

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О. КОЛЛАРОВ
(ініціали, прізвище)
«___» _____ 2022 р.

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Дослідження роботи вітроенергетичних установок з різною
кількістю вітряків

Виконав студент 4 курсу, групи ЕЛКп-19
(шифр групи)

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
підготовки _____
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

Кирило КЕРЮХІН

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник к. т. н., Н. САВЧЕНКО

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

(підпис)

Рецензент _____

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

(підпис)

Нормоконтроль:

О. ЛЮБИМЕНКО

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

(дата)

(дата)

ЛУЦЬК – 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кирилу КЕРЮХІНУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Дослідження роботи вітроенергетичних установок з різною кількістю вітряків.

керівник роботи _____ Наталя САВЧЕНКО, канд. техн. наук
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 04 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Тип ВЕУ – з горизонтальною вісю,
кількість вітроколес ВЕУ для дослідження -2, тип вітрогенератора синхронний

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

1. Перспективи розвитку вітроенергетики.

2. Принцип побудови вітроустановки

3. Математичне моделювання ВЕУ з різною кількістю вітроколес.

4. Розробка заходів з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	Н. САВЧЕНКО, доц. каф.		
Розділ 4	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Нормоконтроль	О. ЛЮБИМЕНКО, доц. каф.		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	03.05.22 – 12.05.22	
2.	Розділ 2	13.05.22 – 23.05.22	
3.	Розділ 3	24.05.22 – 27.05.22	
4.	Розділ 4	28.05.22 – 02.06.22	
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			

Студент _____
(підпис)

Кирило КЕРЮХІН
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Наталя САВЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Керюхін Кирило Миколайович. Дослідження роботи вітроенергетичних установок з різною кількістю вітряків / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2022.

Дипломна робота має у своєму складі: вступ, чотири розділи основної частини, висновок та список використаних джерел.

У першому розділі розглянуті перспективи розвитку вітрової енергетики з точки зору як енергоресурсу країни.

У другому розділі наведені принципи побудови вітроустановок, параметри та показники їх робочих режимів. Виконаний математичний опис складових вітроустановки.

У третьому розділі проаналізовані результати моделювання вітроенергетичних установок з різною кількістю вітроколес з метою виявлення найефективнішого варіанту реалізації.

У четвертому розділі розглянуті питання охорони праці.

Ключові слова: вітроенергетична установка (ВЕУ), вітроелектростанція (ВЕС), вітроколесо, вітрогенератор, електрична мережа.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ	7
1.1 Енергоресурс вітроенергетики в Україні	7
1.2 Класифікація конструкцій вітроустановок та вітроколів	9
1.3 Аналітичний огляд методів підключення вітрових електростанцій до електричної мережі	14
1.4 Проблеми генерації електроенергії вітроелектростанціями	19
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИП ПОБУДОВИ ВІТРОУСТАНОВКИ	21
2.1 Концепції побудови ВЕУ	21
2.2 Параметри та показники робочих режимів ВЕУ	24
2.3 Математичний опис вітроколеса ВЕУ	29
2.4 Математичний опис вітрогенератора ВЕУ	30
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕУ З РІЗНОЮ КІЛЬКІСТЮ ВІТРОКОЛЕС	37
3.1 Елементи теоретичного розрахунку ВЕУ	37
3.2 Побудова ВЕУ з двома вітроколесами	41
3.3 Математичне моделювання ВЕУ з різною кількістю вітроколів	47
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	55
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	56

ВСТУП

У сучасному світі спостерігається бурхливий розвиток галузі енергетики, яка перетворює кінетичну енергію вітру на електричну, тобто вітроенергетики. Таке перетворення стало можливе за рахунок вітрогенераторів різних конструкцій, які об'єднуються у вітроелектростанції (ВЕС) з метою збільшення потужностей. Вітряні електростанції вже є частиною загальної електричної мережі, що веде до поступового переходу від моделі централізованого електропостачання споживачів, основою яких є традиційні джерела енергії, до комбінованої моделі.

У зв'язку з високим вітровим потенціалом України та зростанню частки вітрової енергетики у загальному обсязі виробництва електроенергії, виникають актуальні питання, що підлягають вирішенню стосовно покращення аеродинамічних характеристик вітроенергетичних установок (ВЕУ) й збільшення їх продуктивності в загалі. Тому з розвитком вітроенергетичних установок та збільшенням їхньої потужності також відбувається і вдосконалення їх конструкції. Удосконалюються як механічні частини конструкції вітроенергетичних установок так і покращуються та ускладнюються електричні системи управління та контролю тощо.

Вітрогенератори по принципу дії є нелінійними та різко змінними джерелами електроенергії. Залежно від типу складових ВЕУ, а саме вітрогенераторів і, враховуючи недосконалість енергосистеми, яка сама має піки та провали енергоспоживання, виникає ряд проблемних питань пов'язаних з якістю електроенергії та електромагнітною сумісністю з загальною системою – відхилення, коливання, несиметрія напруг, генерація вищих гармонік та інтергармонік.

РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Енергоресурс вітроенергетики в Україні

Наука про вітри досить ретельно вивчила і встановила якісні й кількісні залежності параметрів вітрів, їх прогнозування, залежності їх параметрів від висоти, температури, географічного розташування [1]. Першопричинами вітру завжди є нерівномірність у прогріванні сонячними променями повітряних мас і обертання Землі. Для всієї поверхні Землі складені карти з ізохронами (лініями однакового значення параметра повітря) [1].

Науково доведено, що маємо висоті ста метрів середню швидкість повітря приблизно 7 м/с. Таким чином, для потреб вітроенергетики слід керуватися залежністю швидкості вітру від висоти. Так як сила вітру збільшується з висотою, то ВЕУ розміщують на високих баштах або вежах.

Україна має досить високий потенціал вітроенергетики. На рис.1 наведена карта швидкості вітрів для країни.



Рисунок 1.1 – Карта швидкості вітру на території України

Як видно з рис.1.1 найбільший потенціал у впровадженні вітроенергетики мають південні та східні регіони. Саме у цих районах перспективно встановлювати вітроенергетичні установки та об'єднувати їх у парк з метою збільшення потужностей.

Конструкція ВЕУ, її потужність і ефективність в першу чергу залежать від швидкості вітру.

Наведемо обов'язкові вимоги, виконання яких необхідно для визначення економічної доцільності для застосування вітроустановок:

1. Визначення якісних та кількісних характеристик приземного шару атмосфери для даного регіону. Сюди входить експериментальне визначення функції [1]:

$$W = f(h, t, x, y),$$

де W – вектор швидкості вітру;

h – висота над поверхнею землі;

t – час;

x, y – географічні координати місця встановлення.

Але даних метеослужб для визначення зазначеної залежності практично не достатньо, бо вони не враховують усіх необхідних показників та параметрів. Тому для вибору місця встановлення ВЕУ має передувати моніторинг усіх вітрових характеристик щонайменше протягом двох років.

2. Вибір конструкції ВЕУ, яка по технічним параметрам досягає максимальної енергетичної ефективності при встановленні в даному місці та за умовами характеристик вітрів.

3. Порівняння економічної та технічної ефективності ВЕУ з урахуванням кліматичних умов з ефективністю інших альтернативних джерел енергії.

4. Вибір майданчика для розміщення ВЕУ з урахуванням наступних характеристик, а саме склад ґрунту, наявності енергетичної інфраструктури, також можливості заміщення енергетичних потужностей у період безвітря, тобто можливість комбінування ВДЕ.

Також необхідно враховувати вплив ВЕУ на довкілля, а саме у зоні розташування великих вітропарків виникають проблеми із прийомом сигналів телебачення. Вітропарки також впливають на міграцію перелітних птахів, є агрегатами акустичного шуму.

1.2 Класифікація конструкцій вітроустановок та вітроколів

Основним елементом будь-якої вітроенергетичної установки є вітродвигун (ВД), який зустрічає потік повітря та саме через силову взаємодію зі своїми робочими поверхнями сприймає усю кінетичну енергію повітря і потім перетворює її в механічну енергію вала. Якщо цей вал поєднати із валом генератора, то отримаємо електричну енергію, а якщо генератор відсутній, то механічна енергія вала вітродвигуна може бути використана задля виконання механічної роботи.

За функціональним призначенням усі ВЕУ можна поділити на мережні, автономні і для виконання механічної роботи як двигуна.

Всі вітродвигуни, що використовуються у складі ВЕУ, можна поділити на дві принципово різні групи: з горизонтальною віссю обертання (рис.1.2, а) і вертикальною віссю обертання (рис.1.2, б).

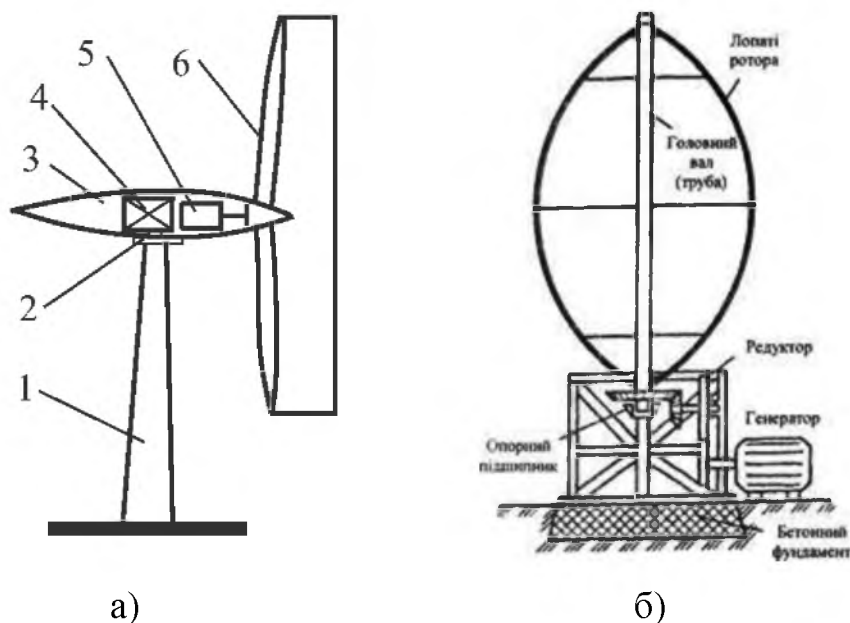


Рисунок 1.2 – Різновиди вітродвигунів

Найбільш поширені на сьогодні вітро двигуни першої групи – до 95 % за обсягом перетворюваної енергії (рис.1.2, а). Саме з такими вітро двигунами будуються сьогодні практично всі ВЕУ, а особливо ВЕУ великої потужності.

Згідно з рис. 1.2 основними складовими ВЕУ із горизонтальною віссю обертання є: 1 – башта; 2 – струмозійомник, 3 – гондола; 4 – електрогенератор; 5 – редуктор; 6 – ротор вітро двигуна [1, 2].

На рис. 1.3 наведені різноманітні типи конструкцій вітроколів для вітро двигуна із горизонтальною віссю обертання.

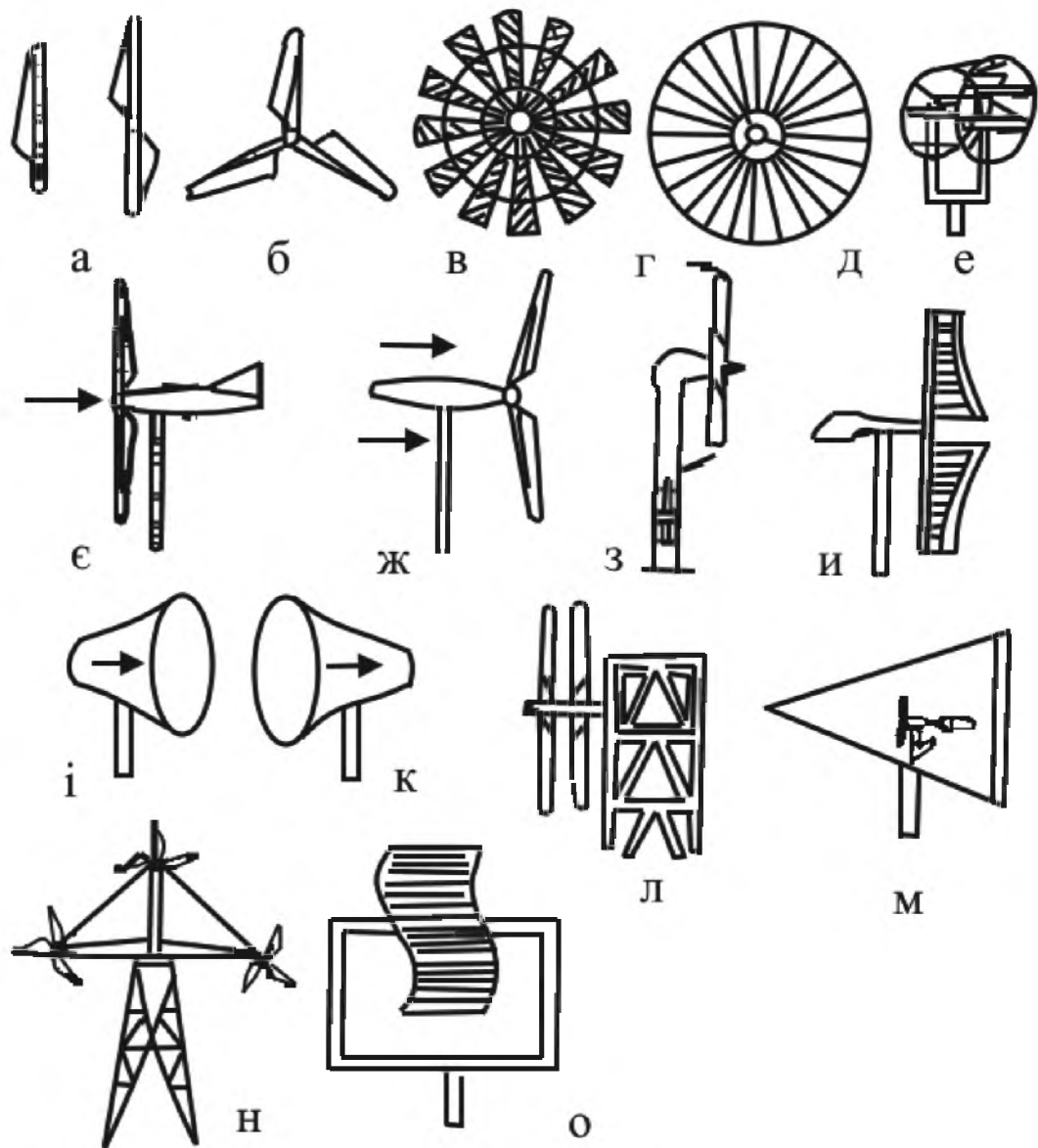


Рисунок 1.3 – Конструкція вітроколів для вітро двигуна з горизонтальною віссю обертання

Вітродвигуни із горизонтальною віссю обертання можуть мати різну кількість лопатів: від однієї, двох чи трьох із противагами (рис. 1.3 а, б, в) і до п'ятдесяти і більше (рис. 1.3 г, д, е). Конструктивно для зниження згинальних навантажень необхідно передбачити біля кореня лопаті звужену до периферії форму.

Вітроколеса також можуть бути фіксованими за напрямком (див. рис. 1.3 з), бо вони не можуть обертатися стосовно вертикальної осі, перпендикулярно до напрямку вітрового потоку [1]. Такий тип вітроколеса практично можливо застосовувати тільки за наявності одного, домінуючого напрямку вітру, але в більшості випадків систему роблять поворотною, що орієнтується за напрямком вітру.

В малих ВЕУ для цього використовують хвостові оперення, у великих ВЕУ – сервосистеми [1].

Для обмеження та регулювання частоти обертання вітроколеса при наявності великої швидкості вітру використовують ряд способів, а саме встановлення лопаті у флюгерне положення, також встановлення клапанів на лопатях або пристроїв для виведення вітроколеса з-під потоку вітру за допомогою бічного екрана, розміщеного паралельно площині обертання колеса.

Вітроколесо може бути розміщене перед баштою (рис. 1.3 є) чи за нею (рис. 1.3 ж).

Сучасний варіант старовинного вітроколеса з парусними лопатями, що за формою близький до форми повітряного гвинта (рис. 1.3 и). Аеродинамічна якість парусного крила мало якості звичайних жорстких лопатей але маса майже вдвічі менша.

Вітроприймальна конструкція може мати кілька вітроколес (рис. 1.3 н), які ще монтуються на одній башті, а також мати вітроколеса зустрічного обертання (рис. 1.3 л).

Для збільшення швидкості повітряного потоку, який потрапляє на вітроколесо як у воронку, або зниження його турбулентності можуть бути застосовані вхідні конусоподібні пристрої (рис. 1.3 і, к), а задля підвищення

кутової швидкості вітроколеса – пристрій для закручування біля нього потоку (рис. 1.3, м) [1].

Напрямок повітряного потоку на вітроколесо з горизонтальною віссю обертання може бути пряме (по вісі колеса), і перпендикулярне (рис. 1.3, о).

З технічної точки зору кращим є пряме набігання, бо це спрощує конструкцію і відповідно підвищує потужність ВЕУ при інших однакових технічних рішеннях, а саме однакових діаметрах вітроколеса.

Якщо вітроколесо має вертикальну вісь обертання, то таку ВЕУ називають роторною. ВЕУ із вертикальною віссю обертання мають ряд переваг у порівнянні із ВЕУ з горизонтальною віссю, по-перше у них відпадає необхідність у пристроях для орієнтації за напрямком вітру, установці струмозйомників по-друге значне спрощення конструкції та зниження гіроскопічних навантажень [1]. Також, така конструкція ВЕУ дозволяє за рахунок подовження вала безпосередньо встановлювати редуктор з генератором у нижній частині башти.

Типи вітроколес вітродвигунів із вертикальною віссю обертання приведені на рисунку 1.4.

У вітроприймальних пристроях із вертикальною віссю обертання також для перетворення енергії вітру використовується сила тиску чи підйомна сила. При використанні сили тиску застосовують пластинчастий (рис. 1.4, а) і чашковий (рис. 1.4, б) ротори, і як варіант ротори Совоніуса з лопатями S – подібної форми (рис. 1.4 ж, з, и), які можуть мати різну кількість лопатей.

Якщо до вітроприймальних пристроїв використовується підйомна сила, то застосовують ротор Дар'є (рис. 1.4 в, г), ротор із прямими лопатями (рис. 1.4 д) і вітроколесо з турбіною Вентурі (рис. 1.4 о) [5]. Недоліком таких вітроколес є те, що вони не можуть самотійно розкручувати цей ротор, тому для його запуску використовується генератор, який працює у режимі двигуна. Але саме ротори Дар'є на сьогоднішній день розглядаються як основні конкуренти ВЕУ з вітроколесами лопатевого типу. Перевагою роторів Дар'є є те, що вони мають порівняно невеликий початковий момент та велику швидкохідність і при цьому ще дають змогу розвивати великі питомі потужності. Роботи по їх

вдосконаленню направлені саме на підвищення початкового моменту та збільшення підйомної сили за рахунок особливого профілювання лопаті.

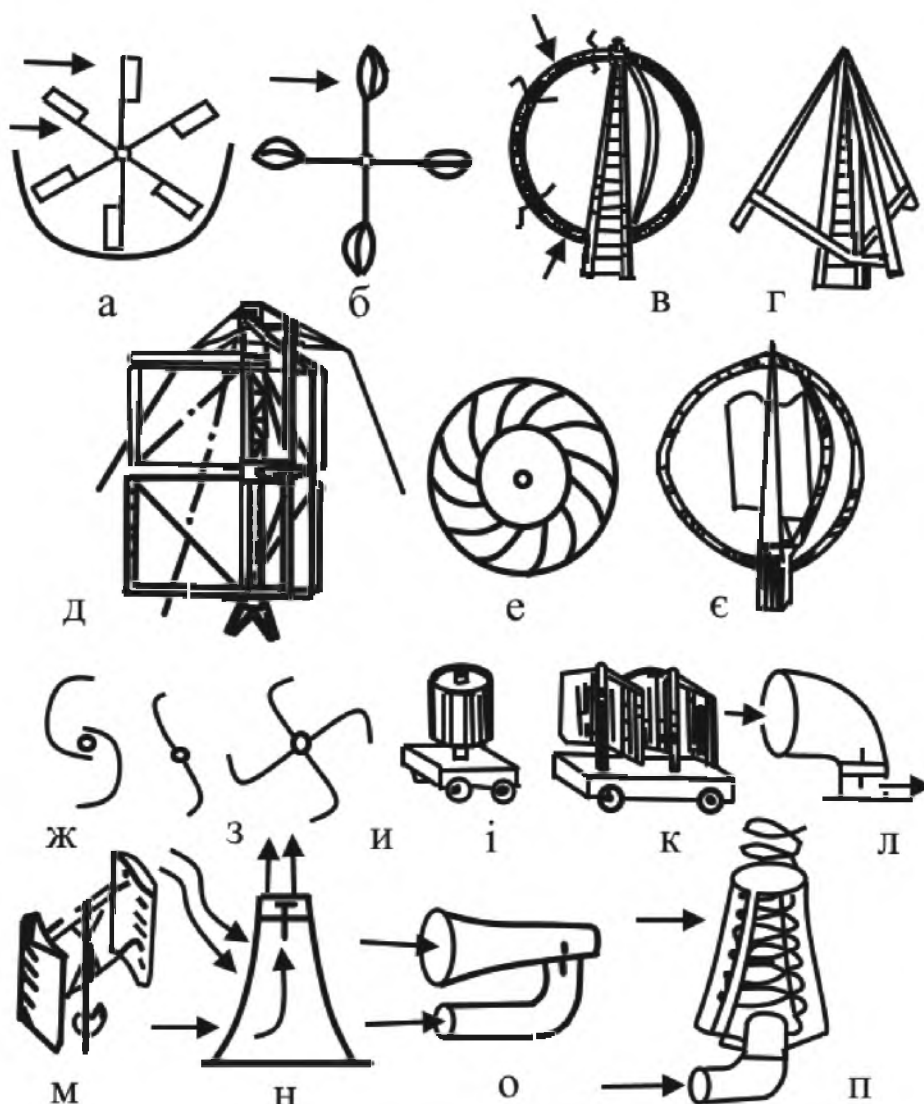


Рисунок 1.4 – Конструкція вітроколiс для вітродвигуна з вертикальною віссю обертання

До вітроприймальних пристроїв з використанням комбінації сили тиску та підйомної сили належать ротори Савоніуса та комбінований ротор Дар'є – Савоніуса (рис. 1.4, е, є), а також ротор із несучими поверхнями (рис. 1.4, к) і ротор з використанням ефекту Магнуса (рис. 4.4, і) [5].

Відомі інші типи вітроприймальних пристроїв із вертикальною віссю обертання: сонячно-вітровий пристрій (рис. 1.4, н), вітроколесо з дефлекторним пристроєм (рис. 1.4, л), вітроколесо з турбіною Вентурі (рис. 1.4, о) і вітроколесо з вихровим закручуванням потоку (рис. 1.4, п) [1, 5].

Таким чином, виконавши аналіз конструктивних особливостей складових БЕУ можливо зробити висновок, що найбільш доцільним на сьогодні є застосування лопатевих вітроколес з горизонтальною віссю обертання, усі інші моделі потребують подальшого розвитку та підвищення техніко-економічних показників.

1.3 Аналітичний огляд методів підключення вітрових електростанцій до електричної мережі

Для розгляду перспектив збільшення частки вітроенергетики у загальному виробництві електричної енергії необхідно чітко мати уяву про повну асиміляцію ВЕС у Енергетичну систему країни.

Потужність ВЕС визначається виразом:

$$P_{BEC} = \frac{1}{2} \rho_n \pi R^2 u^3 C_p(\lambda) \eta_{м.п.} \eta_{е.г.},$$

де P_{BEC} – електрична потужність, що генерується ВЕС;

ρ_n – густина повітря;

R – радіус вітроколеса;

u – швидкість вітру;

$C_p(\lambda)$ – коефіцієнт потужності вітроколеса;

$\eta_{м.п.}$ – коефіцієнт корисної дії механічної передачі;

$\eta_{е.г.}$ – коефіцієнт корисної дії електрогенератора.

Значення коефіцієнта потужності C_p залежить від швидкості вітроколеса λ , що визначається як відношення лінійної швидкості кінців лопаті

до швидкості вітру. Для кожного конкретного конструктивного типу вітроколеса існує своя залежність $C_p(\lambda)$, яка досягає максимального значення при деякому оптимальному значенні швидкохідності [6]. При цьому відбір потужності від вітрового потоку буде максимальним [6].

ВЕС можуть бути застосовані як в складі автономних систем, так і працювати паралельно з електромережею в складі комбінованої електричної системи. При паралельній роботі з енергосистемою параметри електроенергії, які генеруються ВЕС (амплітуда напруги, частота та ін.), повинні бути синхронізовані з параметрами електромережі.

Основою ефективного використання вітроенергетичного потенціалу є відповідність між швидкістю вітру і частоти обертання вітроколеса, що відповідно вимагає широкого діапазону зміни швидкості обертання вала електрогенератора. Така залежність встановлюється така званою величиною швидкохідності, яка обумовлена конструкцією вітроколеса. Але також можна підтримувати стабільність частоти обертання ротора електрогенератора і тоді значна частина енергії вітру залишиться невикористаною, що знижує ефективність таких установок. За цих умов визначальним для електрогенератора ВЕС є допустимість зміни діапазону швидкості обертання за умови синхронізації параметрів виробленої електроенергії з відповідними параметрами мережі[6].

Схеми приєднання ВЕС до електричної мережі різняться в залежності від типу електрогенератора.

Існує чотири основні концепції побудови електричної частини вітрогенератора [3]:

- тип А – із постійною швидкістю обертання (рис. 1.5,а);
- тип В – з обмеженим регулюванням швидкості обертання, також званий OptiSlip (рис. 1.5, б);
- тип С – з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти (рис. 1.5, в);
- тип D – з регульованою швидкістю обертання з повномасштабним перетворенням частоти (рис. 1.5, г).

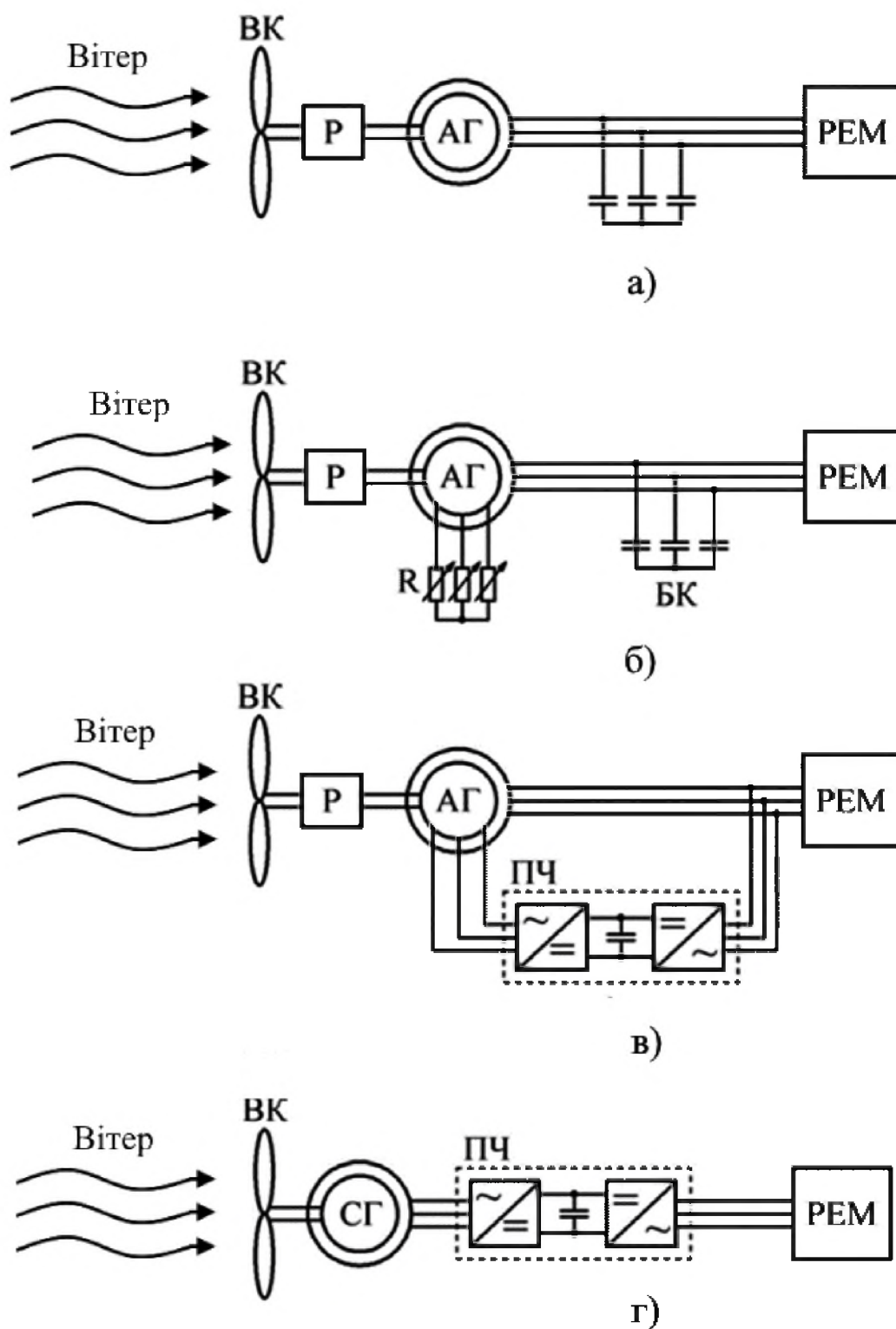


Рисунок 1.5 – Схеми приєднання ВЕС до електричної мережі:

ВК – вітроколесо; Р – редуктор (мультиплікатор); АГ – асинхронний генератор; БК – батарея конденсаторів; R – змінні резистори в колі ротора АГ;

ПЧ – перетворювач частоти; СГ – синхронний генератор; РЕМ – розподільна електрична мережа

На рис. 1.5, а) приведена схема приєднання ВЕС, яка складається з вітряної турбіни та асинхронного генератора з короткозамкненим ротором, що приєднаний до електромережі. Потужність такого асинхронного генератора знаходиться у діапазоні від десятків кВт до кількох МВт. Перевагами такої схеми приєднання можна назвати низьку вартість, простоту експлуатації та невеликі габарити та маса.

Недоліком можна вважати для даних ВЕУ це погана керованість режимними параметрами, а саме величинами напруги і частоти, що потрібно при різкій і сильній зміні частоти обертання вітроколеса під час поривчастого вітру, і у випадку різкої зміни величини електричного навантаження споживачів.

Досконалішим варіантом підключення ВЕС є схема з асинхронним генератором з фазним ротором, швидкість якого регулюється підключенням змінного опору (рис. 1.5, б). Вітряні турбіни такого типу мають систему керування величинами ковзання та частоти обертання ротора генератора. Така система дозволяє швидко реагувати для зміни кута повороту лопатей турбіни та підтримувати потужність генерації у мережу практично на рівні номінального значення при різких змінах швидкості обертання вітроколеса.

Процес зміни ковзання частоти обертання ротора генератора відбувається шляхом підключення або відключення резисторів в коло обмотки ротора, що збільшує діапазон регулювання у порівнянні з асинхронним генератором з короткозамкненим ротором.

Така схема ВЕС із асинхронними генераторами з прямим приєднанням до електромережі, набули значного розповсюдження завдяки простоті конструкції і досить низькій вартості в тому числі і на Україні.

Недоліком такого асинхронного генератора з фазним ротором є досить високий рівень споживання реактивної потужності, необхідний для створення магнітного поля збудження, що веде до додаткових втрат реактивної потужності в електромережі. Також має місце зниження надійності роботи ВЕУ за рахунок застосування у складі редуктора з високим коефіцієнтом перетворення. А у випадку приєднання ВЕС до електричної мережі з низькою пропускною

здатністю, в мережі виникають суттєво помітні коливання напруги в умовах появи різких поривів вітру, бо недостатня швидкодія системи зміни кута лопатей вітроколеса.

Кращім варіантом схеми приєднання ВЕС до електричної мережі є схема з системою керування величиною ковзання частоти асинхронного генератора, яка реалізується на базі перетворювача частоти, ввімкнутого в коло ротора. А статор асинхронного генератора у цій схемі приєднаний безпосередньо до електромережі (рис. 1.5, в).

Саме така схема дає можливість отримати стабільні регульовані параметри напруги і частоти на виході вітрогенератора в широкому діапазоні швидкості обертання вітроколеса. Таке регулювання вихідної потужності є досить складним у реалізації і відповідно вартість такого варіанту ВЕС є суттєво великою у порівнянні з варіантами, наведеними раніше. З цієї причини, ВЕС з асинхронними генераторами застосовується дуже рідко, бо це доцільно з економічної точки зору.

Більш перспективним є варіант застосування синхронних генераторів ВЕС у складі (рис. 1.5, г). Регулювання напруги в синхронних генераторах відбувається відносно легко за рахунок зміни струму збудження обмотки ротора [3]. Також, синхронні генератори можуть генерувати реактивну потужність в мережу, що сприяє зменшенню втрат електроенергії [3].

Але для таких генераторів необхідно перебачати жорстку стабілізацію частоти обертання ротора і як наслідок обертання вітроколеса. Цей недолік впливає на зниження ефективності використання зповна енергії вітру у широкому діапазоні робочих швидкостей. За умов нестабільного поривчастого вітру значно погіршується стійкість роботи таких генераторів, під'єднаних паралельно до електромережі [3]. Цей факт не дозволяє застосовувати схеми з прямим підключенням синхронних генераторів до електричної мережі, особливо в районах з різким і поривчастим вітром [3]. Також зі збільшенням потужності синхронного генератора збільшуються маси самого генератора, мультиплікатора, вітроколеса та всієї БЕУ.

Ця проблема може бути вирішена застосуванням тихохідних синхронних генераторів у складі ВЕУ. Вал такої синхронної машини з'єднується напряму з вітроколесом, тому відпадає необхідність в застосуванні додаткових приладів, а саме мультиплекатора, при цьому відповідно знижується і частота струму виробленого генератором. Тому виникає проблема прямої передачі електроенергії в мережу в схемах з тихохідним синхронним генератором, рішенням якої є застосування перетворювача частоти для узгодження параметрів виробленої електроенергії з параметрами мережі [6].

Перевагою даного рішення є те, що за рахунок використання перетворювача частоти діапазон потужності, що генерується ВЕС, може бути значно розширений [6]. Недоліком даної схеми є необхідність застосування перетворювача частоти з номінальною потужністю, рівною потужності синхронного генератора, що значно підвищує вартість ВЕС [3].

Аналіз схем підключення ВЕС до електромережі, представлених на рис 1.5, дозволяє зробити висновок, що саме схема на основі тихохідного синхронного генератора є найдоцільнішою для побудови ВЕС.

1.4 Проблеми генерації електроенергії вітроелектростанціями

Основною проблемою вітрової енергетики є нерівномірність потоку первинної енергії і відповідно і генерації, що призводить до труднощів узгодження графіків генерації та споживання енергії як у автономних так і в комбінованих системах.

Вітер на різних висотах в атмосфері Землі для кожної точки її поверхні характеризується певною швидкістю, яка є випадковою змінною у просторі та в часі, що залежить від багатьох факторів місцевості, сезону року та погодних умов [1]. Всі процеси, безпосередньо пов'язані з використанням поточного значення швидкості вітру, зокрема, генерація електроенергії ВЕУ, мають випадковий характер і їх характеристики мають статистичне розкидання і невизначеність середніх очікуваних значень [1].

Таким чином, можливо сформулювати основні проблеми, що є перешкодою широкому впровадженню вітроенергетики:

- нестабільність таких параметрів як вихідна потужність ВЕУ з причини мінливості вітрового потоку, який надходить на лопаті вітроколеса;
- нелінійна залежність енергетичної характеристики потужності, що генерується, від швидкості вітрового потоку;
- низька ефективність ВЕУ при малих швидкостях вітру, яка сягає менше 5 м/с;
- спотворення ландшафту;
- високий рівень шуму;
- досить висока вартість технічної реалізації процесів регулювання частоти обертання ротора.

Вирішенням вище зазначених проблем є розробка більш ефективних способів регулювання частоти обертання генератора та генеруємої потужності.

Також для підвищення ефективності ВЕУ краще їх використовувати у якості додаткового джерела відновлювальної енергії у комбінованих системах електропостачання.

РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИП ПОБУДОВИ ВІТРОУСТАНОВКИ

2.1 Концепції побудови ВЕУ

Вітроенергетична установка складається з взаємопов'язаного обладнання та споруд з основним призначенням перетворювати енергію вітру в енергію електричну, механічну та теплову.

Основною частиною ВЕУ є вітроагрегат, який складається з вітродвигуна, проміжної системи передачі енергії на навантаження і самого споживача.

Вітродвигун призначений саме для перетворення кінетичної енергії вітру на механічну енергію робочого руху вітродвигуна. Робочим рухом вітродвигуна є здебільшого круговий обертальний рух. Але відомі пропозиції щодо використання коливального руху.

У вітродвигунів з обертальним рухом, пристроєм, який саме сприймає аеродинамічні навантаження від вітрового потоку і перетворює енергію вітру на механічну енергію робочого кругового обертального руху, є лопатева система або вітроколесо. Лопатева система вітродвигуна з робочим круговим обертальним рухом що буде розглядатися у роботі має горизонтальну вісь обертання (рис. 2.1).

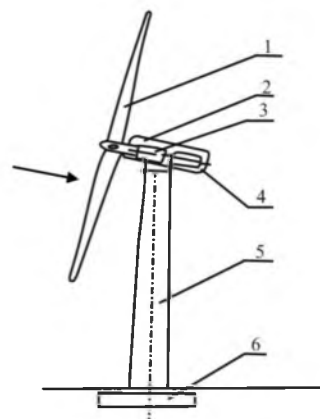


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема горизонтально-осьового вітроагрегату:

1 – вітродвигун; 2 – гондола; 3 – мультиплікатор; 4 – навантаження (електрогенератор); 5 – вежа; 6 – фундамент

У процесі розрахунку, проектування або дослідження обраного вітродвигуна, крім вітрових умов його роботи, необхідно враховувати як особливості самого вітроагрегату, так і всієї БЕУ. А саме враховувати вид енергії, що виробляється, рівень потужності, роботу з постійною або змінною частотою обертання вітроколеса, спосіб управління, тип системи передачі вітрової потужності споживачеві.

За рівнем потужності БЕУ поділяють на чотири основні групи:

- дуже малої потужності – менш 5 кВт;
- мінімальної потужності – від 5 до 99 кВт;
- середньої потужності – від 100 до 1000 кВт;
- великої потужності – понад 1 МВт.

Також вітроустановки кожної групи мають конструктивні відмінності, а саме типом фундаменту, способом встановлення вітроагрегату на вітер, системою управління, системою передачі вітрової потужності, способом монтажу та способом обслуговування [1].

Класифікація БЕУ в сферах застосування визначається їх призначенням. При розрахунку та проектуванні вітродвигуна та виборі його номінальних параметрів необхідний облік типу навантаження (електрогенератор, водяний насос тощо), типу системи передачі вітрової потужності до споживача, типу системи генерування та акумулювання електроенергії [1].

Але найбільшу увагу при дослідженні БЕУ приділяють саме її електричній частині, складовими якої є вітродвигун, вітрогенератор, контролер заряду акумуляторної батареї, інвертор та самі акумуляторні батареї. Та цей склад може бути змінений за рахунок зміни системи для зберігання енергії.

Технічній реалізації БЕУ завжди передуює математичне моделювання.

Для формування вимог щодо складання універсальної комп'ютерної моделі БЕУ потрібно спочатку визначити граничні умови застосування моделі [7].

Основною характеристикою, що завжди впливає на ефективність вітроенергетичної установки, є саме коефіцієнт використання енергії вітру (C_p)

– це відношення механічної потужності вітроколеса до повної потужності енергії вітру, що проходить через площу вітроколеса ВЕУ.

Комп'ютерна модель ВЕУ завжди базується на побудованій функціональній схемі. Для нашого випадку така схема наведена на рис. 2.2.

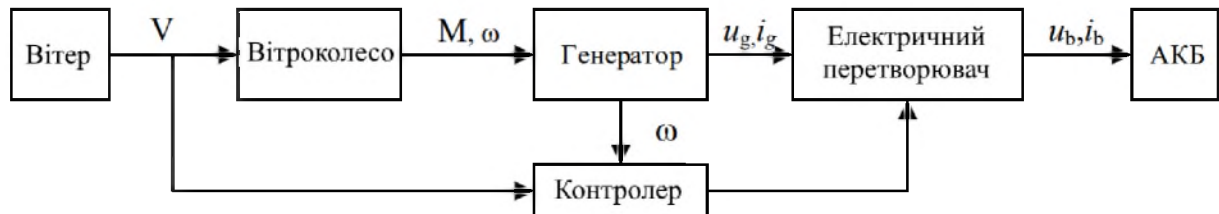


Рисунок 2.2 – Функціональна схема імітаційної моделі ВЕУ

Особливістю наведеної моделі є наявність модулю контролера вітроенергетичної установки, який працює за алгоритмом, що задається користувачем. При цьому можна виділити наступні способи управління, що можливо застосовувати у різних типах ВЕУ, які можуть бути повністю реалізовані комп'ютерною моделлю [7]:

- ВЕУ, яка працює при постійній частоті обертання вітроколеса;
- ВЕУ, що працює за кількох фіксованих частот обертання вітроколеса шляхом перемикання обмоток генератора;
- ВЕУ, що працює за кількох фіксованих частот обертання вітроколеса шляхом перемикання передавального відношення мультиплікатора;
- ВЕУ, що працює при змінній частоті обертання та використовує електричний перетворювач із регулятором потужності.

Метою моделювання різних алгоритмів управління ВЕУ є визначення продуктивності ВЕУ під час роботи під управлінням цих алгоритмів при різних зовнішніх впливах, а також розробки та оптимізації нових алгоритмів у ході подальших досліджень та розробок, у тому числі натурних випробувань реальних об'єктів [7].

2.2 Параметри та показники робочих режимів ВЕУ

Головним режимом роботи ВЕУ є робочий режим, у якому саме спостерігається перетворення енергії вітру у електричну енергію. Розглянемо ці параметри, які мають вплив на генерацію електричної енергії.

На деякій відстані перед вітроагрегатом, де атмосферний потік, що набігає, рівномірний, кінетична енергія P_0 маси m повітряного потоку виражається величиною:

$$P_0 = \frac{m \cdot V_0^2}{2},$$

де m – маса повітряного потоку;

$$m = \rho \cdot A \cdot V_0,$$

V_0 – швидкість вітру;

A – ометана площа для горизонтально-осьового вітродвигуна:

$$A = \pi D_n^2 / 4,$$

D_n – діаметр кола, що описується найбільш віддаленими від осі обертання вітроколеса частинами лопатей.

Розташована потужність повітряного потоку $N_{вітро}$, що натікає на вітродвигун:

$$N_{вітро} = \frac{\rho V_0^3}{2} A.$$

Вітродвигун витягує з вітрового потоку лише частину потужності і відповідно передає її далі електрогенератору.

Коефіцієнтом використання енергії вітру:

$$C_p = \frac{N_{\text{вд}}}{N_{\text{вітро}}},$$

де $N_{\text{вд}}$ – потужність вітродвигуна.

$$N_{\text{вд}} = C_p \frac{\rho V_0^3}{2} A.$$

Відношення окружної швидкості кінця лопаті на периферії U_R до швидкості обуреного потоку вітру V :

Коефіцієнтом швидкохідності вітродвигуна:

$$X = \frac{U_R}{V_0} = \frac{\Omega R_n}{V_0},$$

де U_R – колова швидкість кінця лопаті на периферії;

V_0 – швидкість обуреного потоку вітру;

Ω – кутова швидкість обертання вітродвигуна.

Для поточного радіусу r користуються поняттям місцевого коефіцієнта швидкохідності;

$$x = \frac{U}{V_0} = \frac{\Omega r}{V_0}$$

Коефіцієнт крутного моменту $M_{кр}$, що розвивається вітродвигуном:

$$C_M = \frac{M_{кр}}{\pi R_n^3 \rho \frac{V_0^2}{2}}$$

Величини C_p , C_M , X пов'язані між собою залежністю;

$$C_p = C_M X$$

На вітроколесо діє сила осьового або лобового тиску, що є сумарним аеродинамічним навантаженням на поверхню лопатей вітроколеса, що саме утворюється у результаті осьового повного опору профілю лопаті вітровому потоку.

Відношення осьової сили P (сили лобового тиску), що діє на лопатеву систему вітродвигуна, до швидкісного тиску (напору) $\frac{\rho V_0^2}{2} A$, а на поверхню, що омитається лопатями, називають коефіцієнтом осьового (лобового) тиску:

$$B = \frac{P}{\frac{\rho V_0^2}{2} A},$$

де P – осьова сила.

Потужною, а саме енергетичною, характеристикою вітроагрегату називається розмірна залежність потужності N_m , що розвивається на валу вітродвигуна, від швидкості вітру V_0 незагальмованого потоку перед ним (рис. 2.3). Вітродвигун під дією сили вітру завжди починає свій обертальний рух без навантаження з якогось мінімального значення швидкості вітру V_{min} . Встановлено, що ця швидкість становить 2,5...5 м/с. При досягненні швидкості потоку, що дорівнює розрахунковій швидкості вітру $V_{розр}$, вітродвигун розвиває номінальну потужність $N_{вд,ном}$, саме максимальне значення вихідної потужності, на яку розрахований вітроагрегат у довготривалому режимі роботи. Відомо, що

у діапазоні швидкостей вітру від V_{min} до $V_{розр}$ регулювання вітродвигуна, крім моменту пуску, не відбувається, але потім у діапазоні швидкостей від розрахункової швидкості $V_{розр}$ до максимальної V_{max} набуває чинності система регулювання [7]. Максимальна робоча швидкість вітру V_{max} – це швидкість вітру, за якої розрахункова міцність вітроагрегату дозволяє йому працювати (виробляти електроенергію) без пошкоджень. Якщо регулювання здійснювати саме поворотом лопаті, то можна утримувати потужність вітродвигуна у цьому діапазоні вітру, близької до постійної (крива 2, рис. 2.3). При досягненні максимальної робочої швидкості вітру V_{max} (зазвичай 25...30 м/с) вітродвигун зупиняють та виводять з-під вітру, ставлячи його лопаті у флюгерне положення [7].

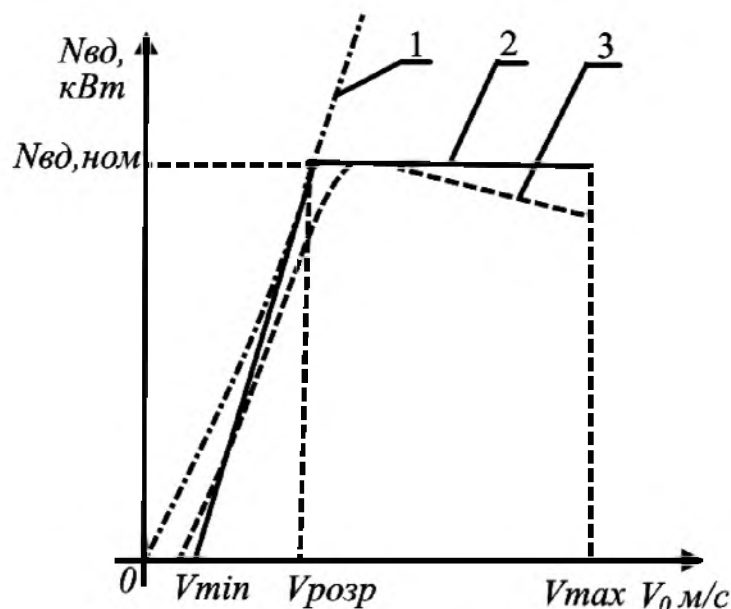


Рисунок 2.3 - Залежність потужності вітродвигуна від швидкості вітру:
 1 - $N_{вип}$, потужність вітрового потоку; 2 - $N_{дов}$, Потужність вітродвигуна, регульованого поворотом лопаті; 3 - $N_{дов}$, потужність вітродвигуна, що регулюється за рахунок зриву потоку з лопаті

Значну частину горизонтально-осьових вітроагрегатів к яких потужністю $N_m > 500$ кВт випускають з лопатями, що неповертаються, це дуже полегшує їх конструктивне виконання. Тоді для таких ВЕУ регулювання потужності

вітродвигуна зі зростанням швидкості вітру здійснюється за рахунок виконання профілю лопаті змінним уздовж радіусу спеціальним чином [7]. В результаті, починаючи з деякої швидкості вітру, на периферії лопаті виникає зрив потоку, що охоплює зростанням швидкості вітру все більшу відстань, починаючи від периферії лопаті в напрямку до її втулкової частини. Наявність зриву зменшує потужність, що розвивається вітродвигуном, і потужнісна характеристика набуває вигляду кривої 3 (Рис. 2.3) [7].

Домінуючим конструктивним виконанням загального призначення є вітрова турбіна з горизонтальною віссю. Слід зазначити, що вихідна потужність за своєю сутністю є нестійкою та некерованою.

Сучасний вітроагрегат загального призначення наведено на рис. 2.4.

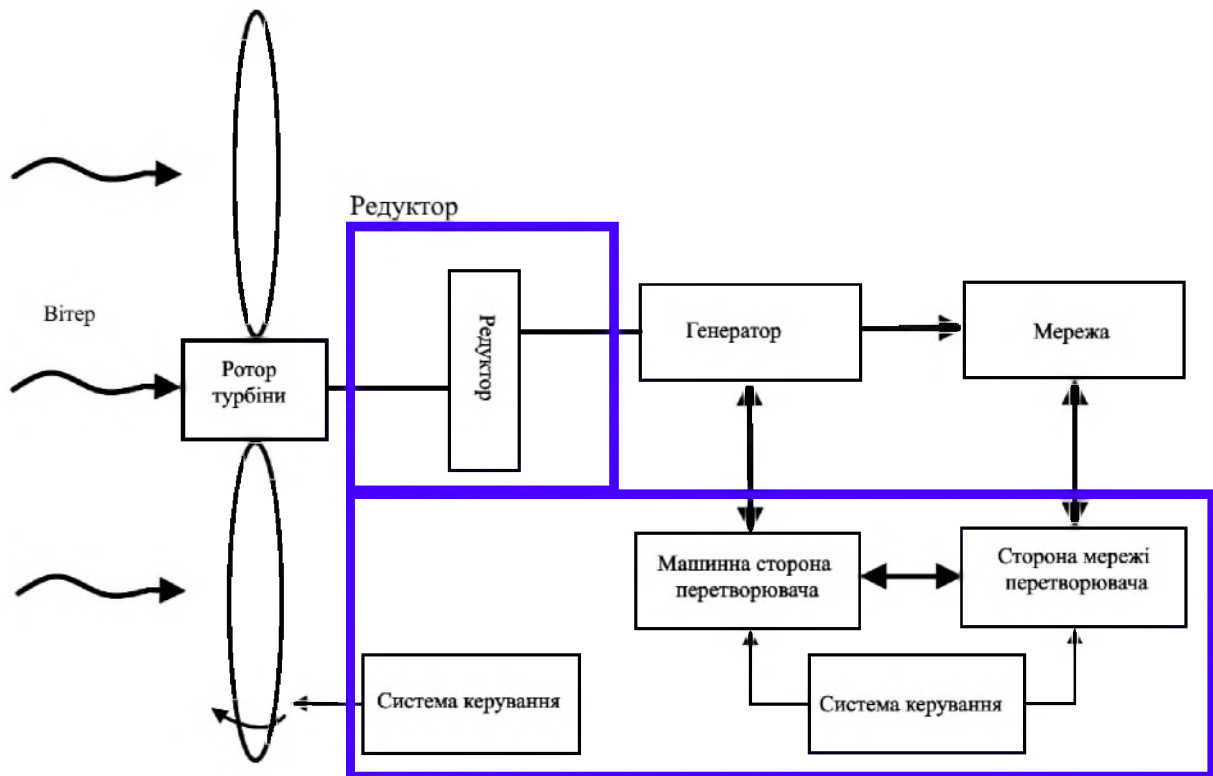


Рисунок 2.4 – Сучасна схема вітрових турбін

Типова вітряна турбіна складається з наступних підсистем [3,6]:

- ротор турбіни та лопаті гвинта (рушійна сила);
- привід (вали, редуктор, муфти, механічний);

- електрична частина (кабелі, комутаційні апарати, трансформатори та силові електронні перетворювачі, споживачі).
- система управління.

2.3 Математичний опис вітроколеса ВЕУ

Модель вітроколеса може бути представлена наступним диференціальним рівнянням для обертального руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{em} - M_o,$$

де J – момент інерції системи;

ω – кутова швидкість;

M_a – аеродинамічний момент вітроколеса;

M_{em} – електромагнітний момент генератора;

M_o – момент опору втрат, що враховує тертя та інші втрати.

Аеродинамічний момент ротора:

$$M_a = C_p(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \omega},$$

де ρ – щільність повітря;

V – швидкість вітру;

S – омітана площа;

ω – кутова швидкість вітроколеса.

Аеродинамічна потужність:

$$P_a = C_p(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}.$$

Залежність C_p від швидкохідності Z досить добре апроксимується функцією виду [8]:

$$C_p(Z) = \left(\frac{c_1}{Z} - c_2 \right) \cdot e^{\frac{c_3}{Z}} + c_4,$$

де $c_1 \dots c_4$ – коефіцієнти, що підбираються для заданої конструкції вітроколеса за відомою аеродинамічною характеристикою [2];

Z – швидкохідність:

$$Z = \frac{\omega \cdot r}{V}.$$

Графік залежності коефіцієнта C_p від швидкохідності Z (безрозм.) представлений рисунку 2.5.

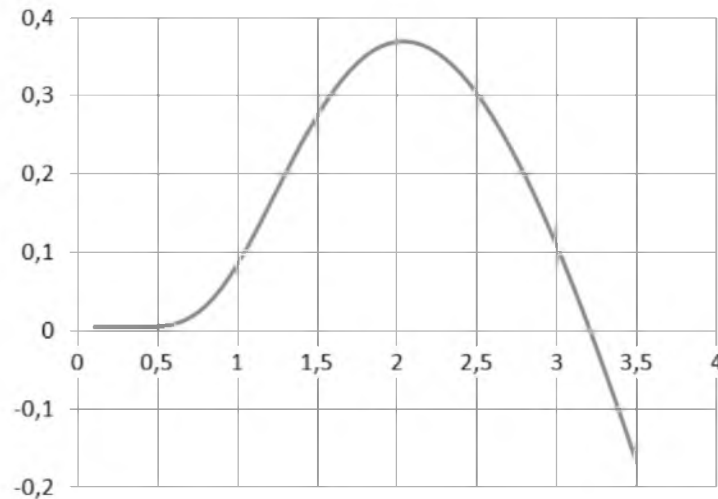


Рисунок 2.5 – Залежність C_p від швидкохідності Z

Момент опору на валу дорівнює $M_c = \frac{P_M}{\omega}$, де P_M - механічна потужність на валу генератора.

2.4 Математичний опис вітрогенератора ВЕУ

До вітрогенераторів пред'являються особливі вимоги до їх роботи. Однією й головною особливістю є те, що генератор приводиться у обертання вітроколесом, швидкісний режим якого залежить від швидкості вітру і є завжди непостійним [8].

Вище було визначено, що для застосування у вітроенергетичних установках малої потужності найбільше доцільно застосовувати синхронні електричні машини з збудженням від постійних магнітів.

Моделювання генератора ВЕУ проводиться на основі дослідження ряду особливостей електричної машини [8]. Застосований генератор є синхронною електричною машиною з збудженням від постійних магнітів і з осьовим напрямом магнітного потоку і беззалізним якорем, що містить обмотки статора. Особливістю проектування такого генератора з аксіальним зазором є відсутність втрат на перемагнічування бо відсутній сталевий магнітопровід та відповідно індуктивність обмоток, впливом якої в імітаційному моделюванні ВЕУ можна знехтувати [7,8].

Для імітаційного моделювання алгоритмів керування потужністю ВЕУ з метою оптимізації вимог до обчислювальних ресурсів у рамках поставленого завдання запропоновано наступну модель електричного генератора. Виходячи зі схеми заміщення, напруга фазної обмотки генератора дорівнює:

$$u = e - r \cdot i - L \frac{di}{dt},$$

де e – електрорушійна сила (ЕРС);

r – активний опір фазної обмотки;

i – струм у фазній обмотці;

L – індуктивність фазної обмотки.

Для зменшення впливу параметрів електричної машини на результати дослідження алгоритмів управління ВЕУ було прийнято, що r і L дорівнюють нулю, а ЕРС в обмотках генератора задається такими рівняннями [8]:

$$\begin{cases} e_A = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t), \\ e_B = k \cdot \omega \cdot \sin\left(2p \cdot \omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right), \\ e_C = k \cdot \omega \cdot \sin\left(2p \cdot \omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases}$$

У системі рівнянь прийнято такі позначення:

e_A, e_B, e_C – ЕРС відповідних обмоток генератора;

k – коефіцієнт конструкції генератора;

$2p$ – число пар полюсів;

ω – кутова швидкість ротора генератора;

t – час.

Рисунок 2.6 наведено блок-схему моделі генератора у пакеті MATLAB/Simulink.

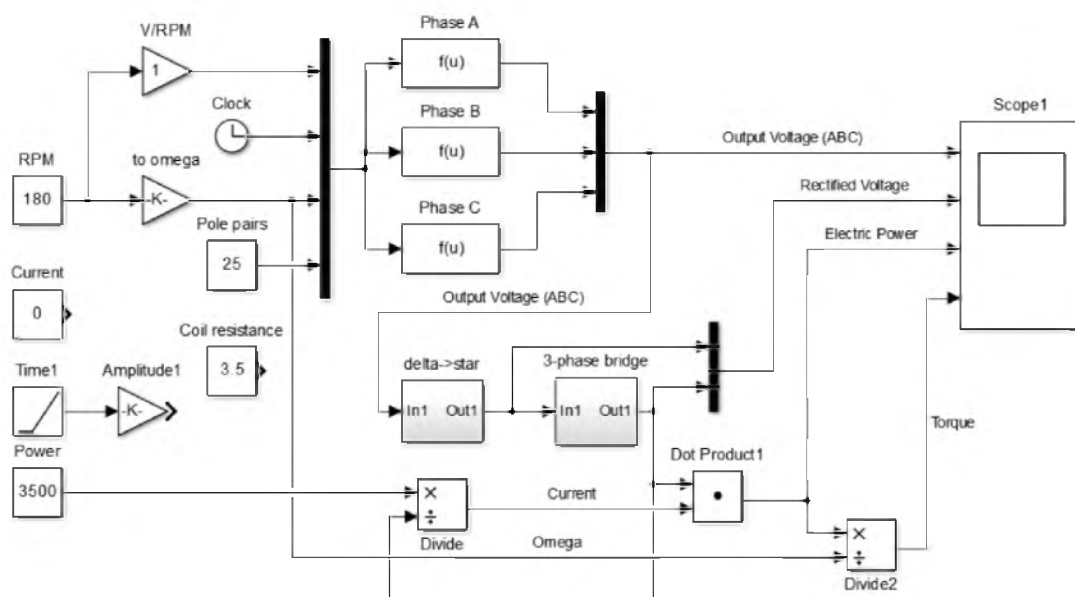


Рисунок 2.6 – Блок-схема моделі генератора

На рисунку 2.7 наведено блок-схему моделі розрахунку з'єднання обмоток генератора за схемою «зірка».

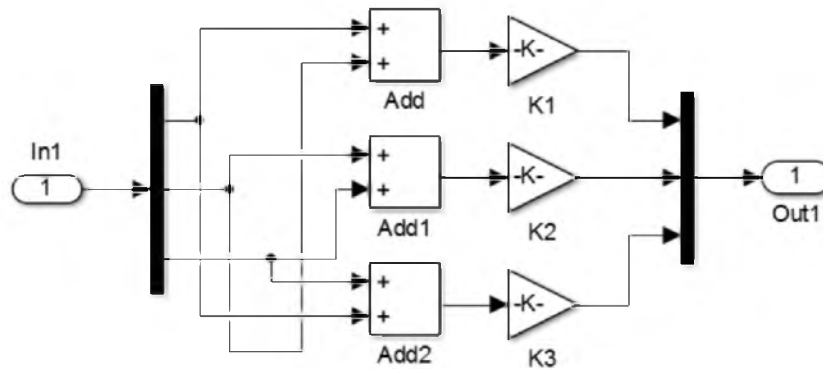


Рисунок 2.7 – Блок-схема моделі з'єднання обмоток "зіркою"

На рис. 2.8 наведено блок-схему моделі для розрахунку роботи трифазного випрямного мосту з метою імітації роботи генератора змінного струму на навантаження постійного струму.

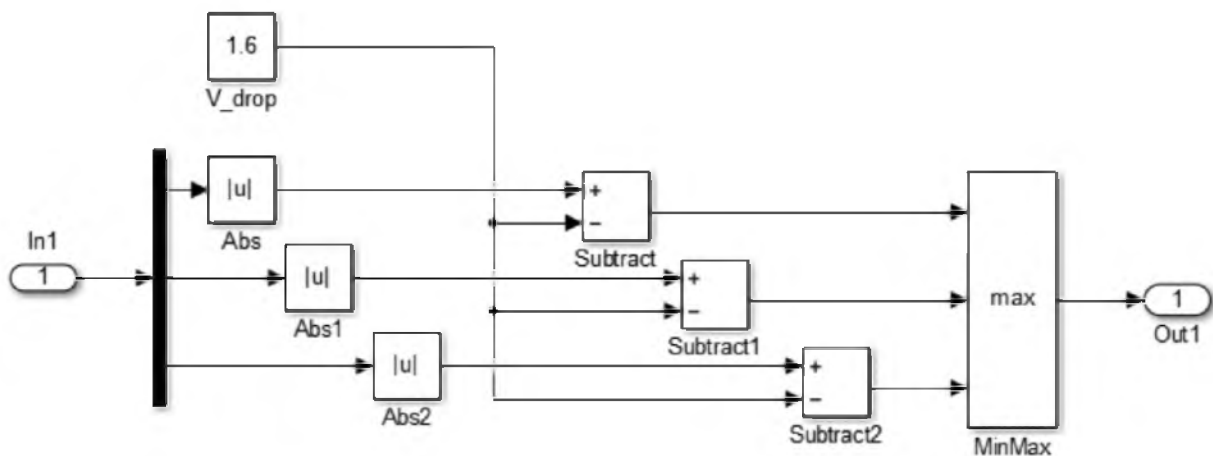


Рисунок 2.8 – Блок-схема моделі трифазного випрямляючого мосту

На рис. 2.9 приведені результат моделювання роботи досліджуваного генератора з параметрами частоти обертання валу 180 об/хв на сталому ході. Верхній графік демонструє ЕРС у фазних обмотках генератора, а нижній графік – напруги на вході та виході випрямляча.

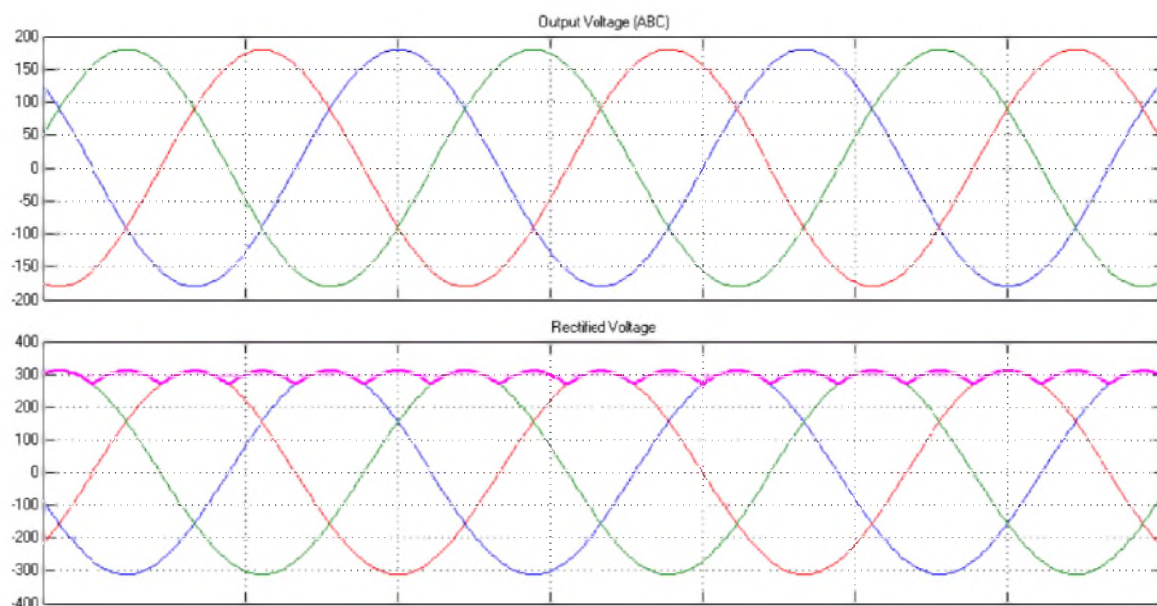


Рисунок 2.9 – Напруги на фазних обмотках та виході випрямляча

На рисунку 2.10 маємо результат моделювання роботи генератора з частотою обертання валу 180 об/хв та роботі на навантаження 10А. Верхній графік показує електричну потужність генератора, а нижній графік – пульсацію електромагнітного моменту.

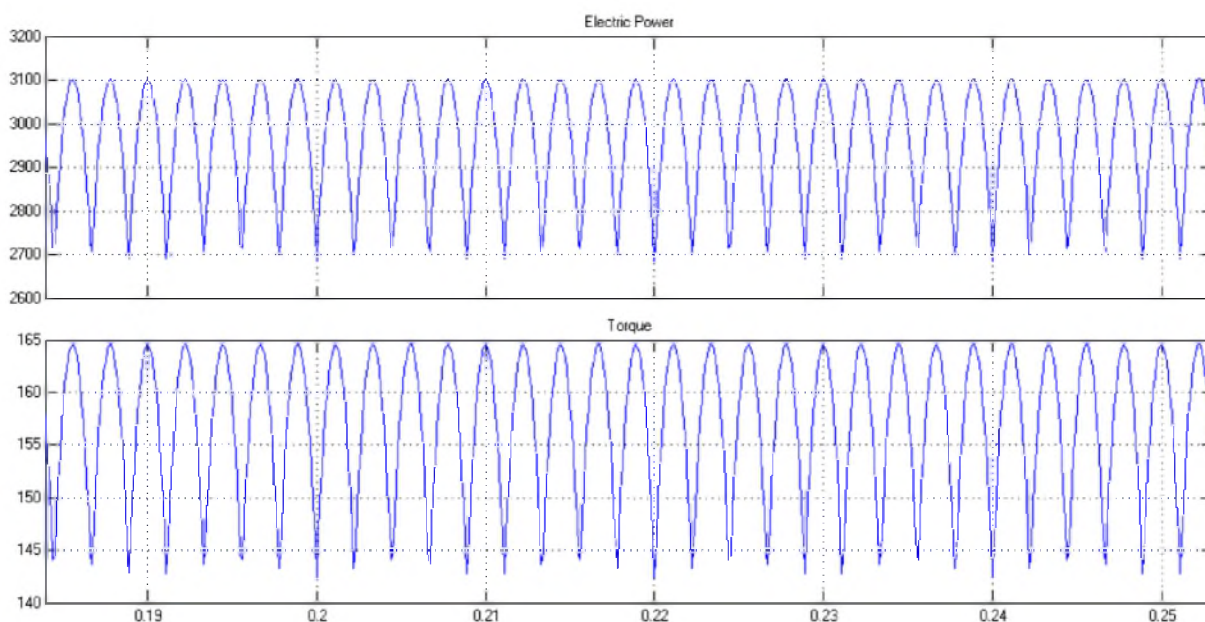


Рисунок 2.10 – Результат моделювання роботи генератора з трифазним мостовим випрямлячем на навантаження

За результатами моделювання можна визначити необхідність управління зниженням швидкості, або управлінням кутом нахилу вітроколеса, тому основні функції управління – це оптимізація потужності у зоні 2 і обмеження потужності у зоні 3 (рис.2.11).

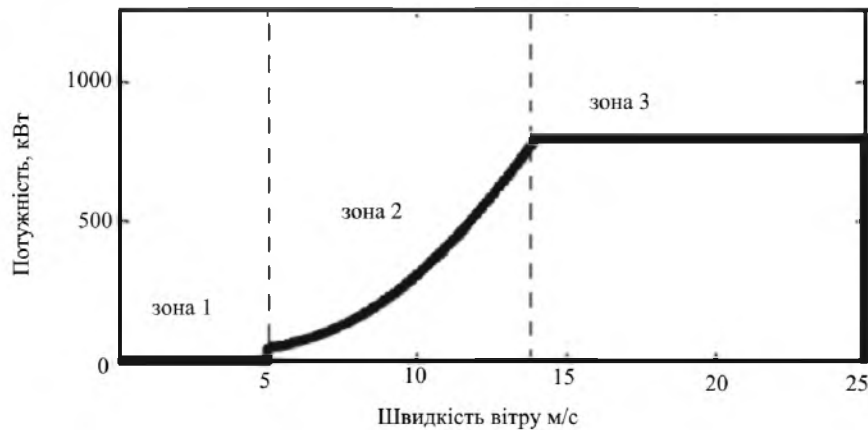


Рисунок 2.11 – Енергетична характеристика ВЕУ

Управління потужністю можливе створенням виконавчих механізмів системи управління ВЕУ, а обмеження значення кута нахилу можна забезпечити сервоприводом. Таким чином, маємо необхідність у розробці модель для імітування роботи сервоприводу.

Сервопривід для даної системи управління визначаємо як нелінійний пристрій, який здійснює поворот лопатей гвинта турбіни синхронно. Для замкнутого контуру сервопривіда проведемо моделювання як для динамічної системи першого порядку з насиченням амплітуди і похідної виходу. На рис. 2.12 наведено структурну схему системи першого порядку.

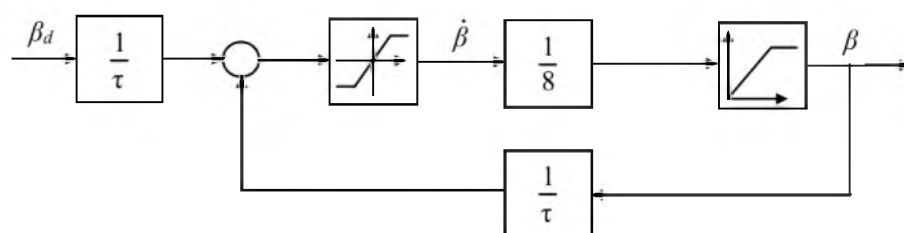


Рисунок 2.12 – Структурна схема сервоприводу

Динаміку системи, наведеної на рис.2.12, у лінійній частині можливо представити диференціальним рівнянням:

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{1}{\tau}\beta + \beta_d.$$

де β і β_d це дійсний та заданий кут нахилу відповідно;

τ – постійна часу, яка характеризує швидкодію сервоприводу.

Таким чином, згідно проведеного моделювання можливо дійти висновку, що вітрові установки недосконалі навіть при регулюванні параметрів і потребують подальшого дослідження та технологічного розвитку.

РОЗДІЛ 3. МАТИМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕУ З РІЗНОЮ КІЛЬКІСТЮ ВІТРОКОЛЕС

3.1 Елементи теоретичного розрахунку ВЕУ

Як було визначено головним елементом ВЕУ є синхронний генератор на постійних магнітах. Наведемо його розрахунок для ВЕУ. Він приводиться в рух від регульованого приводу з постійною частотою обертання $n = 1500$ об/хв та має наступні вихідні дані:

- активна потужність $P = 5000$ Вт;
- напруга на виході $U = 220$ В;
- частота змінної напруги $f = 50$ Гц;
- число фаз $m = 1$ (із резервом переходу на $m = 3$)

Головними розмірами вітрогенератора є внутрішній діаметр D та розрахункова довжина l_δ . Ці параметри визначають із основного рівняння електричної машини:

$$C_a = \frac{D^2 l_\delta n}{P} = \frac{6,1}{a_\delta k_\phi k_0 B_\delta A},$$

де P – розрахункова потужність;

a_δ – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття;

k_ϕ – коефіцієнт форми поля;

k_0 – обмотувальний коефіцієнт статора обмотки;

A – лінійне навантаження статора;

B_δ – максимальне значення індукції у повітряному зазорі при номінальному навантаженні.

Розрахункова потужність P :

$$P = \frac{k_e P_n}{\cos \varphi},$$

де k_e - коефіцієнт, що характеризує внутрішню ЕРС якірної обмотки.

$$k_e = \frac{E_i}{U_n}.$$

Наведемо основні розміри, виходячи з потужності при трифазному живленні. Тоді з співвідношення між однофазним та трифазним живленням потужність дорівнює:

$$P_{1\phi} = 0,7 P_{3\phi},$$

$$P_{3\phi} = \frac{P_{1\phi}}{0,7} = \frac{5000}{0,7} = 7143 \text{ Вт.}$$

При умові відстаючого струма $\cos \varphi = 0,8$;

$$P_W = P = \frac{1,2 \cdot 7143}{0,8} = 10715 \text{ Вт.}$$

Значення розрахункового коефіцієнта полюсного перекриття:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

Між головними розмірами синхронного генератора є співвідношення:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau},$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

Таким чином отримаємо вираз:

$$\lambda = \frac{2l_{\delta}p}{\pi D},$$

Співвідношення λ – залежить від кількості пар полюсів для СГПМ, що випускаються, це значення зазвичай дорівнює $\lambda = 1,5$.

Тоді розрахункова довжина:

$$l_{\delta} = \frac{\lambda \pi D}{2p},$$

Якщо підставити вираз у рівняння машинної постійної Арнольда, то отримаємо такий вираз:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 2pP}{\lambda \pi a_{\delta} k_{\phi} k_0 B_{\delta} A n}},$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 4 \cdot 10714,4}{1,5 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 220 \cdot 10^2 \cdot 0,8 \cdot 250}} = 0,253 \text{ м.}$$

Округлимо значення $D = 0,25$ м.

Розрахуємо полюсний поділ за формулою:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,25}{4} = 0,196 \text{ м.}$$

Знайдемо розрахункову довжину статора:

$$l_{\delta} = \lambda \tau = 1,5 \cdot 0,196 = 0,294 \text{ м.}$$

Округлюємо значення $l_{\delta} = 0,3$ м.

Для розрахунку ротора нам потрібно знайти наступні значення виразів:

Повітряний зазор між статором та ротором приймаємо рівним $\delta = 0,6$ мм.

Розрахуємо зовнішній діаметр ротору:

$$D_p = D - 2\delta,$$

де D – внутрішній діаметр генератора $D = 0,25$ м;

Підставляємо у формулу та отримуємо, що:

$$D_p = 0,25 - 2 \cdot 0,0006 = 0,2488 \text{ м.}$$

Округлимо значення $D_p = 0,25$ м.

Визначимо розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття:

$$a_i = a_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1 - a_p}},$$

де a_p – конструктивний коефіцієнт полюсного перекриття.

$$a_i = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,196}{0,6384 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1 - 0,68}} = 0,122.$$

Розрахуємо ширину полюса:

$$b_M = a_p \cdot \tau,$$

$$b_M = 0,68 \cdot 0,196 = 0,133 \text{ м.}$$

Розрахункова довжина ротора дорівнює довжині статора, тобто $l_M = l_s = 0,3$ м.

Зовнішній діаметр ротора $D_p = 0,25$ м.

Таким чином, розраховані параметри вітрогенератора ВЕУ.

3.2 Побудова ВЕУ з двома вітроколесами

Згідно карти швидкості вітрів України наведеної на рис.1.1 маємо протягом року різкі зміни швидкість вітру у досить широких межах, тому вибір у таких умовах енергоефективної ВКУ є досить складним завданням. Рішенням у цьому випадку є ВЕУ з двома вітроколесами різної потужності, при цьому кожне з яких працює в оптимальному діапазоні сили вітру. Також необхідно приділити увагу розробці системи управління кутом нахилу обох вітроколес.

Розглянемо модель аеродинамічної частини ВЕУ, яка складається з двох вітроколес, які обертаються на одному валу але мають різні діаметри лопатей. Для такої системи ВЕУ примінено класичне управління з ПІ та ПІД регуляторами.

Згідно класичної теорії ідеальне вітроколесо уявляється як колесо з великим (нескінченим) числом лопатей з мінімальної ширини, вісь обертання вітроколеса приймають паралельною швидкості вітру, опір поверхні крил дорівнює нулю, циркуляція вздовж поверхні приймається постійною по всій ометаній поверхні ВЕУ, а кутова швидкість прагне нескінченності.

Якщо розглядати рівномірний потік вітру, спрямований на перше ідеальне вітроколесо зі швидкістю V_0 у перетині A_0 , то при зустрічі ламінарного вітрового потоку з перешкодою (рис. 3.1) за рахунок виникаючого підпору тиск у потоці зростає від W_0 до W_1 і після проходження через переріз A_1 , в якому розташоване колесо, різко падає до W_2 [8]. Розрядження, яке утворилося, у міру віддалення від вітроколеса практично наближається до нуля. Швидкість потоку при

практичному наближенні до вітроколеса буде знижуватися від V_0 до V_1 і після проходження перерізу A_1 досягне мінімального значення V_2 .

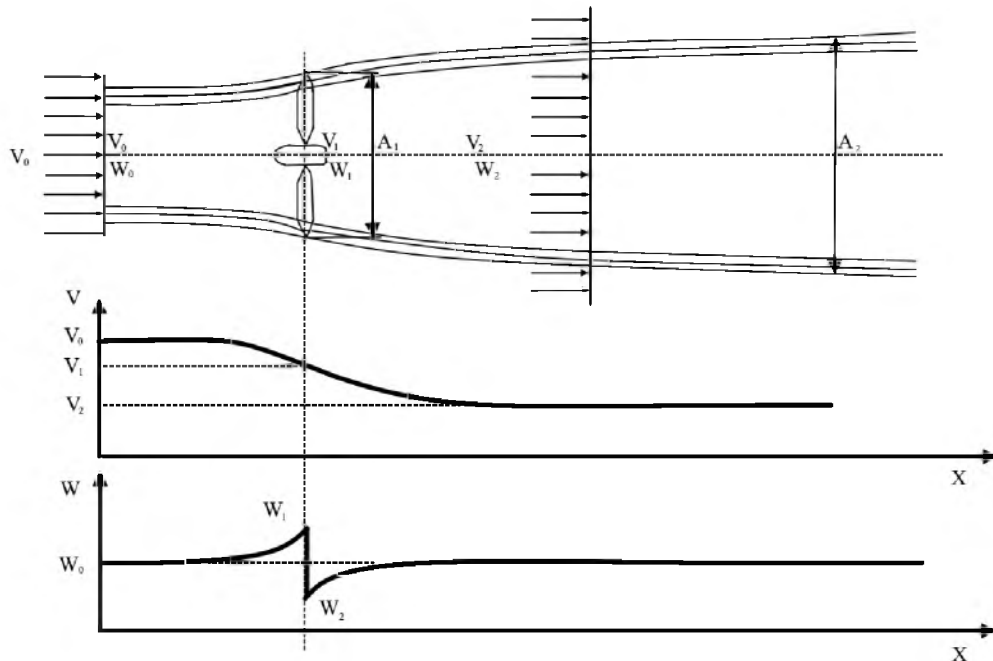


Рисунок 3.1 – Характеристики повітряного потоку крізь вітроколесо

Відношення секундної роботи, сприйнятої ідеальним вітроколесом:

$$T_1 = P_0 \cdot (V_0 - V_1)$$

до енергії вітру, що протікає через перетин A_1 , є ідеальний коефіцієнт використання енергії вітру:

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

Вираз $2 \cdot \frac{P_0}{A_1 \cdot \rho \cdot V_0^2}$ називається коефіцієнтом навантаження на площу, що ометається.

Коефіцієнт потужності у даному випадку C_p можна записати у вигляді:

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

Дослідженнями доведено, що максимального значення C_p досягає при

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,59$$

У розрізі класичної теорії ідеального вітряка, розглянемо модель БЕУ із двома вітроколесами. Відбір потужності від вітрового потоку відбувається під впливом його на вітроколесо.

Повна потужність одного вітроколеса:

$$P_1 = \frac{\rho \cdot A_1 \cdot V_0^3 \cdot C_{p1}}{2}$$

На рис. 3.2 наведена модель взаємодії однороторної вітроустановки з повітряним потоком у розрізі класичної моделі ідеального вітроколеса з усіма обмеженнями і припущеннями.

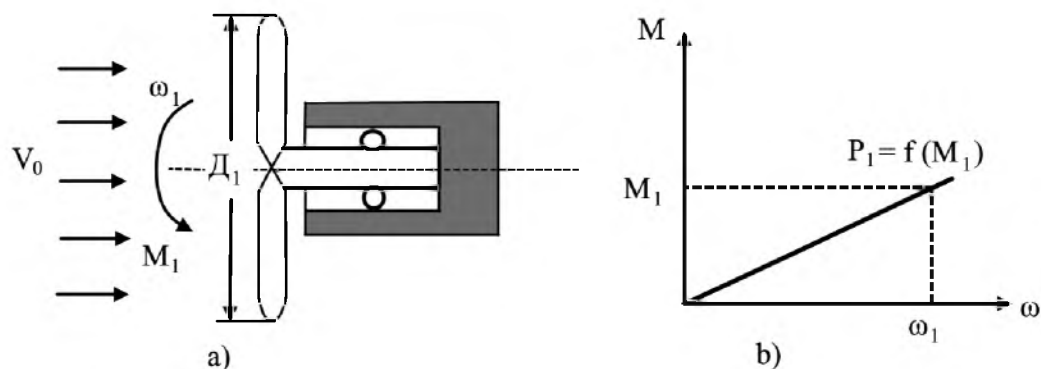


Рисунок 3.2 – Взаємодія першого вітроколеса вітроустановки з повітряним потоком:

а) модель взаємодії вітроколеса з повітряним потоком; б) потужнісна характеристика

Тепер представимо потік вітру після омітання першого ідеального вітроколеса, що набігає на друге ідеальне вітроколесо зі швидкістю V_2 у перетині A_2 . Потужність другого вітроколеса розглядається як:

При зустрічі цього ламінарного вітрового потоку з другим вітроколесом (рис. 3.3) за рахунок підпору тиск у потоці зростає від W_2 до W_3 і після проходження через переріз, в якому знаходиться колесо різко падає до W_4 [8].

Розрідження, що утворилося, по мірі віддалення від вітроколеса наближається до нуля. Швидкість потоку при наближенні до другого вітроколеса знижується від V_2 до V_3 і після проходження перерізу досягає мінімального значення V_4 [8].

Потужна характеристика другого вітроколеса показана на рис. 3.4. Розглянемо потужність БЕУ як функцію параметрів p, A, V, C_p :

$$P = f(p, A, V, C_p)$$

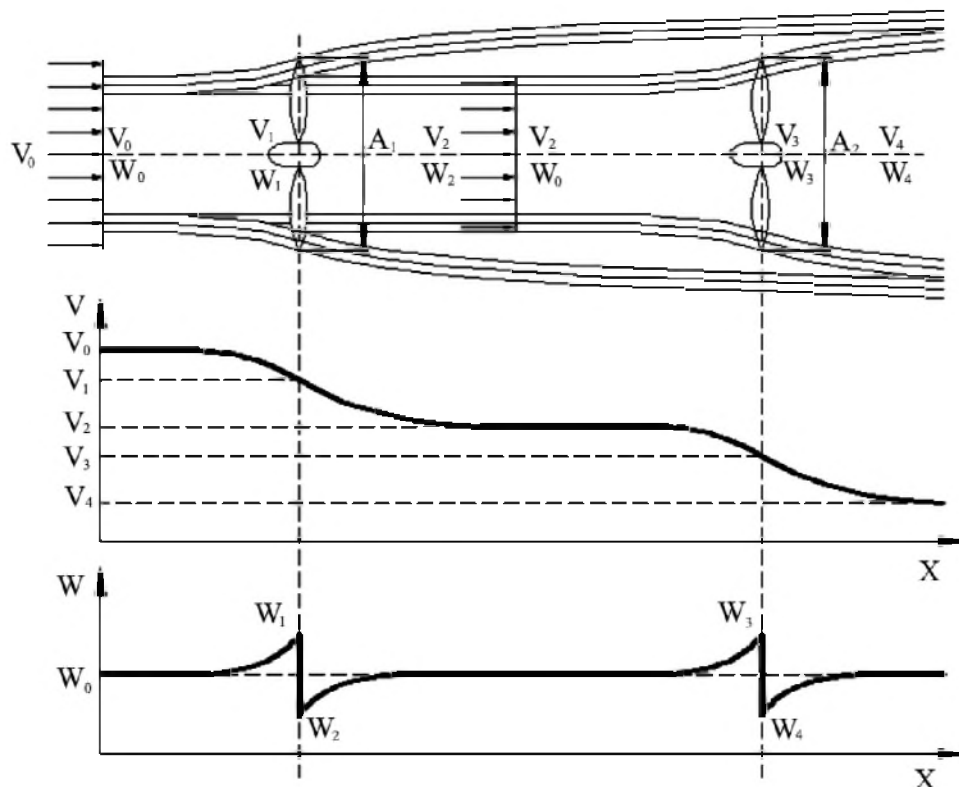


Рисунок 3.3 – Взаємодія повітряного потоку з двома вітровими колесами

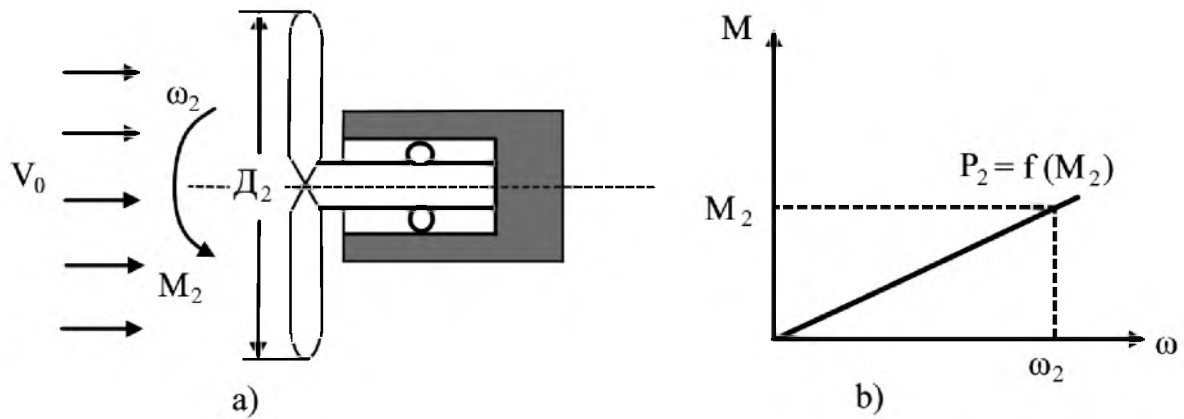


Рисунок 3.4 Взаємодія другого вітроколеса з повітряним потоком:

а) модель взаємодії вітроколеса з повітряним потоком; б) потужнісна характеристика

Якщо два вітроколеса працюють на один генератор у один і той же час, то за логікою має відбуватися сумарне відносне збільшення швидкості ω .

Збільшення потужності ВЕУ досягається відповідно зі збільшенням моменту M та сумарної кутової швидкості ω обох вітроколес.

Тобто маємо вирази:

$$\begin{aligned}\sum M &= M_1 + M_2 \\ \sum \omega &= I\omega_1 I + I\omega_2 I\end{aligned}$$

Сумарна потужність тоді дорівнює:

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

Спільна робота обох вітроколес приведена на рис.3.5, а. Модель двомоторної вітроустановки приведена на рис. 3.5, б.

Аналіз розрахункової схеми (рис. 3.5) доводить, що завдання визначення параметрів ВЕУ з двома вітроколесами можливо вирішити декількома способами: перше рішення у випадку, коли друге вітроколесо встановлено на

відрізку $A_1 - A_2$, тоді швидкість потоку маємо за виразом $V_1 > V > V_2$, друге – коли вітроколесо встановлено за перетином A_2 , але в межах потоку, тоді швидкість $V_0 \div V_2$ і, третє – коли друге вітроколесо знаходиться за межами обурень, тоді швидкість дорівнює $V \div V_0$. Інтерес представляють два випадки, коли швидкість потоку в перерізі другого вітроколеса максимальна і мінімальна.

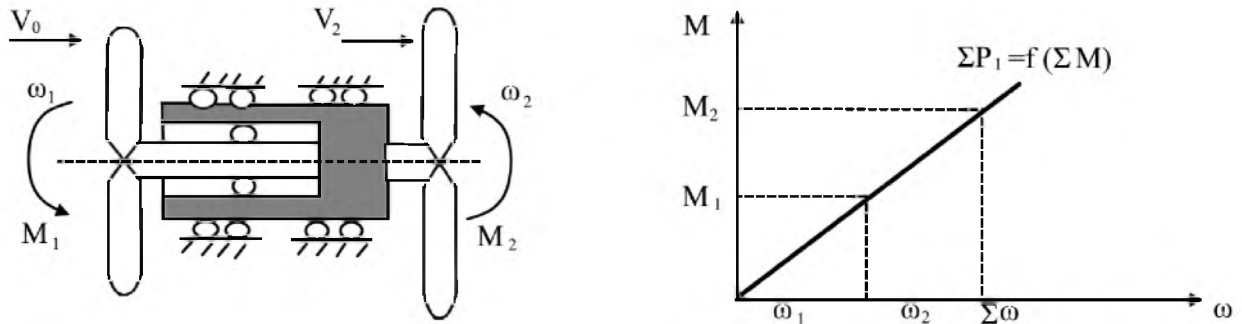


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема двороторної вітроенергетичної установки:

а) розрахункова схема двороторної вітроустановки; б) потужнісна характеристика ВЕУ

У цьому випадку потужність вітродвигуна з двома вітроколесами:

$$P = P_1 + P_2 = C_p' \cdot P_0' + C_p'' \cdot P_0''$$

де P_1 і P_2 – потужності першого та другого вітроколеса;

C_p' і C_p'' – коефіцієнти потужності необуреного потоку, що маємо на першому і другому вітроколесі;

P_0' і P_0'' – потужності незбуреного потоку, що маємо на першому і другому вітроколесах.

Приймаємо, що два коефіцієнти потужності досягають максимального значення $C_p = C'_p = C''_p = \frac{16}{27}$, тоді найбільше теоретичне значення потужності вітроустановки складає:

$$P_{\max} \approx 1,185 \cdot P'_0$$

Сумарна потужність, у разі коли друге вітроколесо розміщено в перерізі A_2 :

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

3.3 Математичне моделювання ВЕУ з різною кількістю вітроколiс

Для дослідження ефективності ВЕУ з різною кількістю вітроколiс складемо окремо моделі для першого одного колеса та для другого пов'язаного з першим. Таким чином можемо отримати результати з кількості вироблення потужності для ВЕУ з одним та двома вітроколесами відповідно.

Проведемо аналіз режиму роботи ВЕУ, при якому необхідно підтримувати рівень вироблення потужності при управлінні кутом нахилу лопатей вітроколiс ВЕУ. Загальна структура ВЕУ показана на рис. 3.6.

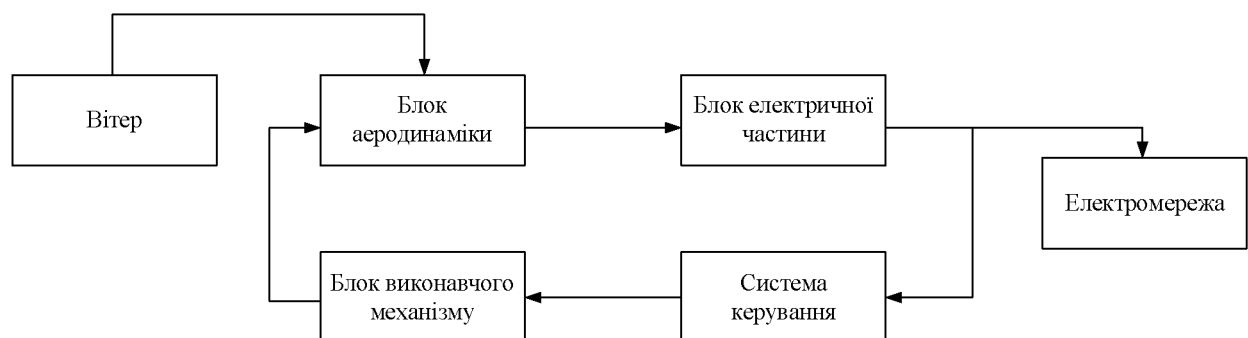


Рисунок 3.6 – Структурна схема моделі ВЕУ

Блок аеродинаміки буде імітувати роботу двох вітроколів на одному валу. Модель першого вітроколеса у програмі Matlab наведена на рис. 3.7, а другого на рис. 3.8.

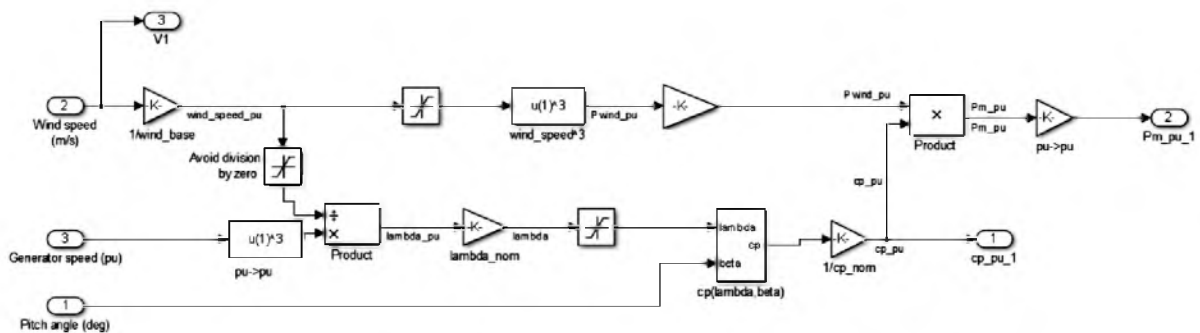


Рисунок 3.7 – Модель першого вітроколеса

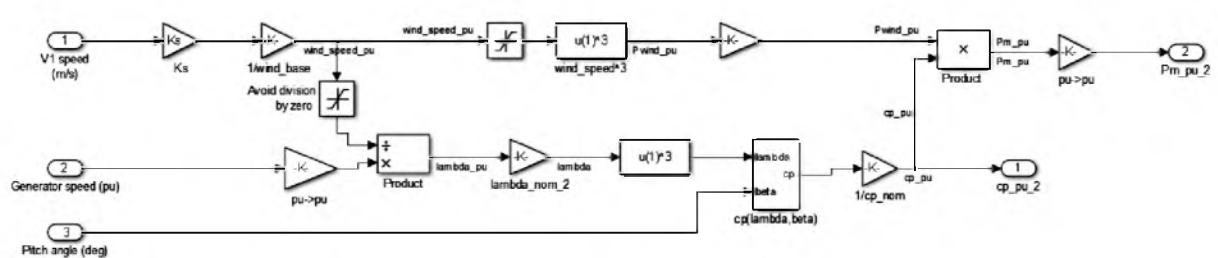


Рисунок 3.8 – Модель другого вітроколеса

На рис.3.9 наведена модель обчислення коефіцієнта потужності

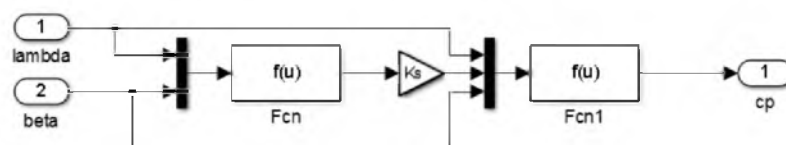


Рисунок 3.9 – Модель обчислення коефіцієнта потужності

Модель блоку обчислення загального моменту, що створюється, і механічної потужності вітротурбіни наведена на рис. 3.10.

Блок електричної частини, що імітує роботу силової електричної частини складається з таких пристроїв:

- модуль синхронного генератора з постійними магнітами;
- модуль перетворювача напруги зі змінної у постійну;

- блок кінцевого споживача;
- модуль обчислення виробленої електричної потужності.

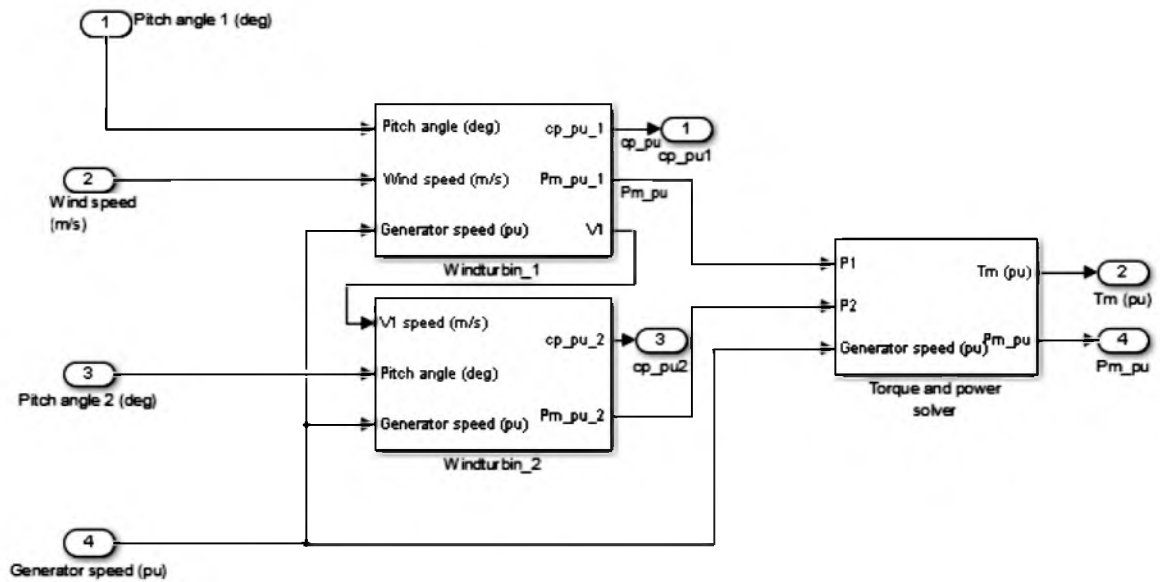


Рисунок 3.10 – Модель блоку обчислення загального моменту

Модель блоку електричної частини ВЕУ представлена на рис. 3.11.

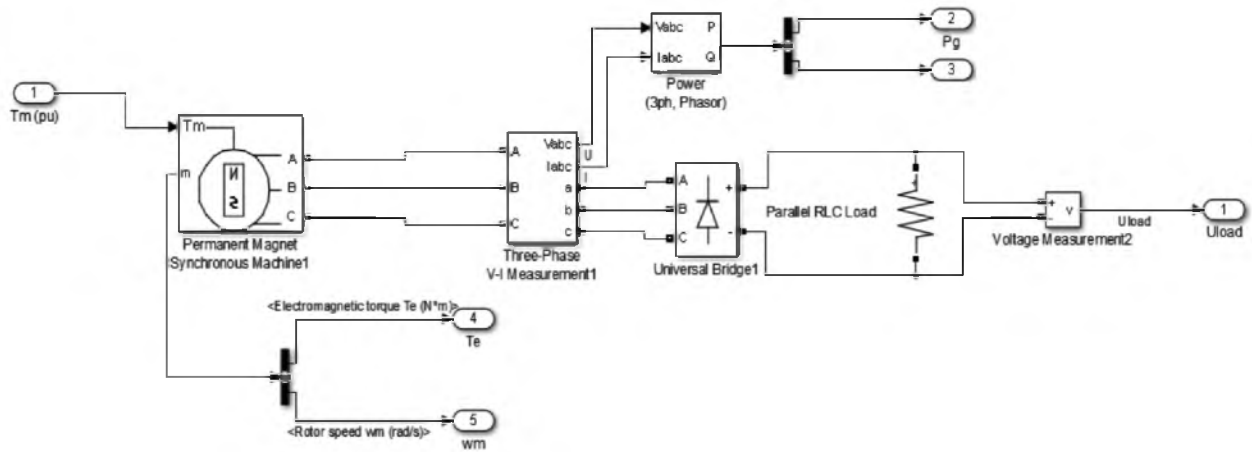


Рисунок 3.11 – Модель блоку електричної частини ВЕУ

Модель блоку виконавчого механізму наведена на рис. 3.12.

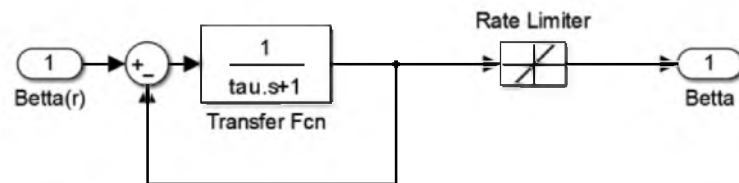


Рисунок 3.12 – Модель блоку виконавчого механізму

Модель блоку сервоприводів з вітротурбиною наведена на рис.3.13

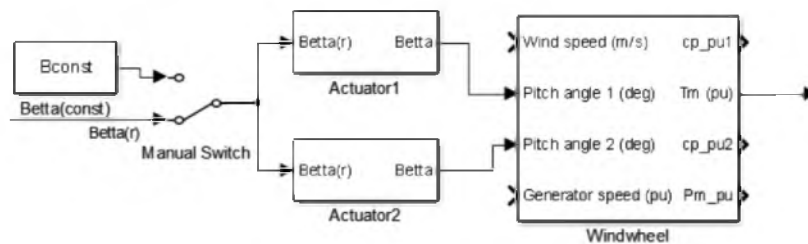


Рисунок 3.13 – Система двох сервоприводів з вітротурбиною.

Результуюча модель енергетичної установки наведена на рис. 3.14

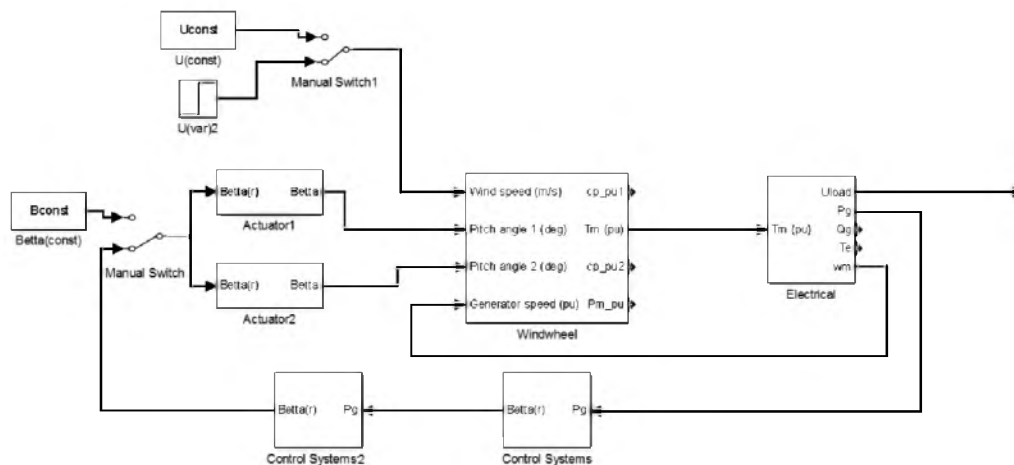


Рисунок 3.14 – Модель БЕУ

Результати моделювання різних режимів роботи будуть реалізовуватися за допомогою двох перемикачів: перший для зміни режиму швидкості вітру (змінна та постійна), другий для зміни кута нахилу.

Виконаємо аналіз різних конструкцій ВЕУ. Порівняємо ВЕУ із двома вітроколесами різних радіусів із ВЕУ, що має одне вітроколесо різних радіусів (малого та великого). Умовою випробування буде різна величина швидкостей вітру: 7 м/с, 10 м/с, 15 м/с.

Результати дослідження при швидкості 7 м/с наведені на рис. 3.15 та 3.16.

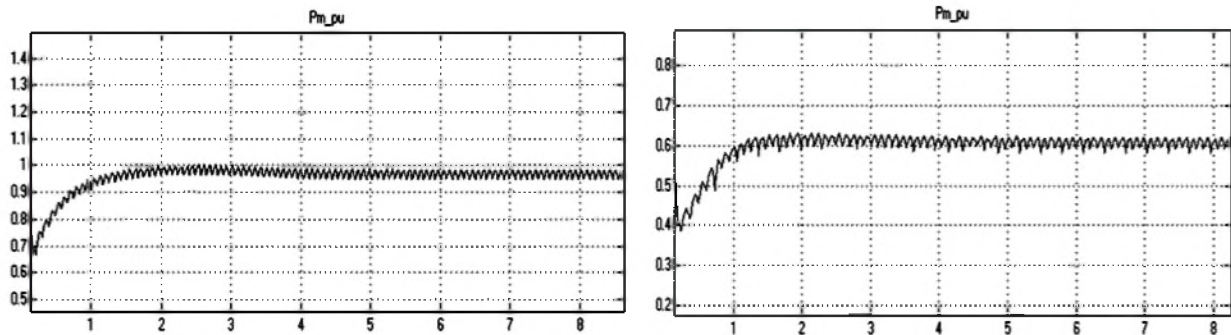


Рисунок 3.15 – Потужність ВЕУ з одним вітроколесом
а) одне малого діаметра; б) одне великого діаметра

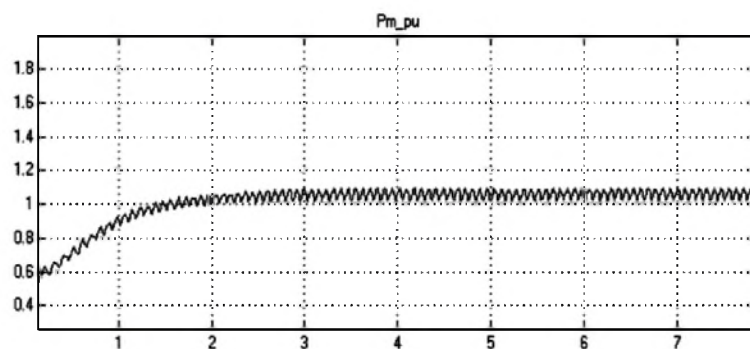


Рисунок 3.16 – Потужність ВЕУ, що виробляється, з двома вітроколесами.

При швидкості вітру у діапазоні 6-7 м/с ВЕУ з одним великим вітроколесом виявився було б недовантаженим і виробляло б недостатньо електричної енергії, а ВЕУ з одним малим вітроколесом працювала б в нормальному режимі, практично на номінальній потужності. ВЕУ з двома вітроколесами працює теж у нормальному режимі, але з потужністю меншу за номінальну.

Результати дослідження при швидкості 10 м/с наведені на рис. 3.17 та 3.18.

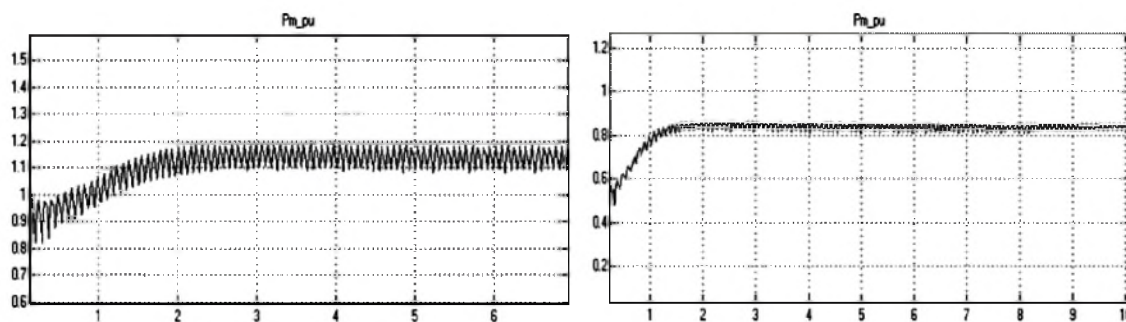


Рисунок 3.17 - Потужність ВЕУ з одним вітроколесом

а) одного малого діаметра; б) одне велике діаметра.

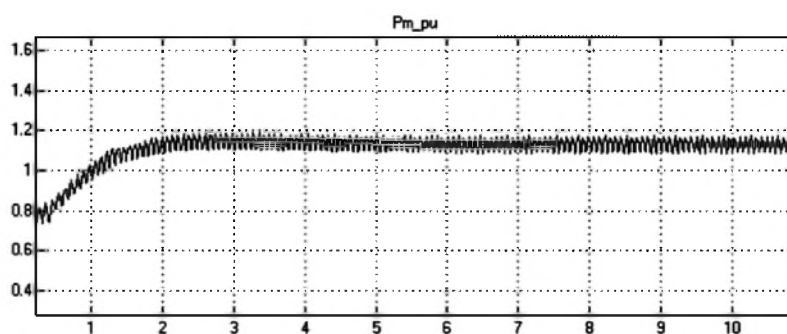


Рисунок 3.18 – Потужність ВЕУ з двома вітроколесами

При такій швидкості ВЕУ з одним малим вітроколесом працює у режимі номінальної потужності, а ВЕУ з великим вітроколесом не завантажена і режим роботи не оптимальний. ВЕУ з двома вітроколесами виробляє ніж ВЕУ з одним вітроколесом і установка працює в оптимальному режимі.

Результати дослідження при швидкості 15 м/с наведені на рис. 3.19 та 3.20.

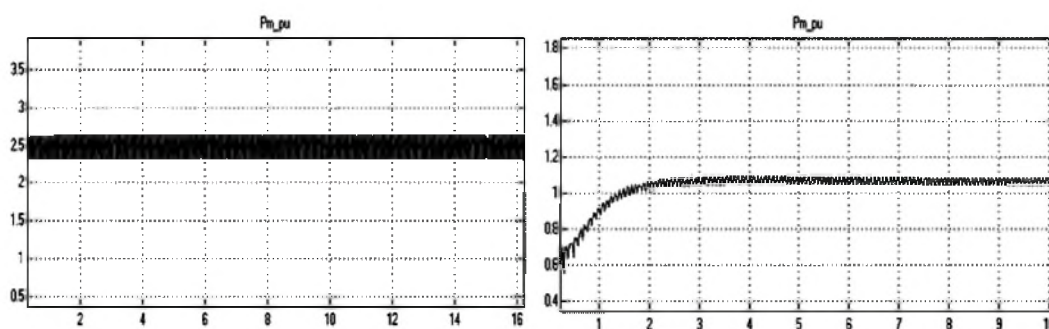


Рисунок 3.19 – Потужність ВЕУ з одним вітроколесом

а) одне малого діаметра; б) одне велике діаметра

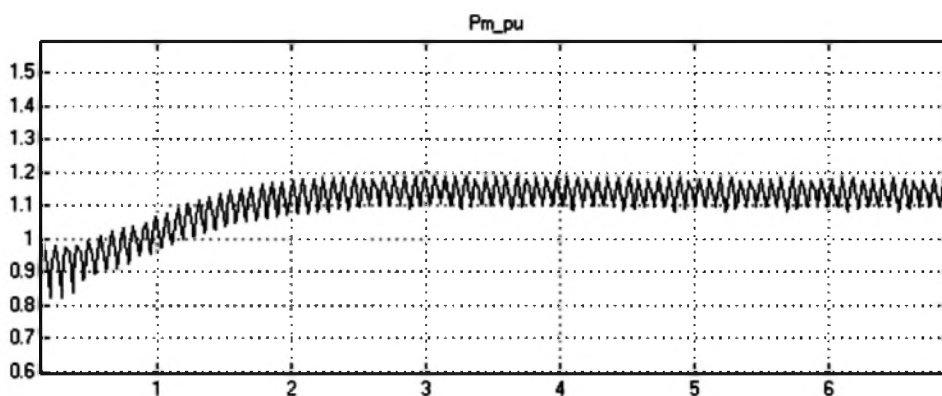


Рисунок 3.20 – Потужність ВЕУ з двома вітроколесами

При такій швидкості ВЕУ з одним малим вітроколесом працює у аварійному режимі, ВЕУ з великим вітроколесом працює у штатному режимі та виробляє номінальну потужність. ВЕУ з двома вітроколесами виробляє більше потужності і така швидкість для неї є штатною.

Таким чином, можливо зробити висновок, що у всіх трьох випадках при різних швидкостях ВЕУ з двома вітроколесами показує кращі результати ніж ВЕУ з одним вітроколесом і тому такий варіант є найоптимальнішим.

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі були проведені теоретичні дослідження стосовно впливу конструктивної побудови ВЕУ на кількість виробленої потужності.

Виконані у дипломній роботі дослідження дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Україна має великий потенціал і ресурси по впровадженню вітроенергетики та збільшенню її частки у загальному виробництві електричної енергії.
2. При побудові ВЕУ необхідно передбачати у її складі пристрої регулювання швидкості обертання вітроколеса та регулювання кута нахилу лопатей задля отримання оптимальних режимів роботи ВЕУ.
3. Моделювання ситуацій з різними швидкостями вітру демонструє, що ВЕУ з двома вітроколесами поєднує у собі переваги ВЕУ з вітроколесом малого радіусу на малих швидкостях та переваги ВЕУ з вітроколесом великого радіусу на великих швидкостях, причому їх недоліки відсутні..

Також у роботі була приділена увага питанням охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковальов І.О. Альтернативні джерела енергії України: навч. посіб./ І.О.Ковальов, О.В. Ратушний. - Суми: Вид-во СумДУ, 2015. – 201 с.
2. Зысин Л.В., Сергеев В.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Часть 1. Возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 192 с.
3. Саенко Ю.Л., Молчан А.В. Применение спектрально-корреляционной теории случайных процессов при моделировании работы ветрогенераторов / Ю.Л. Саенко, А.В. Молчан . – Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – № 4 (40). – 2017. с.61 – 67.
4. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. - Львів: “Магнолія 2006”, 2008. 188 с.
5. Коханевич В.П. Аналіз конструкцій вітрових енергетичних установок / В.П. Коханевич, Г.П. Душина, Н.В. Марченко, Д.С. Романченко. – Енергетика: економіка, технології, екологія. – № 2. – 2012. – с. 61-66.
6. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2005. – 519 с.
7. Матвеев О.В. Комплексная программно-математическая модель ветроэнергетической установки / О.В. Матвеев // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010 – №5(85). – С.64–70.
8. Стабилизация частоты вращения генератора ветроустановки / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев, П.В. Коноплев // Механизация и электрификация сельского хозяйства № 5 2012 - С. 24-25.

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

Електрична та механічна безпека

Вітрогенератор обладнаний складними електронними пристроями, при розробці яких забезпечувався захист від електричних джерел небезпеки, пов'язаних із надмірними струмами. При підключенні цих та будь-яких інших електротехнічних пристроїв існують ризики ураження людей електричним струмом.

Виділення тепла в електротехнічних системах часто є результатом протікання надмірного струму по проводах з недостатнім перетином або через погані контакти. Акумулятори можуть викидати струми небезпечної величини. У разі короткого замикання у проводах, що йдуть від акумулятора, може виникнути пожежа. Щоб усунути ризик, необхідно встановити в ланцюгах, що підключаються до акумулятора, плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі відповідного номіналу.

При обслуговуванні та експлуатації вітроустановок необхідно дотримуватися наступних правил безпеки:

- ніколи не торкайтеся оголених електричних дротів або від'єднаних роз'ємів;
- не торкайтеся компонентів вітроенергетичної установки, якщо у Вас вологі руки або ноги;
- не допускайте попадання на компоненти вітроенергетичної установки (за винятком вітрогенератора та щогли) рідини та атмосферних опадів та не ставте їх на вологу підлогу;
- слідкуйте за тим, щоб електричні дроти та роз'єми були у справному стані;
- не експлуатуйте обладнання, що знаходиться в несправному стані: це може призвести до аварії та ураження електричним струмом;

- не підключайте вітроенергетичну установку до інших джерел електричного живлення, наприклад, до місцевої електромережі. У випадках, коли передбачено резервне підключення іншого джерела, воно має виконуватися кваліфікованим персоналом з урахуванням особливостей роботи обладнання;
- підключення до розподільних мереж об'єкта повинно здійснюватися під час монтажу вітроенергетичної установки кваліфікованим персоналом у суворій відповідності до норм та правил улаштування електроустановок;
- тримайте будь-які легкозаймисті або вибухонебезпечні речовини (бензин, масло, ганчір'я тощо) далеко від компонентів вітроенергетичної установки.

Забороняється експлуатація компонентів вітроенергетичної установки у вибухонебезпечному середовищі, оскільки в її електричних частинах можливе іскріння. Забороняється вимикати акумуляторну батарею від дод. обладнання при підключеному до нього генераторі, це призведе до виходу з експлуатації обладнання.

Вітрогенератор забезпечує номінальну потужність при температурі навколишнього повітря від -40 до +40°C та висоті над рівнем моря до 1000м, та відносної вологості повітря 98% (при $t+25^{\circ}\text{C}$). При роботі агрегату на висоті понад 1000 м забезпечується 100% потужність: на висоті 2000 м до 90% від номінальної, на висоті 3000 м до 75% від номінальної.

Швидкість вітру в місці установки не повинна перевищувати 30 м/с, тому що при сильніших вітрах існує ймовірність руйнування станції.

У разі, якщо в місці встановлення станції ґрунт не щільний або є ґрунтові води, без вживання заходів для зміцнення фундаменту сваями можливе руйнування станції.

Приміщення має бути сухим, електроустаткування має бути захищене від попадання вологи. Електроустаткування має знаходитися у приміщенні, недоступному для дітей та недієздатних осіб. Не розташовуйте дод. обладнання поблизу електричних обігрівачів, нагрівальних приладів та інших джерел тепла.

Відстань від приладів до радіаторів опалення приладів повинна бути не менше 1 м. Захистіть обладнання від сонячних променів.

Забороняється встановлювати не герметичні акумуляторні батареї в приміщеннях, призначених для тривалого перебування людей, а також у суміжних приміщеннях.

Для вентиляції приміщення з не герметичними акумуляторними батареями повинна бути виконана витяжна вентиляція, яка забезпечує не менше ніж одноразовий обмін повітря на годину. Якщо природна вентиляція не може забезпечити необхідну кратність обміну повітря, слід застосовувати примусову витяжну вентиляцію.

У разі підключення вітрогенераторної установки до джерела живлення домашнього призначення (центральної мережі електропостачання) як резервне живлення, підключення має бути виконане спеціалістом з електротехніки, і з використанням спеціального мережевого інвертора, пряме підключення до мережі категорично заборонено. Після підключення навантаження до вітрогенератора треба ретельно перевіряти надійність та безпеку електричного з'єднання. Неправильне електричне з'єднання може призвести до пошкодження вітрогенератора (дод. обладнання) та/або пожежі.

Для облаштування заземлення необхідно використовувати один із наступних заземлювачів:

- металевий стрижень діаметром не менше ніж 15 мм, довжиною не менше ніж 1500 мм;
- металеву трубу діаметром не менше 50 мм, завдовжки не менше 1500 мм;
- Лист оцинкованого заліза розміром не менше 1000 x 1000 мм.

Будь-який заземлювач має бути занурений у землю до постійно вологих шарів ґрунту. На заземлювачах повинні бути обладнані затискачі або інші пристрої, що забезпечують надійне контактне з'єднання заземлюючого проводу із заземлювачем. Протилежний кінець проводу з'єднується з клемою заземлення генератора. Опір контуру заземлення має бути не менше 4 Ом, причому контур заземлення повинен розташовуватися в безпосередній близькості від генератора.

При установці генератора на об'єктах, що не мають контуру заземлення, як заземлювачі можуть використовуватися металеві труби системи водопостачання, каналізації або металеві каркаси будівель, що знаходяться в землі, що мають з'єднання із землею. Категорично забороняється використовувати як заземлювачі трубопроводи горючих і вибухових газів та рідин.

Перед запуском вітрогенератора необхідно пам'ятати, що сумарна потужність споживачів, що підключаються до інвертора, не повинна перевищувати номінальну потужність інвертора, що підключається.

Використання з перевантаженням може призвести до виходу інвертора з ладу. При підключенні до інвертора вітрогенератора різних типів навантаження необхідно виконувати наступне правило: спочатку підключається індуктивне навантаження з найбільшим пусковим струмом, далі з меншим, останнім – підключається споживач з найменшим значенням активного навантаження. Невиконання цих вимог може призвести до виходу інвертора з ладу та відмови сервісу в гарантійному ремонті.

Навантаження (електричні пристрої, що підключаються до вітрогенератора) поділяються на омичні (активні) та індуктивні (реактивні). До активних відносяться всі навантаження, у яких споживана енергія перетворюється на тепло (лампи розжарювання, праски). До реактивних навантажень відносяться всі споживачі, які мають електродвигун. При запуску електродвигуна короткочасно виникають пускові струми, величина яких залежить від конструкції двигуна та призначення електроінструменту. Величину пускових струмів, що виникають, необхідно враховувати при виборі генератора. Більшість електричних інструментів мають коефіцієнт пускового струму 2-3. Це означає, що при включенні таких споживачів потрібно інвертор, потужність якого в 2-3 рази вище потужності навантаження, що підключається. Найбільший коефіцієнт пускового струму 5-7 у споживачів, які мають фази холостого ходу (компресори, занурювальні насоси).

Вітрогенератор слід встановлювати на височинах і якнайдалі від природних і штучних перешкод, щоб отримувати максимально високу швидкість вітру.

Де б ви не розміщували свою систему, чим ближче ви до поверхні землі, тим менша швидкість вітру. Це результат дії сили тертя біля земної поверхні та існування перешкод на поверхні землі. Через ці перешкоди виникають турбулентності, які знижують ефективність будь-якої вітротурбіни. Тому розміщувати турбіну слід на майданчику, де для вітрів існує якнайменше перешкод. Тобто, найкраще розташувати вітроустановку на височини.

Енергія вітру – це кубічна функція швидкості вітру. Це означає, що незначні зміни швидкості вітру спричиняють суттєві зміни вихідної потужності. При подвоєнні швидкості вітру вихідна потужність зростає у кілька разів. Навіть незначну зміну має суттєві наслідки.

Також слід враховувати характеристики ґрунту місця встановлення вітрогенератора.

Пухкий піщаний ґрунт, неоднорідні ґрунти та ґрунти, що легко змінюються залежно від погодних умов, не підходять для установки вітрогенератора, якщо не вжити заходів щодо зміцнення фундаменту, наприклад сваями.

При виборі місця встановлення необхідно враховувати відстань між вітрогенератором та додатковим електрообладнанням. Чим коротша ця відстань, тим меншої довжини знадобиться кабель. У результаті буде менше втрат енергії під час передачі. Якщо ж ця відстань буде досить великою, краще використовувати для передачі кабель з великим поперечним перетином.

Установку вітрогенератора повинні проводити спеціально підготовлений персонал, дотримуючись всіх необхідних вимог безпеки під час проведення робіт. Роботи зі встановлення повинні проводитися в суху погоду, швидкість вітру не повинна перевищувати 2 м/с, всі роботи повинні бути припинені за швидкості вітру понад 2 м/с.

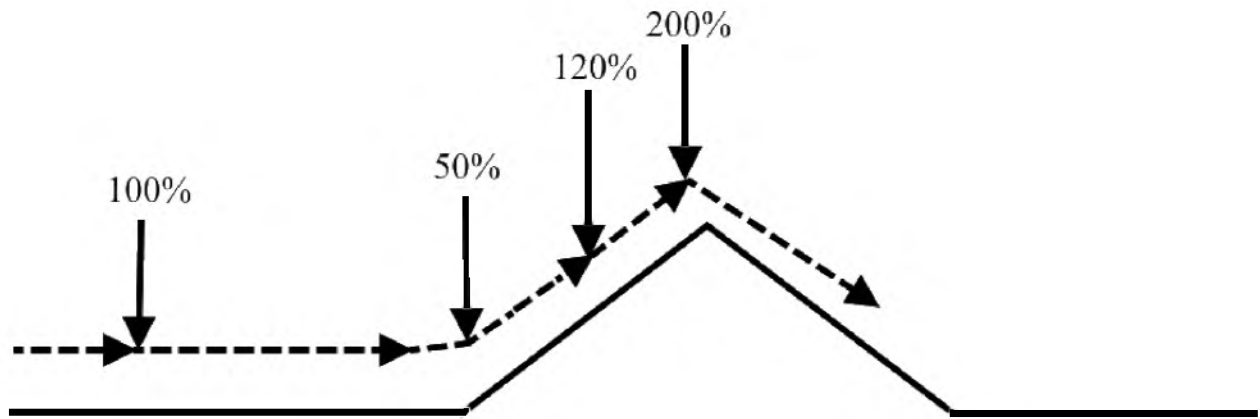


Рисунок А1 – Щільність вітрового потоку, %

Установка лопатей повинна проводитися при швидкості вітру не більше 2 метрів за секунду, всі роботи необхідно зупинити при швидкості вітру понад 2 метри за секунду.

Установка лопатей проводиться на ротор, встановлений на гондолі. Попередньо гондолу необхідно підняти краном на висоту, що забезпечує зручне положення ротора для монтажу лопат.

Для підйому лопат слід використовувати підйомну техніку, закріплення на роторі здійснювати при піднятій гондолі. Встановлення лопатей проводиться за маркуванням зазначеного у цьому паспорті. Необхідно суворо дотримуватися техніки безпеки при монтажі лопат на ротор вітрогенератора.

Закінчення лопатей повинні бути закріплені тросом на «зашморг», щоб запобігти обертанню лопатей від вітру. Трос відтягується в одній позиції, допускається виробляти баланс для кріплення на ротор за допомогою робітників - монтажників, після установки лопаті на ротор і закріплення на ньому, трос слід закріпити до монтажу лопатей, що залишилися.

Підйом гондоли з лопатями здійснювати акуратно, при цьому відтяжки від лопат знімати допускається після повного монтажу гондоли до верхнього фланцю щогли.

Електрична частина ВЕУ складається з блоків і елементів що знаходяться в гондолі, в щиті управління і в безпосередній близькості від щита управління, а також сполучних контрольних і силових кабелів.

У гондолі знаходиться власне генератор, датчик обертів та виконавчий механізм керування гальмом (лінійний актуатор).

Нижче поворотного пристрою розташований кільцевий струмоприймач у кожусі. Кільцевий струмознімач необхідний для запобігання закручування трьох кабелів, що виходять з гондоли, при її поворотах у напрямку вітру. Силовий чотирипровідний кабель-кабель генератора, тонкий двопровідний кабель-актуатор та двожильний екранований кабель датчик обертів. Всі жили та екран цих кабелів повинні бути роз'єднані до дев'яти клем струмознімача. Від гондоли до внутрішніх клем струмознімача і від зовнішніх дев'яти клем на зниження по щоглі.