування освітлення різних територій і приміщень, включаючи житлові, цивільні, виробничі, адміністративні та інші об'єкти, а також зовнішнє освітлення міст, доріг, парків, інфраструктурних об'єктів та ін.

6.2.4 Заземлення та електроживлення обладнання

Система пожежної сигналізації є споживачем 1-ї категорії та вимагає наявності 2-х незалежних джерел електроживлення.

Для живлення апаратури пожежної сигналізації та оповіщення застосовано такі заходи:

- Електроживлення приймально-контрольного приладу подається від вільної групи контактів існуючих розподільних щитів за допомогою проводу ВВГ 3х1,75.

- Резервне введення приймально-контрольного приладу "А16-512" та джерела резервного живлення здійснюється від акумуляторної батареї ємністю 50А * год.
- Живлення приладу мовного оповіщення про пожежу подається від зовнішнього джерела живлення 36В.

Для захисту обслуговуючого персоналу від небезпечних напруг, які можуть виникати на корпусах електрообладнання внаслідок пошкоджень ізоляції, передбачено занулення корпусів електроустаткування. Занулення електрообладнання виконано шляхом металевого з'єднання його корпусів з нейтраллю мережі електропостачання, застосовуючи окремі жила живильних кабелів. При цьому керується вимогами СНиП 2.05.06-85 "Електротехнічні пристрої".

При використанні акумуляторної батареї в якості резервного джерела живлення системи пожежної сигналізації необхідно забезпечити безперервну роботу системи протягом не менше 24 годин в черговому режимі та не менше 3 годин у режимі тривоги.

З метою забезпечення безперебійного живлення обладнання системи пожежної сигналізації та системи оповіщення, розрахунки виконано згідно з визначеними стандартами.

У системі важливо забезпечити альтернативне електроживлення для обладнання системи пожежної сигналізації та системи оповіщення.

Щодо розрахунків:

Для визначення питомого опору ґрунту для вертикальних заземлювачів та магістралі використовуються наступні розрахунки:

Розроблюваний блок керування відноситься до класу "електроустановки із напругою до 1000 В". Для забезпечення повного виключення або максимального захисту від можливого дотику до частин приймально-контрольного приладу, який знаходиться під напругою, застосовано низку заходів, таких як недоступність струмоведучих частин концентратора завдяки надійній ізоляції, використання захисних кожухів та розташування струмоведучих частин в місцях, недосяжних для дотику. Захист від можливої поразки при дотику до частин блоку керування концентратора, які зазвичай не перебувають під напругою, але можуть опинитися під нею у разі пробою ізоляції, забезпечується за допомогою захисного заземлення та занулення.

1. Щодо розрахунку заземлювального пристрою:

Вихідні дані для розрахунку включають опір заземлювального пристрою ($R_{доп} = 6 \text{ Ом}$) та питомий опір ґрунту ($\rho = 24 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Заземлювальний пристрій має питомий опір $\rho'_{разр} = \rho \cdot K_{п'} = 28 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для вертикальних заземлювачів та $\rho''_{разр} = \rho \cdot K_{п''} = 44 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для магістралі.

2. Розраховуємо опір розтіканню струму для одиночного куткового заземлювача:

$$R = \rho_{расч} \ln 4,2l = 28 \quad \ln 4,2 \cdot 2,5 = 8,39 \text{ Ом}$$

$$T = \frac{2\pi l}{b} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5}{0,05}$$

3. Визначаємо умовну кількість вертикальних заземлювачів за формулою:

$$n' = \frac{R_{доп}}{R_T} = 2,04$$

$$R_{доп}$$

4. В залежності від умовної кількості заземлювачів (n'), а також відношення та розташування вертикальних заземлювачів (наприклад, в утворенні ряду), визначаємо коефіцієнт використання заземлювачів із куткових ($\eta_{эм}$). Цей коефіцієнт враховує взаємне екранування кутків:

$$\eta_{эм} = 0,81$$

5. Визначаємо дійсну уточнену кількість вертикальних заземлювачів за формулою:

$$n = \frac{n'}{\eta_{эм}} = 3$$

6. Рахуємо довжину магістралі, що з'єднують вертикальні заземлювачі, за формулою:

$$L = 1,2 \cdot a \cdot n = 16,25 \text{ м}$$

7. Розраховуємо опір розтіканню струму для магістралі, що заземлює, за формулою:

$$R_T = \rho_{расч} \frac{\ln 4,2 l^2}{2 \pi l b h} = 44 \frac{\ln 16,25^2}{2 \pi \cdot 3,14 \cdot 16,25 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 3,9 \text{ Ом}$$

де L - довжина смуги, м;

b - ширина смуги, м ;

h - глибина закладання магістралі, м.

8. У залежності від виду розміщення вертикальних заземлювачів визначаємо коефіцієнт використання г.зм магістралі, що враховує взаємне екранізування магістралі і вертикальних заземлювачів:

$$\eta_{эм} = 0,92$$

9. Обчислюємо опір розтіканню всього заземленого пристрою , по формулі:

$$R_з = R_M \eta_{эм} + R_T \eta_{эм} = 2,98 Ом$$

10. Розрахунок перетину провідника, що заземлює.

Перетин провідника, що заземлює, розраховуємо за формулою:

$$S = I_{кз} \sqrt{t_{сп}} \geq 0,058 мм^2$$

272

де S - перетин заземлюючого провідника, мм²

6.3 Пожежна безпека

У сучасній радіоелектронній апаратурі спостерігається висока щільність розміщення елементів електронних схем, де з'єднувальні дроти та комутаційні кабелі розташовані дуже близько один до одного. Під час протікання струму через них виникає значна кількість теплоти, що може призвести до підвищення температури окремих вузлів до 80-1000 °С і, в кінцевому підсумку, до короткого замикання та згоряння з утворенням іскор в електронних схемах.

Для запобігання поширенню вогню від одного боку будівлі до іншого передбачено протипожежні перешкоди, такі як перекриття та двері. Особлива увага приділяється безпечній евакуації людей у разі пожежі. Аварійна пожежна система служить для оповіщення про пожежу за наявності диму або великого виділення теплоти, використовуючи звукові та світлові сигнали.

Евакуаційні шляхи в будівлі забезпечують безпечний вихід всіх присутніх через евакуаційні виходи. Ступінь вогнестійкості будівлі визначається межами вогнестійкості та класами пожежної небезпеки будівельних конструкцій, а об'єкт має III ступінь вогнестійкості.

Ширина евакуаційних шляхів становить не менше 1 м, а дверей - не менше 0,9 м. Висота проходу на евакуаційних шляхах - не менше 2 м. Двері на евакуаційних шляхах відкриваються у напрямку виходу з будівлі, а висота дверей на проходах евакуації складає не менше 2 м. Ширина маршу сходів не менше ширини евакуаційного виходу у сходову клітку, а ширина сходових майданчиків - не менше ширини маршу.

Між маршами сходів передбачено зазор шириною не менше 50 мм. У світлових отворах сходових клітин передбачені фрамуги площею не менше 1,2 м² на кожному поверсі. Будівля обладнана оповіщенням про пожежу типу СОЗ.

Вогнегасник - це технічний пристрій, призначений для припинення горіння шляхом подавання вогнегасної речовини, яка міститься в ньому, під дією надмірного тиску.

За вагою і конструктивним виконанням він придатний для перенесення і застосування однією людиною.

Вогнегасники поділяють за способом спрацьовування на:

- Автоматичні - вони стаціонарно монтуються в місцях можливого виникнення вогню.
- Ручні (приводяться в дію людиною) - розташовані на спеціально оформлених місцях.
- Комбінованої дії - вони мають переваги обох вищеописаних типів.

В залежності від закачаної вогнегасної речовини вогнегасники поділяються на п'ять видів:

- Вуглекислотні.
- Повітряно-пінні.
- Порошкові.
- Водні.
- Аерозольні.

6.4 Інструкція дій та техніка безпеки у разі повітряної тривоги, пожежі та вибухової небезпеки

Інструкція складена відповідно до вимог "Пожежна безпека технологічних процесів", "Пожежна техніка для захисту об'єктів" та "Пожежна безпека" згідно із стандартом ДСТУ 2272:2006.

Для виконання робіт залучаються фахівці інженерно-технічного складу, які ознайомлені із принципами роботи концентратора, мають інструкцію з технічної експлуатації, а також пройшли залік з техніки безпеки та пожежної безпеки.

Під час повітряної тривоги на державному підприємстві слід дотримуватися певного алгоритму дій для забезпечення безпеки та ефективного ведення персоналу в умовах екстрених ситуацій. Нижче наведено загальний алгоритм, який можна використовувати в подібних ситуаціях:

Отримання сигналу тривоги:

- Під час отримання сигналу про повітряну тривогу слід негайно спиняти всі роботи та обладнання.
- Перевірити оточуюче середовище на ознаки небезпеки та джерела можливого загрозливого впливу.

Ввімкнення аварійного освітлення:

- Вмикаються системи аварійного освітлення для забезпечення видимості в умовах обмеженого освітлення.

Відповідь персоналу:

- Персонал повинен негайно припинити свою діяльність та рухатися в напрямку визначених безпечних зон або укриттів.

Комунікація та інформування:

- Сповістити усіх працівників про ситуацію та надати чіткі інструкції щодо дій.

Приховання:

- Працівники повинні вжити заходів для приховання від можливих небезпек.

Використання засобів захисту:

- Вдягти засоби індивідуального захисту (респіратори, газозахисні костюми тощо), якщо це вказано в інструкціях безпеки.

Евакуація:

- Якщо це необхідно, розпочати процедуру евакуації до безпечних зон або укриттів.

Слідкування за інформацією:

- Слідкувати за інформацією від відповідальних служб та додержуватися їхніх рекомендацій.

Проведення рятувальних робіт:

- Діяти відповідно до інструкцій та співпрацювати з рятувальними службами, якщо це необхідно.

Відновлення робочої діяльності:

- Після зняття повітряної тривоги виконати процедури відновлення роботи з урахуванням інструкцій безпеки.

Важливо наголосити, що персонал повинен бути добре підготовлений та інформований стосовно процедур та правил безпеки, щоб ефективно та безпечно діяти в екстрених ситуаціях.

6.4.1 Безпекові вимоги перед початком роботи

- Ретельно переглянути робоче місце та видалити всі предмети, які можуть заважати проведенню робіт.
- Оглянути обладнання, переконатися у його відсутності зовнішніх пошкоджень та надійності заземлення, візуально перевірити його справність. Заземлення обладнання повинно здійснюватися залежно від ступеня небезпеки приміщення, де проводяться роботи.
- Заборонено увімкнювати концентратор, якщо він знаходиться в несправному стані.
- У разі виявлення несправностей повідомити старшого інженера та розпочати роботу лише після їхнього усунення.

6.4.2 Безпекові вимоги під час роботи

- Запустіть систему відповідно до інструкції з експлуатації.
- У випадку відсутності підтвердження включення або сигналу про несправність, повідомте старшому інженеру про проблему і почніть виправлення після вимкнення системи.
- Якщо в системі з'явиться тріскотнява напруга або дим, характерний для високовольтного пробою, негайно вимкніть живлення.

- При встановленні переносних приладів і вимірах обов'язково вимикайте дотику до струмоведучих частин з небезпечною напругою.
- Заборонено видаляти захисні елементи конструкції, що закривають доступ до струмоведучих частин.
- Заборонено приєднувати і від'єднувати модулі та з'єднувачі, які перебувають під напругою.
- Під час проведення регламентних робіт уважно перевірте працездатність всіх підсистем у всіх можливих режимах.
- У випадку виникнення пожежі в блоку керування концентратором в першу чергу вимкніть його з електричної мережі.
- Якщо виникає пожежа, викличте пожежну охорону, повідомте змінному інженеру і розпочніть гасіння лише після відключення всіх систем.

6.4.3 Безпекові вимоги після закінчення робіт

- Перевірте функціональність системи, яка працює в автоматичному режимі.
- При зміні чергового складу, повідомте новий склад про всі попередні проблеми і несправності у роботі системи, а також занесіть їх у журнал.
- Приберіть робоче місце після проведення регламентних робіт.
- Вимоги під час аварійних ситуацій

У випадку пожежі викличте ДСНС, повідомте старшому інженеру і розпочніть гасіння лише після відключення всіх систем.

У випадку руйнації у зв'язку з агресією росії проти України, всім вийти через евакуаційний вихід та викликати ДСНС та поліцію.

6.5 Інструкція охорони праці для оператора Vestas

6.5.1. Загальні поняття

6.5.1.1. Інструкція щодо дії поширюється на всі підрозділи підприємства.

6.5.1.2. Заневиконання цих інструкцій працівник притягується до дисциплінарної, фінансової, адміністративної та кримінальної відповідальності.

6.5.1.3. Виконання робіт в існуючій електроустановці дозволено особі віком старше 18 років, яка має пропуск: попередній медичний огляд та визнана здатність виконувати електромонтажні роботи в існуючих електричних системах та на висоті; навчання в навчальних закладах для виконання робіт з підвищеним ризиком (у професійно-технічних навчальних закладах, навчальному центрі, навчальних центрах та перепідготовці робочої сили, організацій) затвердженої програми; навчання та експертиза з електробезпеки; спеціальна підготовка та сертифікація з пожежної безпеки; вступне навчання в службі охорони праці; первинний інструктаж на робочому місці.

6.5.1.4. Працівники повинні бути проінструктовані щодо правил на робочому місці, щодо пересування через об'єкт, місця відпочинку під час процесу та обідньої перерви, замовлення закінчено.

6.5.1.5. Перед початком роботи в інтегрованій бригаді першочергово отримують інструкції щодо безпечного виконання робіт за основними та суміжними професіями та ознайомлення з правилами надання першої медичної допомоги.

6.5.1.6. Перед початком роботи усі працівники проінформовані та ознайомлені з правилами поведінки під час повітряної тривоги та планом евакуації.

6.5.2.1. Вимоги безпеки перед початком роботи

6.5.2.2. Отримати необхідні для виконання робіт засоби індивідуального захисту, інструкції, інструменти, прилади, перевірити їх комплектність та справність.

6.5.2.3. Переконайтеся, що є огороження небезпечних зон, в які можуть потрапити люди, а також знаки безпеки та відповідні ярлики. Стрілецький щиток для встановлення обладнання з умовою встановлення його на місці відразу після

підйомних робіт або між ними, повинен здійснюватися лише з дозволу керівника робіт. Біля відкритих дверних отворів для введення в чергування.

6.5.2.4. Для підготовки робочого місця, вилучення зайвих матеріалів та матеріалів, безкоштовних пропусків, виведення несанкціонованих осіб із небезпечної зони.

6.5.3. Вимоги безпеки під час роботи

6.5.3.1. Повинен дотримуватися вказівок працівників служби охорони праці діючого підприємства.

6.5.3.2. Протягом усього робочого часу підтримувати порядок та чистоту на робочому місці.

6.5.3.3. Виконувати санітарні норми та дотримуватись режимів роботи та решти, регламентованих перерв у роботі.

6.5.3.4. Не блокуйте обладнання сторонніми предметами.

6.5.3.5. Не вішайте одяг на вимикачі або розетки.

6.5.3.6. Не застосовувати відкритий вогонь.

6.5.3.7. Не сушити одяг та взуття на опалювальних приладах.

6.5.3.8. Курити тільки у відведених місцях.

6.5.3.9. Під час провітряної тривоги суворо перебувати тільки у укритті.

6.5.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи.

6.5.4.1. Привести в порядок робоче місце.

6.5.4.2. Плакати, наземні огорожі залишають на місці.

6.5.4.3. Повідомте керівнику про всі недоліки, що мали місце під час виконання роботи.

6.5.4.4. Зніміть одяг, засоби індивідуального захисту, видаліть пил, покладіть у належний простір, по можливості вимийте руки та обличчя з милом, прийміть душ.

6.5.5. Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.

6.5.5.1. У разі надзвичайної ситуації (раптова поява напруги, обрив заземлювального проводу тощо) вжити всіх можливих заходів щодо запобігання загрозам життю та здоров'ю інших людей.

6.5.5.2. Обгороджувати небезпечну зону, виходьте з неї та уникайте вторгнення сторонніх осіб.

6.5.5.3. Повідомте про надзвичайну ситуацію або аварію керівнику.

6.5.5.4. Якщо були постраждалі, надайте їм першу допомогу, при необхідності викликайте швидку допомогу.

6.5.6 Перша допомога після нещасного випадку.

6.5.6.1. Перша допомога після ураження електричним струмом. При ураженні електричним струмом негайно звільніть потерпілого від дії електричного струму, вимкнувши електричну установку електроживлення, а якщо ви не можете вимкнути - витягніть її з струмоведучих частин одягу або за допомогою імпровізованої ізоляції. При відсутності у потерпілого дихання та пульсу робити йому штучне дихання непрямий (непрямий), масаж серця, звертаючи увагу на зіниці. Розширені зіниці свідчать про різке погіршення мозкового кровообігу. У такому стані відновлення починати негайно, потім викликати швидку допомогу.

6.5.6.2. Перша допомога після поранення. Після поранення необхідно розкрити індивідуальну упаковку, накласти стерильну пов'язку, яка накладається в неї на рану

і перев'язати бинтом. Якщо окремої упаковки якось не було, для перев'язування використовуйте чисту хустку, чисту лляну тканину тощо. На ганчірку, яку накладають безпосередньо на рану, бажано капнути кілька крапель настоянки йоду, щоб отримати пляму більше, ніж рану, потім прикладіть тканину до рани. Особливо важливо застосовувати йодну настоянку таким чином при забруднених ранах.

6.5.6.3. Перша допомога після переломів, розтягнень та ударів Переломи та вивихи кінцівок необхідні для зміцнення пошкодженої шини кінцівки, фанерної пластини, палиці, картону або інших подібних предметів. Поранену руку також можна повісити, використовуючи пов'язку або носову хустку до своєї перо

6.5.6.4. Перша допомога під час поранення уламками від ракети/бпла, забезпечити безпеку, використувати особистий захист як перчатки та окуляри, терміново викликати службу екстренної допомоги та повідомити про травми від уламків ракет/бпла, оцінити стан потерпілого, за можливості зупинити кровотечу, при пораненні очей неможна доставати з ока нічого, тільки натягнути повязку на поранене око, зачейайте приїзду медичної служби.

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено новий підхід для побудови гібридних вітроенергетичних установок з вертикально-осьовим ротором, розроблено нову архітектуру інтелектуальної системи проектування на основі використання блоків оптимізації, багатоцільового та генетичного алгоритму. Використання запропонованого підходу дозволить підвищити ефективність роботи вітроенергетичних установок.

Список використаних джерел

1. ADAMS, M. (2005). Корпорація програмного забезпечення.
2. Adib, R., Murdock, H., Appavou, F., Brown, A., Epp, B., Leidreiter, A., . . . Petrichenko, K. (2016). Renewables 2016 Global Status Report. *Global Status Report*
3. *МЕРЕЖА ПОЛІТИКИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА 21 СТОЛІТТЯ (REN21)*. Adkins, C. N., & Liebeck, R. H. (1983). Design of optimum propellers. *AIAA Paper*, 83-0190.
4. Aggarwal, C. C., & Reddy, C. K. (2013). Кластеризація даних: алгоритми та застосування: CRC Press. Agrawal, S., Panigrahi, B., & Tiwari, M. K. (2008). Алгоритм багатоцільового рою частинок із нечіткою кластеризацією для диспетчеризації електроенергії. *Транзакції IEEE з еволюційних обчислень*, 12(5), 529-541.
5. Agustí, L., Salcedo-Sanz, S., Jiménez-Fernández, S., Carro-Calvo, L., Del Ser, J., & Portilla Figueras, J. A. (2012). Новий генетичний алгоритм групування для задач кластеризації. *Експертні системи з додатками*, 39(10), 9695-9703.
6. Allen, D. H., & Haisler, W. E. (1985). Введення в аерокосмічний структурний аналіз.
7. Anonymous. (2007). RotorOpt вдосконалює дизайн ротора. *LM Glasfiber News Letter*, 5.
8. . ANSYS. www.ansys.com. Отримано з www.ansys.com
9. . ANSYS, CFX. www.ansys.com. Отримано з www.ansys.com
10. . ANSYS, Fluent. www.ansys.com.
11. Armaroli, N., & Balzani, V. (2007). Майбутнє енергопостачання: виклики та можливості. *Angew Chem Int Ed Engl*, 46(1-2), 52-66. doi:10.1002/anie.200602373
12. Arora, J. S. (1989). Вступ до оптимального дизайну. *McGraw-Mill Book Company*.
13. Arroyo, A., Manana, M., Gomez, C., Fernandez, I., Delgado, F., & Zobaа, A. F. (2013). Методологія недорогої оптимізації продуктивності малих вітрових турбін. *Applied Energy*, 104, 1-9.
14. Ashuri, T., Zaaijer, M., van Bussel, G., & van Kuik, G. (2010). Аналітична модель для отримання структурних властивостей лопаті вітрової турбіни для оптимізації

та масштабування досліджень. Paper presented at the The science of making torque from wind conference, Crete, Greece.

15. ASHWILL, T. D. (2003). Інноваційні підходи до проектування великих лопатей вітрових турбін. Retrieved from Babu, G. P., & Murty, M. N. (1993). Вибір майже оптимального початкового значення в алгоритмі k-середніх із використанням генетичного алгоритму. *Pattern recognition letters*, 14(10), 763-769.
16. Back, T., Fogel, D. B., & Michalewicz, Z. (1997). *Handbook of evolutionary computation*: IOP Publishing Ltd.
17. Bak, C. (2013). Aerodynamic design of wind turbine rotors. In P. Brønsted & R. Nijssen (Eds.), *Advances in wind turbine blade design and materials*: Woodhead Publishing
18. Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 15(4), 1753-1766.
19. Bareiss, R., Guidati, G., & Wagner, S. (1997). Wake simulation for wind turbines with a free, prescribed-and hybrid-wake method.
20. Barthelmie, R., Frandsen, S., Hansen, K., Schepers, J., Rados, K., Schlez, W., . . .
21. Neckelmann, S. (2009). *Modelling the impact of wakes on power output at Nysted and*
22. *Horns Rev*. Paper presented at the European Wind Energy Conference, Stockholm, Sweden.
23. Barthelmie, R. J., Frandsen, S. T., Rathmann, O., Hansen, K. S., Politis, E. S., Prospathopoulos, J., . . . Schepers, J. (2008). Flow and wakes in large wind farms in complex terrain and offshore.
24. Barthelmie, R. J., Rathmann, O., Frandsen, S. T., Hansen, K., Politis, E., Prospathopoulos, J., . . . Phillips, J. (2007). Моделювання та вимірювання кільватерних слідів у великих ВЕС. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.