

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕНЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ**

Виконав студент II курсу, групи ЕЕД-2
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Рудик А.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Вакуленко О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2022

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 79 сторінок, 8 аркушів формату А1, 51 ілюстрацій та 11 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес перетворення поступального руху повітряних мас у електроенергію вітроенергетичній установці

Предмет дослідження – вітроенергетична установка із двома вітротурбінами.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка енергоефективної конструкції вітроенергетичної установки із підвищеною ефективністю використання вітрового потоку.

У роботі наведено результати дослідження вітроенергетичної установки. Проведено аналіз даних використання відновлюваних джерел енергії для вироблення електроенергії, який виявив певну перспективу використання вітроенергетики. У складних кліматичних умовах деяких регіонів України використання існуючих однороторних вітротурбін утруднено. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано розробити вітротурбіну, що складається з двох вітроколес різних діаметрів. Для дослідження такої конструкції вітроенергетичної установки було розроблено її математичну модель. Аналіз розробленої моделі вітроенергетичної установки та моделі системи управління виявив, що подібна конструкція вітротурбіни здатна виробляти більшу кількість енергії у розширеному діапазоні швидкостей.

Ключові слова: ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОТУРБІНА, ВІТРОКОЛЕСО, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Відновлювані джерела енергії як основа енергозберігаючих технологій	8
1.2 Вітроенергетичні установки.....	11
1.3 Нерівномірність графіка генерації вітроенергетичних станцій	15
1.4 Висновки до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	
2.1 Архітектура ВЕУ	19
2.2 Параметри, що характеризують роботу вітродвигуна та вітроустановки	21
2.3 Класифікація систем генерування електроенергії сучасних вітроенергетичних установок	27
2.4 Математична модель ВЕУ	32
2.5 Математичний опис сервоприводу	42
2.6 Висновок до розділу	45
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	46
3.1. Вітроенергетична установка з двома вітроколесами	46
3.2 Регулятор потужності для ВЕУ з двома вітроколесами	53
3.3 Імітаційна модель ВЕУ	54
3.4 Принцип управління кутом нахилу лопаті ВЕУ	58
3.5 Імітаційна модель контролера управління кутом нахилу	60
3.6 Дослідження ВЕУ із двома вітроколесами.....	65
3.7 Дослідження вироблення потужності звичайної ВЕУ з одним вітроколесом та ВЕУ з двома вітроколесами на одному валу.....	68
3.8 Висновки до розділу	71

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	
4.1 Блискавкозахист енергетичної установки.....	72
4.2 Планування заходів цивільного захисту.....	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	78

ВСТУП

Актуальність теми.

Існування сучасного світу вже важко уявити без використання електроенергії. Електроенергія використовується людиною повсюдно та у дуже великих кількостях. Адже скільки приладів, що працюють на електроенергії, можна перерахувати, не виходячи із дому? За статистикою житловий будинок середнього розміру на 70 квартир на місяць витрачає близько 4500 кВт. Велике місто може споживати на місяць до 150000 МВт. Для вироблення такої кількості потрібно близько 1,2 Мт питомого палива, таких як вугілля, газ, мазут та інші.

Дані цифри свідчать, що споживання природних ресурсів у такій кількості призведе рано чи пізно до повної їх витрати. З цієї причини, розвиток сучасних технологій вироблення електроенергії з використанням відновлюваних джерел є, по-перше, необхідним для збереження наявних природних ресурсів, по-друге, необхідним для переходу на альтернативний спосіб вироблення енергії після закінчення запасів палива.

Вітроенергетика стала відповіддю на зростаючу потребу світу в електроенергії та джерелах відновлюваної та чистої енергії. Дедалі більше людей вважають енергію вітру кращим способом генерування електроенергії, ніж електростанції, що працюють на атомній енергії, енергії води чи вугілля.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: розробка енергоефективної конструкції вітроенергетичної установки із підвищеною ефективністю використання вітрового потоку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз конструкцій та принципу роботи вітроенергетичних установок.
2. Запропонувати конструкцію вітроенергетичної установки та описати її математичну модель.
3. Запропонувати систему управління вітротурбіною.

4. Провести аналіз математичної моделі вітроенергетичної установки шляхом імітаційного моделювання.
5. Дослідити роботу системи управління вітроенергетичної установки при зниженнях і підвищеннях швидкості вітру.

Об'єкт дослідження – процес перетворення поступального руху повітряних мас у електроенергію вітроенергетичній установці.

Предмет дослідження – вітроенергетична установка із двома вітротурбінами.

Наукова новизна отриманих результатів.

Отримано математичну модель вітроенергетичної установки, яка описує її роботу в умовах мінливої швидкості вітру та в широкому діапазоні швидкостей обертання.

Практичне значення отриманих результатів.

Проведене імітаційне моделювання ВЕУ з двома вітротурбінами на одному валу, а також системи керування такою енергоустановкою, показало, що ВЕУ з двома вітротурбінами поєднує у собі переваги вітротурбіна малого радіусу на малих швидкостях та переваги вітротурбіни великого радіусу на великих швидкостях, не маючи їх недоліків.

Результати проведених досліджень можуть бути використані при конструюванні енергоефективних вітроенергетичних установок.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 7-8 грудня 2022 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (11 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 79 сторінок, 51 рисунок.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Відновлювані джерела енергії як основа енергозберігаючих технологій

В даний час 70% енергії у світі виробляється на теплових електростанціях (ТЕЦ), що використовують як паливо викопні вуглеводні - нафту, газ і вугілля, - спалювання яких робить величезний внесок у виробництво парникових газів.

Обмеженість природних запасів викопних вуглеводнів та палива для атомних електростанцій, а також екологічна небезпека при отриманні енергії з цих джерел роблять необхідним розвиток технологій отримання енергії з альтернативних джерел, незалежних від традиційних копалин. Йдеться про відновлювані джерела енергії [2,3].

Вартість отримання енергії з відновлюваних джерел досить висока, проте розвиток цієї техніки супроводжується впровадженням нових технологій та створює додаткові робочі місця, що й приваблює до них найрозвиненіші індустріальні країни — насамперед європейські країни, Японію, США та останні десятиліття Китай.

У країнах Євросоюзу лідирує Німеччина, яка займає третє місце у світі за абсолютними витратами на розвиток відновлюваних джерел енергії, поступаючись лише Китаю та США.

Розглянемо на прикладі Німеччини, до яких успіхів може призвести розвиток нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії.

Що розуміється під відновлюваними джерелами енергії?

По-перше, це гідроелектростанції, які виробляють 23% відновлюваної енергії, причому йдеться про ГЕС не гігантських потужностей, а про електростанції середньої та малої потужності. Німеччина таки не гірська країна. По-друге, це вітроенергетика, частка якої становить приблизно 43%.

Потім йде використання енергії сонця за допомогою фотоелектричних перетворювачів та сонячних колекторів, отримання біогазу та рідкого біопалива з органічних відходів та геотермальна енергетика.

Відновлювані джерела розподіляються за обсягом виробленої енергії таким чином (дані для ЄС):

- біопаливо 2-го покоління – 56% ;
- гідроенергетика – 28%;
- енергія вітру – 8%;
- біопаливо 1-го покоління - 6%;
- енергія сонцям - 1%;
- геотермальна енергія - 1%.

Частки різних видів енергії у структурі виробництва відновлюваних енергетичних ресурсів у Німеччині станом на 2009 р. виглядають так:

- біопаливо, нафта - 9,1%;
- біопаливо, електроенергія – 17,3%;
- біопаливо – 15,7%;
- енергія вітру – 11,6%;
- гідроенергетика – 41,6 %;
- фотоелектричні перетворювачі - 1,8%;
- геотермальна енергія – 1,1%;
- теплова енергія сонця – 1,7%.

Загальне споживання енергії у Німеччині в 2009р. На невідновлювані енергоресурси (вугілля, нафту, природний газ, атомна енергія) припадало 90,5%.

Відновлювані джерела енергії — 9,5%, зокрема:

- гідроелектростанції – 0,9%;
- енергія вітру – 1,6%;
- біомаса – 6,6%;
- інші джерела – 0,4%.

Вітроенергетика зайняла у Німеччині чільне місце завдяки дешевизні. Собівартість 1кВт «вітряної» електростанції в Європі — 9 центів, лише вдвічі дорожче, ніж у ТЕЦ. Для порівняння: собівартість "сонячної" енергії дорівнює 40 центів. У Німеччині працює понад 20000 вітроенергетичних установок, найбільше у світі. Є величезні установки з висотою споруди 138 м з великими пропелерами. Частота обертання генератора електричного струму - 20-25 об/хв. Загальна потужність ВЕУ перевищила 25 ГВт. Компанія "Enecon" випускає близько десятка ВЕУ на тиждень [4].

На даний час у Німеччині 5% бензину - так зване біопаливо 1-го покоління (біоетанол і біодизель), отримане з ферментної переробки відходів харчової промисловості - олії, цукру, крохмалю.

Біопаливо старого покоління або синтетичне паливо виробляють з твердої біомаси (тирса, с/г відходи), наприклад, прямим розщепленням (крекінгом) відразу до рідини. Шляхом подальшої гідрогенізації з рідких продуктів крекінгу одержують різні вуглеводні, аналогічні компоненти природної нафти. Газ, що виділяється при крекінгу, використовують для нагрівання реактора. За оцінками фахівців до 2030 р. до 35% бензину Німеччина отримає з тирси [4].

У 2010 році 10% енергії в Німеччині вироблялося з відновлюваних джерел. До 2020 року планувалося досягти 30%; за рахунок цього до 2024 року закрити всі атомні електростанції, а до 2040 Німеччина збиралася відмовитися від газу з трубопроводу «Північний потік».

Але життя виявилось складнішим за плани. Після аварії на Фукусімі з 17 атомних електростанцій (що забезпечували 22% потреби в енергії) у 2011 році залишилося працювати лише чотири. Вісім АЕС було зупинено за указом уряду. До 2022 року буде зупинено всі атомні електростанції.

Дев'ять нових газових станцій, які планують увести в експлуатацію найближчим часом, навряд чи врятують Німеччину від енергодефіциту. Тому країна робить ставку на розвиток альтернативних джерел енергії.

Таким чином, на прикладі Німеччини наочно видно стратегію розвитку енергетики в ХХІ столітті. Аналогічна картина спостерігається і в інших

країнах ЄС, США, Китаї та Індії. І для України такий шлях — шлях до енергозберігаючих технологій — є правильним та перспективним.

1.2 Вітроенергетичні установки

Вітроенергетика стала відповіддю на зростаючу потребу світу в електроенергії та джерелах відновлюваної та чистої енергії. Дедалі більше людей вважають енергію вітру кращим способом генерування електроенергії, ніж електростанції, що працюють на атомній енергії, енергії води чи вугілля [5].

У країнах Європи вітроенергетика займає близько 25 % від усього обсягу електроенергії, що виробляється. Інші 75 % припадають на вироблення електроенергії від атомних, гідро- та теплоелектростанцій. Обслуговуючі електромережі компанії не залежить від цих постачальників. Споживач електроенергії, наприклад, пересічний громадянин, має право вибирати, якій енергокомпанії він платитиме за електроенергію. Така енергетична політика забезпечує належний рівень конкуренції між постачальниками електроенергії, виключає монополію у цьому секторі та, відповідно, призводить до зниження тарифів. Західні країни, що прагнуть до енергонезалежності, активно стимулюють інноваційні розробки в цій галузі і вкладають великі кошти в розвиток вітроенергетичних установок. На рис. 1.1 показана схема передачі електроенергії від вітряних установок до споживача [5].

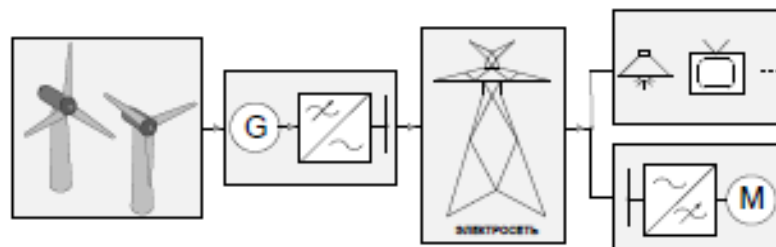


Рисунок 1.1 – Схема передачі електроенергії від вітряних установок до споживача

Такі фірми-гіганти, як SIEMENS і CONVERTEAM, розробляють комплексні силові установки, які перетворюють напругу, що змінюється від

вітряних електростанцій, у стабілізовану, звичну нам частоту 50 (60) Гц. Якісні параметри такої напруги відповідають усім вимогам. Поки що лідерами із застосування вітряних електростанцій залишаються Європа та Америка,

Стаціонарні вітрогенератори можуть повністю забезпечувати електричним живленням житловий будинок або невеликий виробничий об'єкт, накопичувати в акумуляторні батареї необхідний ресурс електроенергії для застосування в період відсутності вітру, можуть функціонувати у поєднанні з дизель-генераторами або сонячними генераторами, а також давати економію при використанні центральної електромережі. Мобільні вітряні електростанції можуть застосовуватися в подорожах для заряджання автомобільних акумуляторів або безпосереднього живлення електроприладів.

Усі вітряні електростанції можна розділити на дві основні категорії: промислові та побутові вітрогенератори [6].

Промислові вітрогенератори відрізняються дуже великою потужністю, яка для деяких може досягати 5-6 МВт. Як правило, такі вітрогенератори об'єднують у єдині мережі. Побутові вітрогенератори, на відміну від промислових вітроустановок, зазвичай мають потужність трохи більше 10-15 кВт. Зважаючи на велику вартість вітрогенераторів, серед населення найбільшим попитом користуються вітряні електростанції невеликої потужності 2-5 кВт. На рис. 1.2 наведені кінематичні схеми вітрогенератора, що рухається вітротурбіною через ремінну передачу - рис. 1.2, а та безпосередньо від валу вітротурбіни – рис. 1.2, б. Ремінна або шестеренна передача застосовуються для збільшення швидкості обертання генератора. Генератор, що рухається безпосередньо від вітротурбіни, зазвичай тихохідний (рис. 1.2).

При середньорічній швидкості вітру, яка перевищує 3-4 м/с, міні-електростанції цілком вистачить для повного енергозабезпечення заміського будинку середніх розмірів, кафе, станцій техобслуговування тощо.

За відсутності у будинку централізованого електропостачання можливі два варіанти забезпечення електроенергією. Перший спосіб – забезпечити наявність двох комплектів акумуляторних батарей, з яких один перебуває в

роботі, а інший – на зарядці. Другий варіант - установка вітрового турбогенератора, що застосовується лише для заряду батарей. Найчастіше комбінують обидва способи які взаємно доповнюються (рис. 1.3).

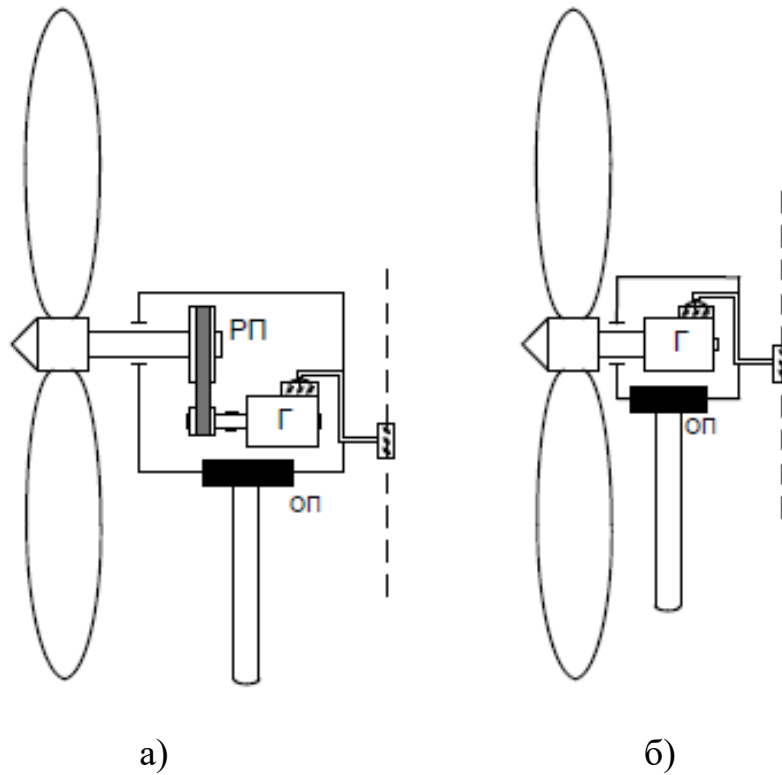


Рисунок 1.2 – Кінематичні схеми вітрогенератора: а) через ремінну передачу, б) безпосередньо від валу вітротурбіни

РП- ремінна передача, Г – генератор, ОП- опорний підшипник

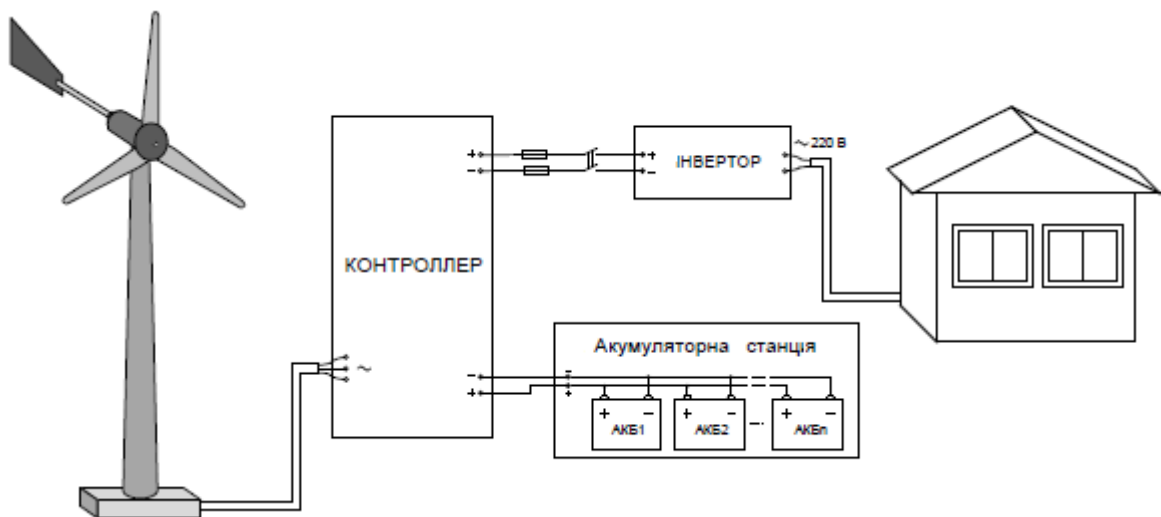


Рисунок 1.3 – Схема забезпечення електроенергією без централізованого електропостачання

За наявності централізованого електропостачання застосовується комбінована схема резервного електропостачання будинку при частих відключеннях мережевого електроживлення (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Схема забезпечення електроенергією із централізованим електропостачанням

Якщо напруга в мережі є, контролер заряджає акумулятори і передає в коло споживачів електроенергію мережі через вбудований стабілізатор напруги. Перемикання в режим інвертора при відключенні мережі відбувається за час 4 м/с за допомогою АВР, що не позначається на роботі побутових споживачів.

Альтернативою централізованої електромережі може служити дизель-генератор, який включатиметься в роботу за знижених значень напруги акумуляторної станції в безвітряну погоду (рис. 1.5). Такий варіант електроживлення забезпечить безперебійне електропостачання.

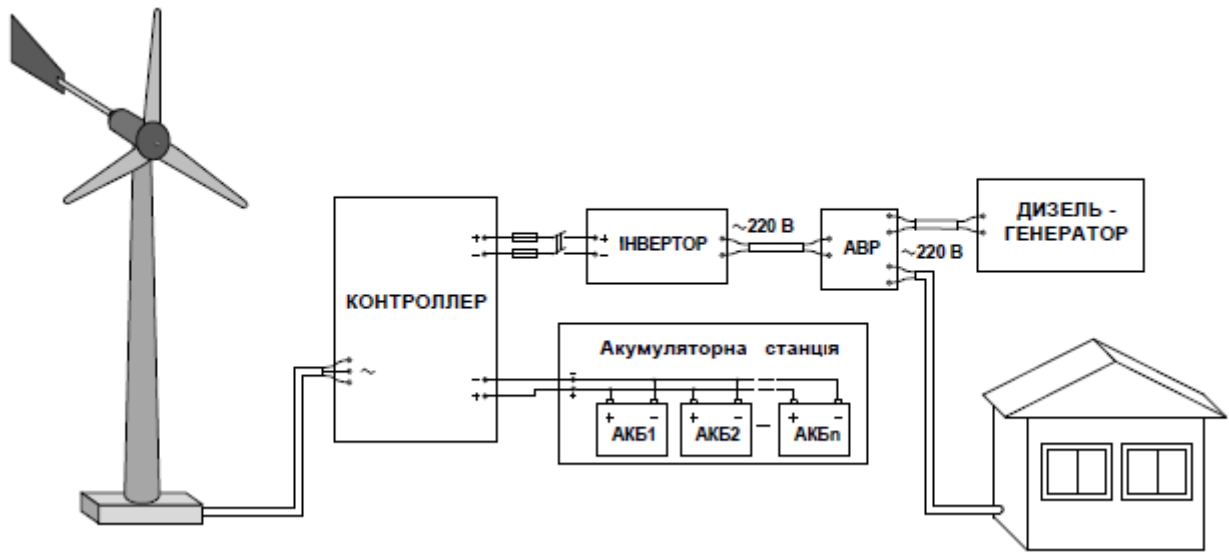


Рисунок 1.5 – Схема забезпечення електроенергією з дизель-генератором

У країнах широко використовується схема електропостачання вітряних електростанцій паралельно з централізованою мережею (рис. 1.6). Мережевий інвертор, на відміну від попередніх типів, дозволяє системі працювати як із акумуляторними батареями, так і без них. Він також дозволяє виводити надлишки електроенергії в громадську мережу. У цьому режимі енергокомпанія купує електроенергію у споживача (лічильник електроенергії СЧ при цьому крутиться в інший бік). Така схема електропостачання захищена законом держави і є найбільш вигідною для населення, що має приватні будинки.

1.3 Нерівномірність графіка генерації вітроенергетичних станцій

Основними відмінностями вітрової енергетики від теплової є нерівномірність потоку первинної енергії. Це приводить до проблем в узгодженні графіків генерації та споживання енергії.

Нерівномірність вітрового потоку, а тому і потужність, що генерується ВЕС, можна розглянути на багаторічному досвіді країн з високою часткою ВЕС в енергосистемі (рис. 1.6).

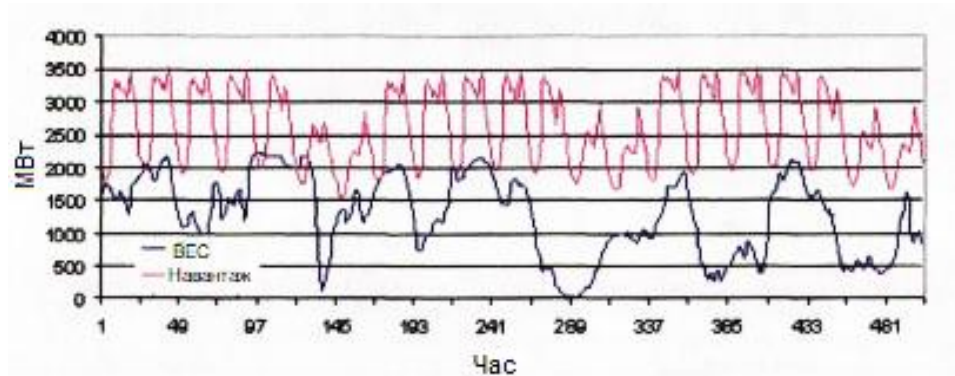


Рисунок 1.6 - Графіки навантаження та генерації ВЕС загальною встановленою потужністю 2400 МВт у західній частині Данії. У період 128-139 год. - регіональний шторм 8 січня 2005 р.

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. Всі процеси, які пов'язані з використанням енергії швидкості вітру, зокрема, генерація електроенергії ВЕУ, мають випадковий характер і їх характеристики мають статистичний розкид. Завдання оцінки поточного значення швидкості вітру формулюється як створення ймовірнісного опису випадкового процесу у вигляді розбиття всього тимчасового процесу на окремі часові інтервали, у межах кожного з яких можна використовувати наближення стаціонарності, тобто незалежності всіх визначених властивостей від часу. Як період стаціонарності можуть бути прийняті різні часові інтервали з відповідною точністю опису, залежно від реальних умов випадкового процесу. Зокрема, у деякому наближенні можна вважати процес стаціонарним у всьому аналізованому часі, наприклад, протягом дня, місяця та року [7].

Для систематизації характеристик вітрової енергії розробляється вітроенергетичний кадастр, що є сукупністю аерологічних та енергетичних

характеристик вітру, що дозволяють визначити його енергетичну цінність, а також доцільні параметри та режими роботи ВЕУ.

Джерелами отримання вихідної інформації є:

- метеостанції, у яких здійснюються вимірювання всіх кліматологічних параметрів, зокрема швидкості вітру, зазвичай 4 рази на добу. У сучасних метеостанціях виміри проводяться по 8 румбах (багаторічні спостереження);
- метеостанції безперервного спостереження, як правило, споруджуються на передбачуваних майданчиках установки ВЕУ;
- аерологічні станції (зонди та кулі), що запускаються періодично на різні висоти.

Для отримання достовірних даних про середні швидкості вітру, які визначають його енергетичну здатність, виникає питання репрезентативності вибірки випадкових значень швидкості, тобто, про необхідний обсяг та тривалість вимірювань. У випадку, зі збільшенням обсягу одержуваних даних точність і достовірність обчислюваних середніх значень підвищуються. Для чисельної оцінки використовується коефіцієнт варіації середніх швидкостей, який зазвичай падає зі збільшенням періоду усереднення. Наприклад, середньорічна швидкість має менший розкид, ніж багаторічна середньомісячна швидкість.

У той же час, низка інших європейських досліджень показує, що коефіцієнт варіації середньорічних швидкостей вітру знаходиться в межах 15% середнього багаторічного значення. Проте повторюваність вітру різних градацій швидкостей у різні роки відхиляється від середніх значень на велику (часто $\pm 50\%$) величину.

Повторюваність швидкості вітру є одним із найважливіших параметрів кадастру. Вона показує, яку частину часу протягом періоду, що розглядається, вітер мав певну швидкість. Тим самим визначається енергетична цінність вітру, оцінюється доцільність та ефективність його використання.

1.4 Висновки до розділу

Проведений аналіз стану і перспектив використання енергії вітру у світі. Виявлено, що вітроенергетичні установки поступово заміняють традиційні енергогенеруючі електростанції.

Проведено аналіз схем забезпечення електроенергією від вітроенергетичної установки без централізованого електропостачання, із централізованим електропостачанням та з дизель-генератором.

Встановлено, що основними відмінностями вітрової енергетики від теплової є нерівномірність потоку первинної енергії, що робить проблематичним узгодження графіків генерації та споживання енергії.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Архітектура ВЕУ

Вітроенергетична установка є комплексом взаємопов'язаного обладнання та споруд, призначеним для перетворення енергії вітру в такі види енергії як механічну, електричну, теплову та інші.

Вітроагрегат є основною складовою ВЕУ і складається з вітродвигуна, системи передачі потужності вітру до навантаження (споживачеві) і самого споживача вітрової енергії (будь-якого пристрою: електромашинного генератора, водяного насоса, нагрівача тощо).

Вітродвигун є пристроєм який перетворює кінетичної енергії вітрового потоку на механічну енергію робочого руху вітродвигуна. Робочі рухи, які здійснює вітродвигун, можуть бути різними. На існуючих сьогодні вітродвигунах як робочий рух використовується обертальний рух по колу. Також є пропозиції (іноді навіть реалізовані) щодо використання інших видів робочого руху, наприклад коливального. У цій роботі розглядаються вітродвигуни, що здійснюють лише круговий обертальний робочий рух (вітротурбіни) [2]. У таких вітродвигунів пристроєм, який безпосередньо сприймає аеродинамічні навантаження від вітрового потоку і перетворює енергію вітру на механічну енергію робочого кругового обертального руху, є лопатева система, звана вітроколесом.

Лопатева система вітродвигуна (вітроколесо) може мати різне конструктивне виконання. У сучасних вітродвигунів лопатева система виконана у вигляді жорстких лопатей з криловим профілем у поперечному перерізі (іноді в цьому випадку використовують терміни "крильчасті", або пропелерні, вітродвигуни). Відомі успішно працюючі лопатеві системи, в яких замість лопатей використовуються циліндри, що обертаються (використання ефекту Магнуса). Є пропозиції щодо створення лопатевої системи на основі

різного типу лопатей з гнучкими поверхнями (вітрила). Таким чином, лопать - це складова частина вітроколеса, що створює крутний момент.

Лопатева система вітродвигуна з робочим круговим обертальним рухом може мати горизонтальну або вертикальну вісь обертання [13]. Згідно з визначенням, горизонтально-осьовим вітродвигуном називається вітродвигун, у якого вісь обертання вітроколеса розташована паралельно або майже паралельно вектору швидкості вітру (рис. 2.1). Вітродвигун, у якого вісь обертання розташована перпендикулярно як вектору швидкості вітру, так і землі, називається вертикально-осьовим (рис. 2.2).

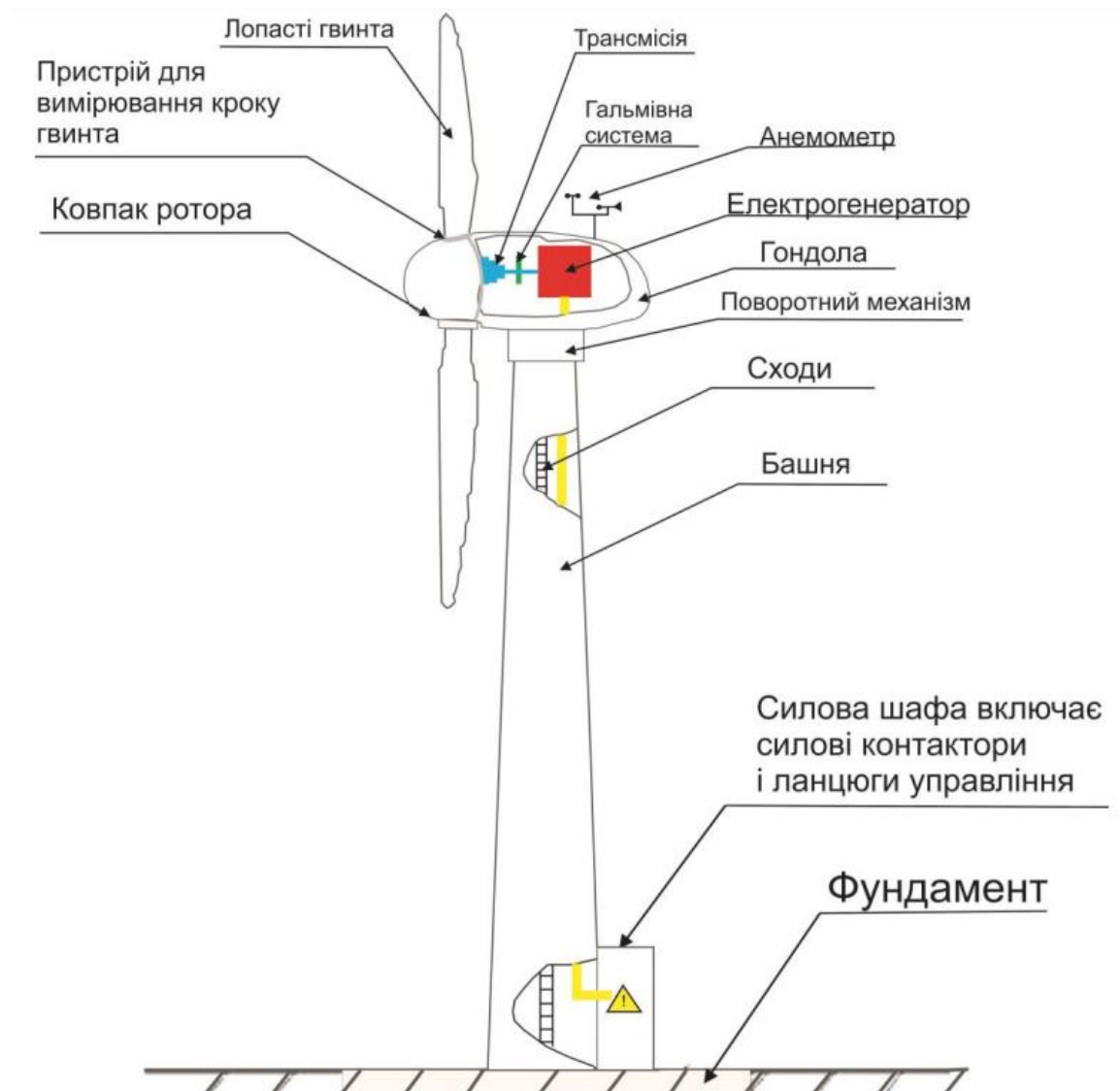


Рисунок 2.1 - Конструктивна схема горизонтально-осьового вітроагрегату



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд вертикально-осьового вітроагрегату

2.2 Параметри, що характеризують роботу вітродвигуна та вітроустановки

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

$$P_0 = \frac{m \cdot V_0^2}{2} \quad (2.1)$$

де P_0 – кінетична енергія, Дж.

Величина $m = \rho \cdot A \cdot V_0$ в перетині перед вітроагрегатом є масовою витратою повітря, який міг би пройти через площу вітроколеса, що охоплюється, за одиницю часу, маючи щільність ρ . Охоплювана площа вітроколеса – це геометрична проекція площі вітроколеса на площину, перпендикулярну вектору швидкості вітру V_0 . У разі перпендикулярності вектора швидкості вітру V_0 до площі A , що омітається, величина $A = \pi D_a^2 / 4$

для горизонтально-осьового вітродривуна (див. рис.2.1) і $A = D_l H_a$ для вертикально-осьового вітродривуна (див. рис.2.2). Тут діаметр вітроколеса D_l – це діаметр кола, що описується найбільш віддаленими від осі обертання вітроколеса частинами лопатей.

Розташована потужність повітряного потоку $N_{віпро}$ натякає на вітродривун (тобто повна кінетична енергія повітряного струменя, що набігає, зі швидкістю V_0 і площею поперечного перерізу, рівної площі, охоплюється його лопатевою системою):

$$N_{віпро} = \frac{\rho V_0^3}{2} A. \quad (2.2)$$

Вітродривун витягує з вітрового потоку тільки частину цієї потужності і передає її споживачеві, наприклад електрогенератору. Позначимо потужність, яку розвиває вітродривун, як N_m . Відношення потужності вітродривуна $N_{вд}$ (механічної енергії, що розвивається вітроколесом) до потужності вітрового потоку $N_{віпро}$ (повної енергії, що проходить через охоплювану площу вітроколеса).

$$C_p = \frac{N_{вд}}{N_{віпро}}. \quad (2.3)$$

Цей параметр називають коефіцієнтом використання енергії вітру. Таким чином, механічна потужність вітродривуна:

$$N_{вд} = C_p \frac{\rho V_0^3}{2} A. \quad (2.4)$$

При ряді спрощених припущень щодо структури перебігу повітряного потоку Н.Є. Жуковський та А.Бетц показали, що коефіцієнт використання енергії вітру не може перевищити значення $16/27$.

Відношення окружної швидкості кінця лопаті на периферії до швидкості збуреного потоку вітру V .

$$X = \frac{U_R}{V_o} = \frac{\Omega R_n}{V_o}. \quad (2.5)$$

Цей параметр називають коефіцієнтом швидкохідності вітродвигуна (числом модулів). Тут Ω – кутова швидкість обертання вітродвигуна. Для поточного радіусу r користуються поняттям місцевого коефіцієнта швидкохідності

$$x = \frac{U}{V_o} = \frac{\Omega r}{V_o}. \quad (2.6)$$

Коефіцієнтом крутного моменту $M_{кр}$, що розвивається вітродвигуном, називають величину

$$C_M = \frac{M_{кр}}{\pi R_n^3 \rho \frac{V_o^2}{2}}. \quad (2.7)$$

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

$$C_p = C_M X. \quad (2.8)$$

На вітроколесо діє сила осьового (лобового) тиску, що є сумарним аеродинамічною навантаженням на поверхню лопатей вітроколеса, що утворюється в результаті осьового опору профілю лопаті вітровому потоку. Відношення осьової сили P (сили лобового тиску), що діє на лопатеву систему вітродвигуна, до швидкісного тиску (напору) $\rho \frac{V_o^2}{2} A$, а на поверхню, що омитається лопатями, називають коефіцієнтом осьового (лобового) тиску

$$B = \frac{P}{\frac{\rho V_0^2}{2}} A \quad (2.9)$$

Потужною (енергетичною) характеристикою вітроагрегату називається розмірна залежність потужності m , що розвивається на валу вітродвигуна, від швидкості вітру V_0 незагальмованого потоку перед ним (рис. 3). Вітродвигун під дією сили вітру починає своє обертання без навантаження з деякого мінімального значення швидкості вітру V_{min} (швидкість відскоку). Зазвичай, ця швидкість становить 2,5...5 м/с.

При досягненні швидкості потоку, що дорівнює розрахунковій швидкості вітру $V_{роз}$, вітродвигун розвиває номінальну потужність $N_{вд.ном}$. Номінальна потужність – це максимальне значення вихідної потужності, на яку розрахований вітроагрегат в тривалому режимі роботи. Зазвичай в діапазоні швидкостей вітру від V_{min} до $V_{роз}$ регулювання вітродвигуна, крім моменту пуску не відбувається, але потім в діапазоні швидкостей від розрахункової швидкості $V_{роз}$ до максимальної V_{max} набуває чинності система регулювання. Максимальна робоча швидкість вітру V_{max} - це швидкість вітру, при якій розрахункова міцність вітроагрегату дозволяє йому працювати (виробляти електроенергію) без пошкоджень. Якщо регулювання здійснюється поворотом лопаті, 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.

Значна частина горизонтально-осьових вітроагрегатів потужністю $N_m > 500$ кВт, що випускаються сьогодні, мають лопаті, які не повертаються. Це полегшує їх конструктивне виконання. В цьому випадку регулювання потужності вітродвигуна зі зростанням швидкості вітру здійснюється за рахунок виконання профілю лопаті, який змінюється уздовж радіусу спеціальним чином. 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).

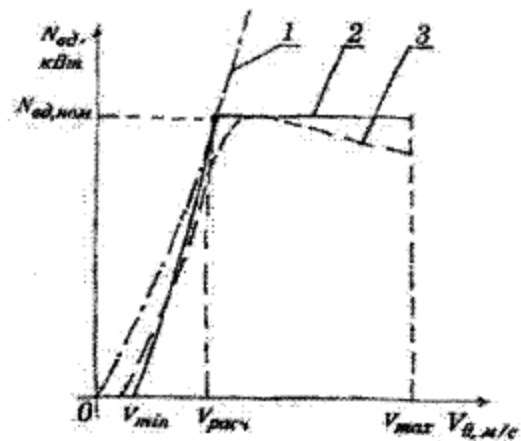


Рисунок 2.3 - Залежність потужності вітродвигуна від швидкості вітру: 1 – N_{vit} , потужність вітрового потоку; 2 - $N_{ед}$, потужність вітродвигуна, що регулюється поворотом лопаті; 3 - $N_{ед}$, потужність вітродвигуна, регульованого за рахунок зриву потоку з лопаті

Сучасний вітроагрегат загального призначення представлений на рис.2.4 у вигляді структурної схеми [8].

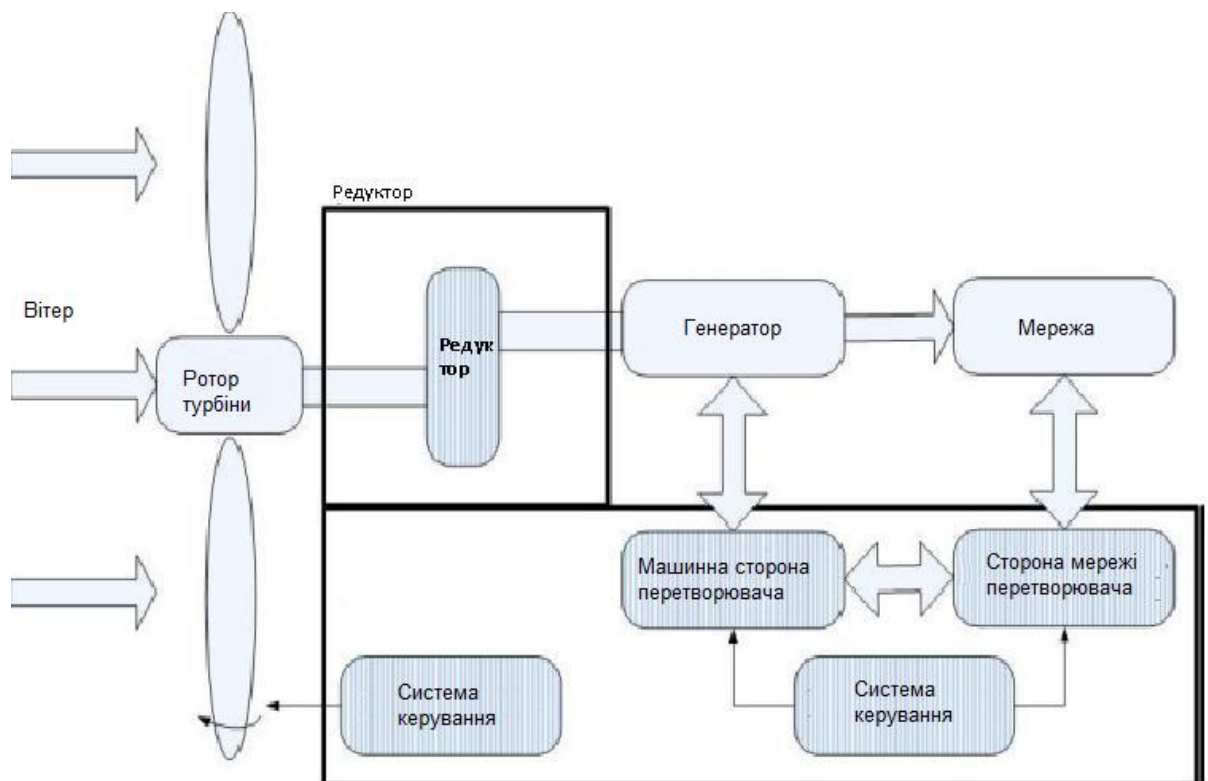


Рисунок 2.4 – Сучасна схема вітрових турбін

Домінуючим конструктивним виконанням загального призначення є вітрова турбіна з горизонтальною віссю. Слід зазначити, що вихідна потужність за своєю сутністю є нестійкою та некерованою. Типова вітряна турбіна складається з наступних підсистем (структурна схема представлена на рис. 2.4):

- ротор турбіни та лопаті гвинта (рушійна сила);
- привід (вали, редуктор, муфти, механічний);
- електрична частина (кабелі, комутаційні апарати, трансформатори та силові електронні перетворювачі, споживачі).
- система керування.

2.3 Класифікація систем генерування електроенергії сучасних вітроенергетичних установок

Забезпечення можливості паралельної роботи вітроенергетичної станції у складі електренергетичної мережі (ЕЕС) визначається схемою генерування електроенергії (СГЕЕ), що використовується у ВЕУ, і потужністю підключеної мережі. В останньому випадку маються на увазі варіанти роботи ВЕС:

- на мережу безкінечної потужності;
- на автономне навантаження;
- на автономне навантаження або енергопостачання навантаження у паралель із мережею.

При роботі ВЕС паралельно з мережею ступінь взаємного впливу ВЕУ один на одного визначається потужністю мережі. У разі мережі безкінечної потужності такий вплив відсутній і кожна ВЕУ працює так само, як і одиночне встановлення паралельно з мережею. При потужності мережі, що дорівнює потужності ВЕС, потрібне групове регулювання з метою забезпечення заданої напруги на шинах ВЕС.

В даній роботі розглядаються ВЕС, що працюють на мережу безкінечної потужності, таким чином питання розподілу навантаження між окремими ВЕУ, як правило, не виникає. При цьому потужність кожної ВЕУ визначається потужністю первинного джерела енергії (вітру) і електроенергія, що виробляється, повністю споживається мережею, або накопичується в акумуляторних батареях.

Перш ніж перейти до розгляду можливих схем СГЕЕ ВЕУ, зупинимося на деяких особливостях конструктивного виконання вітроколеса (ВК) та агрегату передачі потужності (АПП), оскільки це безпосередньо пов'язано з вибором типу генератора та схеми електричної частини ВЕУ.

При роботі ВЕУ на потужну мережу можливе застосування ВК:

Нерегульованого – регулювання виконується за рахунок спеціального профілю лопаті: Потужність, яка розвивається ВК, не перевищує номінального значення в області швидкостей вітру $v_{\omega} > v_{\omega \text{розрах}}$ за умови, що частота його обертання також не виходить за номінальну. Частота обертання ВЕУ обмежується схемою генерування електроенергії за рахунок паралельної роботи із мережею.

Регульованого – потужність обмежується СГЕЕ, частота обертання і потужність – регулюванням ВК чи навпаки, але у процесі обмеження P і ω беруть участь одночасно СГЕЕ і ВК.

Стандартні характеристики ВЕУ представлені на рис. 2.5 (на прикладі ВЕУ потужністю 2 МВт):

- залежність потужності ВЕУ, яка видається, $P_{\text{тех}}$ від швидкості вітру v_{ω} для всього діапазону робочих значень v_{ω} (4-25 м/с) (рис. 2.5 а);

- залежність потужності ВЕУ, яка видається, $P_{\text{ел}}$ від швидкості обертання генератора n_g для всього робочого діапазону швидкостей обертання $n_g^{\min} - n_g^{\text{dyn,max}}$ (рис. 2.5 б)

$$\omega_g \ v_w = \eta'_{\text{ред}} \omega_t \ v_w$$

$$n_g \ v_w = \frac{60}{2\pi} \omega_g \ v_w = \frac{60}{2\pi} \eta'_{\text{ред}} \omega_t \ v_w$$

де $\eta_{ред}$ – передатне відношення редуктора.

На рис. 2.5 представлені дві стратегії управління ВЕУ:

1. Оптимальне використання напору вітру ($v_w < v_{орозрах}$): при роботі ВЕУ в режимі генерування енергії при швидкості вітру нижче $v_{орозрах}$ задача системи управління ВЕУ полягає в регулюванні частоти обертання валу ВК ВЕУ в області робочих значень швидкості вітру з метою оптимального використання натиску вітру (ділянка характеристик ABCD на рис. 2.5 та 2.5 б).

2. Обмеження потужності, що видається до $P_{ном}$ ($v_w > v_{орозрах}$) – при швидкостях вітру вище розрахункової $v_{орозрах}$ задача системи управління ВЕУ полягає в підтримці генерованої ВЕУ потужності на номінальному рівні P_1 (ділянка характеристик DE на рис. 2.5 та 2.5,б).

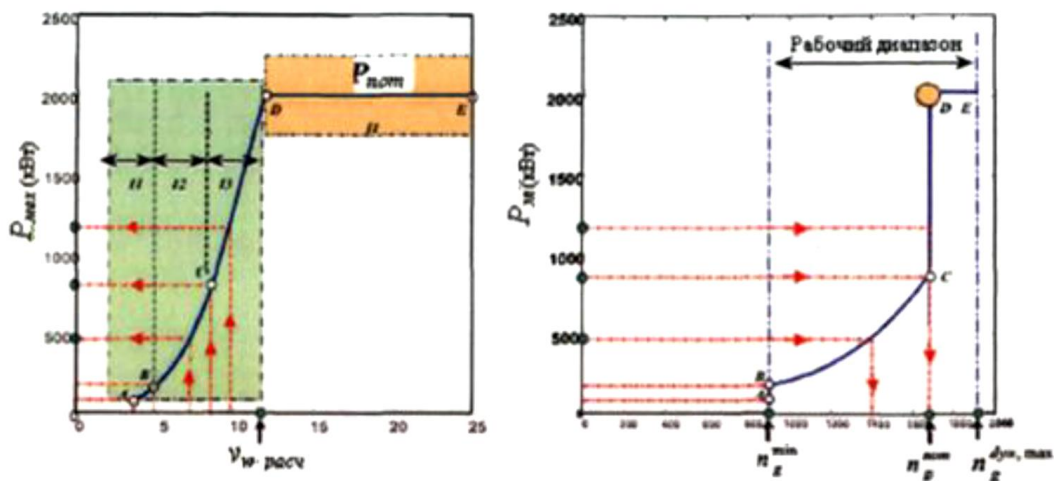


Рисунок 2.5 – Стандартні характеристики ВЕУ:

$$(a) P_{мех} = f(v_w), (b) P_{ел} = f(n_g).$$

Розглянемо стратегію управління ВЕУ кожного відрізка показників, представлених на рис. 2.5 і 2.5 б.

Стратегія I (відрізок А-В): швидкість вітру настільки мала, що $\omega_t \leq \omega_t^{\min}$ та $n_g \leq n_g^{\min}$. Частота обертання, що задається, ВК ВЕУ $\omega_t^{ref} = \omega_t^{\min}$ $n_g = n_g^{\min}$.

Коефіцієнт гальмування потоку (відносне зменшення в ВК потоку вітру, що набігає) розраховується наступним чином:

$$\lambda v_{\omega} = \frac{\omega_t^{\min} R}{v_{\omega}}. \quad (2.10)$$

Кожному значенню $\lambda(v_{\omega})$ відповідає оптимальний коефіцієнт використання потужності C_p^{opt} і значення кута установки лопатей ВК ВЕУ.

Потужність, що видається ВЕУ C_p^{opt} при ω_t^{\min} :

$$P_{mex}^{opt} v_{\omega} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_p^{opt} v_{\omega}}{\lambda^3 v_{\omega}} \omega_t^{\min 3}, \quad (2.11)$$

де ρ – густина повітря;

R – радіус ВК.

Стратегія II (відрізок В-С): $\omega_t^{\min} < \omega_t \leq \omega_t^{nom}$ $n_g^{\min} < n_g \leq n_g^{nom}$: завдання системи управління ВЕУ полягає у забезпеченні C_p^{\max} , якому відповідають оптимальні значення β_{opt} та λ_{opt} . В результаті значення β_{opt} підтримується постійним, а значення $\lambda_{opt}(v_{\omega})$ змінюється таким чином, щоб значення ω_t відповідало значенню, що задається ω_t^{ref}

$$\omega_t^{ref} v_{\omega} = \frac{\lambda_{opt} v_{\omega}}{R}, \quad (2.12)$$

$$P_{mex}^{\max} v_{\omega} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_p^{\max} v_{\omega}}{\lambda_{opt}^3} \omega_t^{ref} v_{\omega}^3. \quad (2.13)$$

Стратегія III (відрізок С-D): $\omega_t^{ref} = \omega_t^{nom}$ і $P < P_{nom}$ завдання системи управління аналогічне задачі для ділянки А-В; єдиною відмінністю є те, що $\lambda(v_{\omega})$, $C_p^{opt}(\lambda)$, β_{opt} , P_{mex}^{opt} розподіляються при ω_t^{nom} , що в свою чергу відповідає n_g^{nom} .

Стратегія IV (відрізок D-E): $v_{\omega} > v_{\omega_{розрах}}$ завдання системи управління

ВЕУ полягає в обмеженні генерованої ВЕУ потужності P_{mex}^{ref} до P_{nom} за рахунок підтримки $P_{nom} = P_{ref}$ за допомогою СГЕЕ та системи регулювання кута установки лопатей ВК β .

Робочий діапазон частот обертання ВК визначається його конструктивним виконанням. АПМ здійснює передачу моменту, що обертає, з валу ВК на вал генератора і зазвичай містить у своєму складі редуктор. Можливе, однак, розміщення ротора генератора безпосередньо на маточині ВК. І тут частота обертання валу генератора дорівнює частоті обертання ВК [16].

Конструктивні особливості ВК такі, що з пуску необхідно подолати так званий «стоянковий» момент. ВЕУ із системою регулювання кута установки лопатей ВК можуть розвинути аеродинамічний момент, достатній для розкручування ВЕУ та такий, що визначається значенням швидкості вітру в момент пуску. Значення швидкості вітру, необхідне для подолання стоянчого моменту, істотно перевищує значення мінімальної робочої швидкості вітру, коли працююча ВЕУ розвиває корисну потужність. Тому для збільшення електроенергії, що виробляється, за рахунок роботи ВЕУ в області малих значень швидкості вітру, доцільно здійснювати пуск ВЕУ або повністю за допомогою СГЕЕ шляхом розкрутки до номінальної частоти обертання, або за допомогою СГЕЕ хоча б зрушити ВК з місця і розкрутити до деякого невеликого значення n_{min} , при якому з'являється момент ВЕУ, достатній для подальшого пуску ВЕУ.

Штатне та аварійне гальмування ВЕУ, як правило, вирішується механічними засобами:

- за допомогою механічних гальм,
- поворот лопат ВК у флюгерний стан.

Для ВЕУ зі змінною частотою обертання валу в штатних режимах можна здійснювати гальмування за допомогою генератора до певного значення частоти обертання (залежить від типу генератора СГЕЕ). При цьому енергія гальмування рекуперується в мережу, немає зношування механічних гальм і не потрібно точного регулювання положення лопатей ВК.

Розмаїття побудови ВЕУ проявляється насамперед у використанні провідними виробниками кількох типів генераторів електричної енергії, які, у свою чергу, висувають різні вимоги як до систем управління та регулювання комплексом в цілому, так і до наявності або відсутності додаткових ступенів перетворення електричної енергії до підключення до електричних мереж.

2.4 Математична модель ВЕУ

ВЕУ розроблені для того, щоб виробляти кінетичну енергію, що отримується від вітру, і перетворити її на електричну енергію. Аналогія може бути проведена між ВЕУ та стандартними електростанціями, які використовують кінетичну енергію пари. З погляду моделювання ВЕУ складається з наступних компонентів:

1. Ротор турбіни та лопаті гвинта (рушійна сила);
2. Вал і модуль коробки передачі (редуктор та перетворювач швидкості);
3. Електричний генератор;
4. Електричний перетворювач;
5. Система управління.

Ефективність взаємодії між кожним із вищезгаданих компонентів визначає, скільки кінетичної енергії витягнуто з вітру. Рис. 2.6 ілюструє загальну структуру ВЕУ.

Для створення моделі дослідження усєї ВЕУ відтворимо попередньо моделі складових частин усєї структури.

Модель вітроколеса описується наступними рівняннями. Диференціальне рівняння для опису обертального руху вітроколеса має такий вигляд:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_c, \quad (2.14)$$

де J – момент інерції системи;

ω – кутова швидкість;

M_a - аеродинамічний момент вітроколеса;

M_{em} – електромагнітний момент генератора;

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

$$M_a = C_p Z \frac{\rho S V^3}{Z \omega}, \quad (2.15)$$

де $C_p(Z)$ - коефіцієнт інерції енергоустановки (залежить від швидкохідності Z);

ρ – щільність повітря;

V - швидкість вітру;

S - охоплювана площа вітроколеса;

ω – кутова швидкість вітроколеса.

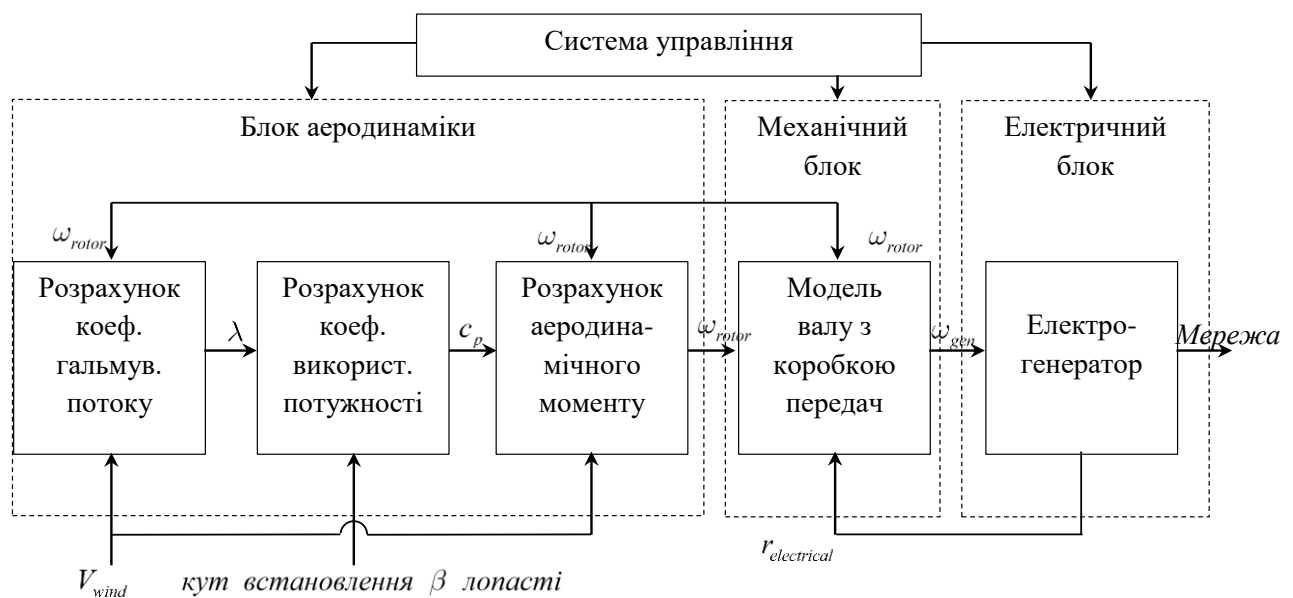


Рисунок 2.6 – Структурна схема ВЕУ

Звідси аеродинамічна потужність:

$$P_a = C_p Z \frac{\rho S V^3}{2}. \quad (2.16)$$

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

$$C_p Z = \left(\frac{c_1}{Z} - c_2 \right) e^{-\frac{c_3}{Z}} + c_4, \quad (2.17)$$

де $c_1 \dots c_4$ – коефіцієнти, що підбираються для заданої конструкції вітроколеса за відомою аеродинамічною характеристикою [8];

Швидкість Z визначається рівнянням $Z = \frac{P_M}{\omega}$.

Момент опору на валу дорівнює

$$M_o = \frac{P_M}{\omega}, \quad (2.18)$$

де P_M - механічна потужність на валу генератора.

Для перетворення механічної енергії обертання валу вітрогенератора на електричну енергію у ВЕУ застосовуються електричні генератори. До електричних генераторів для ВЕУ пред'являються специфічні вимоги, що враховують особливості їхньої роботи. Однією з найважливіших особливостей є те, що генератор приводиться до обертання вітроколесом, режим роботи якого залежить від швидкості вітру та, що дуже важливо, є непостійним.

В умовах мінливої швидкості вітру необхідно забезпечити необхідну характеристику генератора в широкому діапазоні швидкостей обертання, це тягне до збільшення габаритних розмірів та маси електричної машини в порівнянні з генераторами, розрахованими на режим роботи. З іншого боку, навантаження генератора може змінюватися в процесі роботи. Вона є функцією потужності та числа підключених споживачів [8].

В умовах зміни швидкості обертання ротора та навантаження необхідно стабілізувати напругу на виході генератора. Для цього необхідно застосувати пристрій регулювання напруги. Таке регулювання зазвичай здійснюється за рахунок задання регулятором напруги струму у спеціальній обмотці збудження.

Застосування таких обмоток збудження призводить до збільшення габаритних розмірів, оскільки потрібно додаткове місце у конструкції генератора для розміщення обмоток.

Слід зазначити і той факт, що струм в обмотці збудження генератора призводить до додаткових електричних втрат, що іноді досягають величини 10-20% від корисної потужності.

Аналіз різних типів електричних машин, пристосованих для застосування у ВЕУ, показує, що питання вибору типу та конструкції генератора не однозначне. Так скажімо, перевагою застосування синхронної електричної машини зі збудженням від постійних магнітів буде відсутність необхідності живити обмотки збудження, і, отже, електричні втрати в обмотці збудження відсутні. При використанні електромагнітного збудження з'являється можливість управління вихідною напругою кола збудження, але знову ж таки з'являються електричні втрати на збудження.

Це пов'язано з тим, що при низьких оборотах струм в обмотці збудження повинен збільшити магнітний потік для компенсації зниження швидкості обертання, при цьому частина потужності, що генерується, буде витрачатися на це. Додатковим недоліком такої конструкції є необхідність передачі електричної енергії на обмотку збудження, що обертається, і це ускладнює конструкцію і знижує її надійність.

Ще одним недоліком конструкції електричної машини з електромагнітним збудженням є необхідність забезпечення якісного тепловідведення від обмотки збудження. На обмотці виділяється тепло за рахунок струму, що проходить по ній.

Таким чином, у ВЕУ малої потужності найбільше доцільно використовувати синхронні електричні машини зі збудженням від постійних магнітів (або «вентильні електричні машини»). Вони поділяються на електричні машини з радіальним та осьовим магнітним потоком. Однак можливі конструкції і без використання магнітом'яких матеріалів у сердечнику якоря, це веде до більшого зниження втрат. До того ж, використання електричних машин

із збудженням від постійних магнітів забезпечує зниження реактивного моменту генератора, що важливо при використанні в ВЭУ, оскільки пульсації реактивного моменту зазвичай призводять до небажаної вібрації конструкції ВЕУ та виникнення шуму.

Проектування генератора, працюючого разом із системою регулювання ВЕУ має особливості. Зниженню часу розробки електричної машини сприяють сучасні засоби обчислювальної техніки та відповідне програмне забезпечення. На етапі опрацювання електромагнітних та теплових параметрів можливе застосування програмних пакетів, що базуються на методі кінцевих елементів, наприклад, Ansys EMAG або Maxwell. На етапі конструювання робота розробника полегшується завдяки твердотільному прототипуванню в системах автоматизованого проектування, наприклад, у SolidWorks.

Для комп'ютерного моделювання ВЕУ в якості електричної машини, що перетворює механічну енергію в електричну, був обраний генератор із збудженням від постійних магнітів, з осьовим напрямком магнітного потоку і беззалізним якорем, що містить обмотки статора. Особливістю проектування такого генератора є відсутність втрат на перемагнічування (через відсутність сталевих магнітопроводу) та низька індуктивність обмоток. Тому вплив індуктивності при комп'ютерному моделюванні ВЕУ можна знехтувати.

З метою зменшення вимог до обчислювальних ресурсів для моделювання алгоритмів управління потужністю ВЕУ у межах поставленого завдання було запропоновано таку модель електричного генератора.

Виходячи із схеми заміщення, напруга фазної обмотки генератора має вигляд:

$$u = e - ri - L \frac{di}{dt}, \quad (2.19)$$

де e - електрорушійна сила (ЕРС);
 r – активний опір фазної обмотки;
 i – струм у фазній обмотці;
 L – індуктивність фазної обмотки.

Для зниження впливу електричної машини на результати дослідження алгоритмів управління ВЕУ було прийнято, що активний опір і індуктивність фазної обмотки дорівнюють нулю, а ЕРС в обмотках генератора визначається такими рівняннями (2.20)

$$\begin{cases} e_A = k\omega \cdot \sin 2p\omega t \\ e_B = k\omega \cdot \sin\left(2p\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_C = k\omega \cdot \sin\left(2p\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.20)$$

де e_A, e_B, e_C – ЕРС відповідних обмоток генератора;

k - коефіцієнт конструкції генератора;

$2p$ – кількість пар полюсів;

ω – кутова швидкість ротора генератора;

t – час.

На рис. 2.7 показано розроблену блок-схему моделі електричної машини у пакеті MATLAB/Simulink.

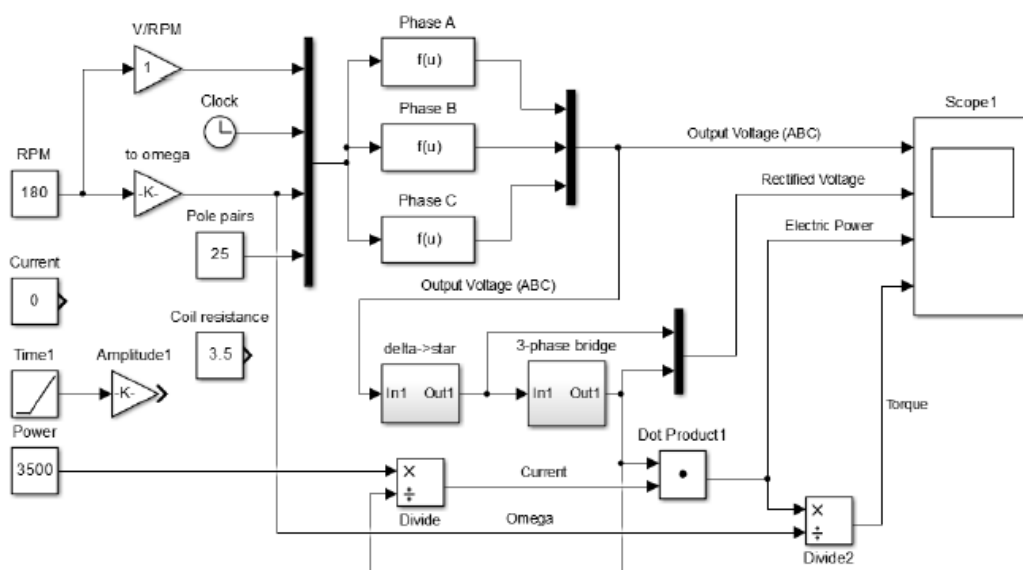


Рисунок 2.7 – Блок-схема моделі генератора

На рис. 2.8 наведено блок-схему моделі розрахунку з'єднання обмоток генератора за схемою «зірка».

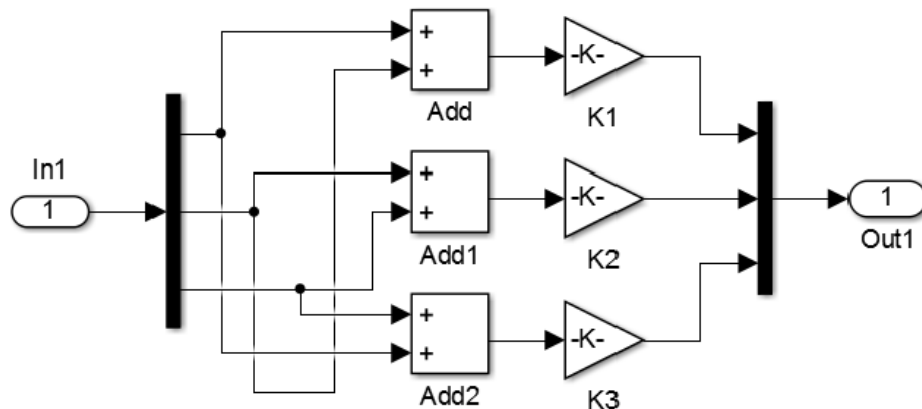


Рисунок 2.8 – Блок-схема з'єднання обмоток «зіркою»

Значна частка генерованої електричної енергії (30-35%) використовується живлення пристроїв на постійному струмі, у тому числі для зарядки акумуляторних батарей. Тому змінну напругу від генератора потрібно випрямити.

Випрямляч можна зобразити у вигляді структурної схеми яка зображена на рис. 2.9.

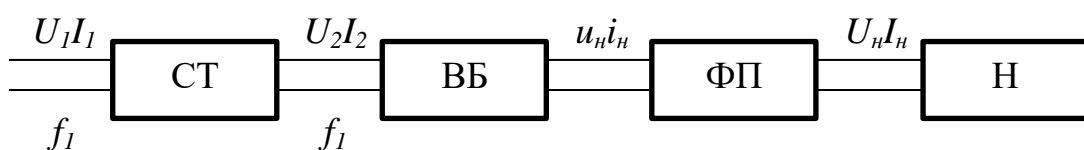


Рисунок 2.9 – Структурна схема випрямляча

СТ - силовий трансформатор;

ВБ - вентиляний блок;

ФП - фільтруючий пристрій;

Н - коло навантаження

Коефіцієнт використання трансформатора за потужністю, який має велике значення при розрахунку випрямляча знаходиться за формулою (2.21).

$$K_a = \frac{P_d}{S_{заб}} = \frac{2U_d I_d}{U_1 I_1 + U_2 I_2}, \quad (2.21)$$

де U_1, I_1 – діючі значення первинної напруги та струму
 U_d, I_d – середні значення випрямленої напруги та струму,
 U_2, I_2 – діючі значення вторинної напруги та струму.

Збільшення коефіцієнта використання трансформатора приводить до зменшення габаритів випрямляча та зростання коефіцієнт корисної дії.

Трифазна мостова схема (рис. 2.10, а) має найкращий коефіцієнт використання трансформатора за потужністю. Діаграми напруг та струмів, представлені на рис. 2.10, б та 2.10, в.

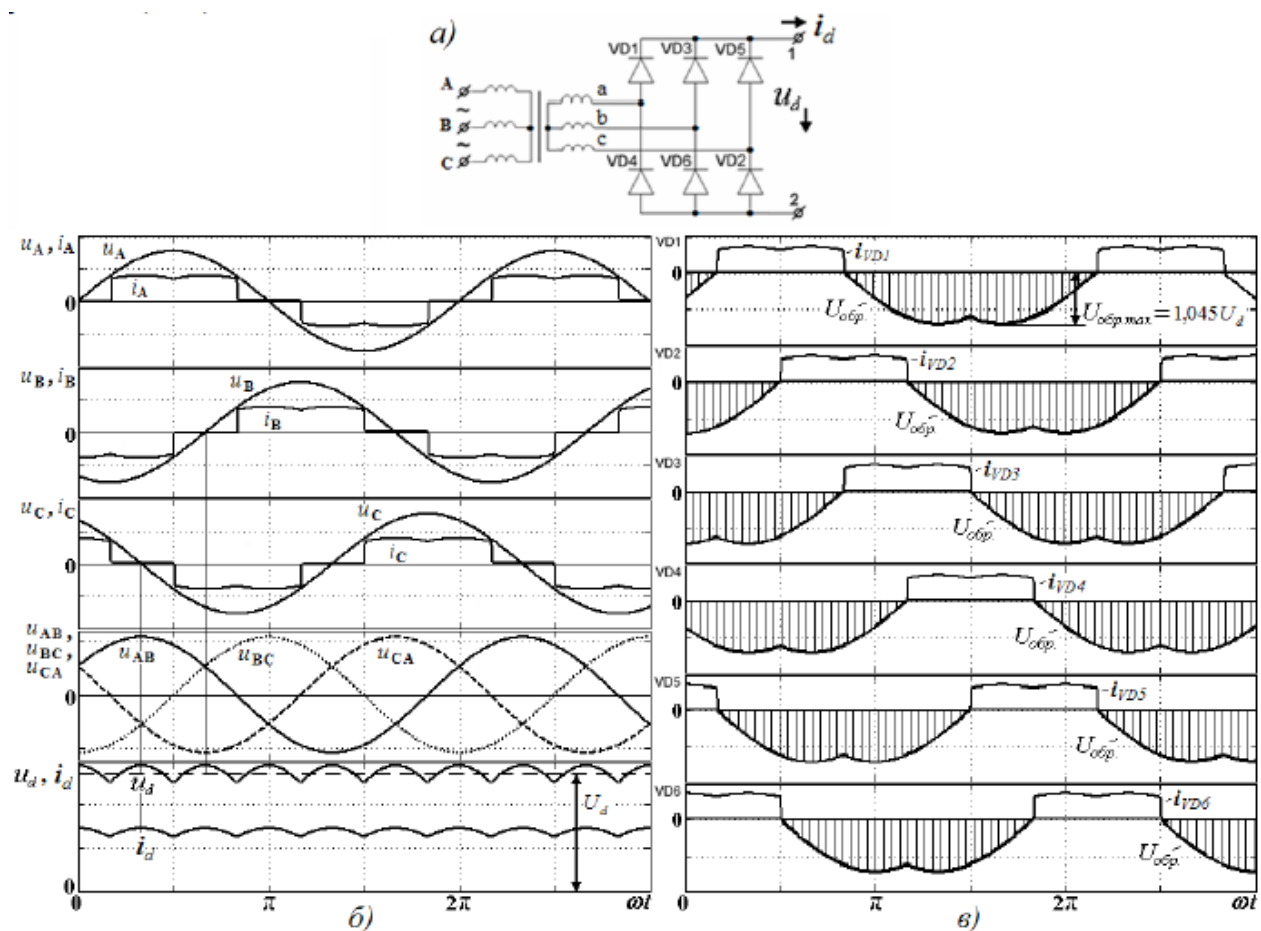


Рисунок 2.10 - Трифазна мостова схема випрямлення (а) та діаграми напруги та струмів у ній при роботі на активне навантаження (б, в).

Кожна з двох груп випрямляча повторює роботу трифазного випрямляча з середньою точкою, тому при такому ж значенні напруги вторинної обмотки трансформатора U_2 , як і в трифазному випрямлячі з середньою точкою, середня випрямлена напруга даного випрямляча U_d буде вдвічі більшою або навпаки, при тому ж значенні U_d величина U_2 буде вдвічі меншою (2.22, 2.23) [9], що скорочує кількість витків вторинних обмоток трансформатора та знижує вимоги до ізоляції.

$$U_d = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \right) U_2 = 2,34 \cdot U_2, \quad (2.22)$$

$$U_2 = \left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \right) U_d = 0,425 \cdot U_d. \quad (2.23)$$

Максимальна зворотна напруга вентиля даної схеми дорівнює амплітуді лінійної вторинної напруги. Однак через те, що при тому ж значенні U_d величина U_2 в даній схемі в два рази менша, співвідношення тут виходить кращим.

$$U_{обр}^{\max} = \sqrt{6}U_2 = \left(\frac{\pi}{3} \right) U_d = 1,045 \cdot U_d. \quad (2.24)$$

На рис. 2.12 наведено блок-схему моделі розрахунку роботи трифазного випрямного мосту для імітації роботи генератора змінного струму на навантаження постійного струму.

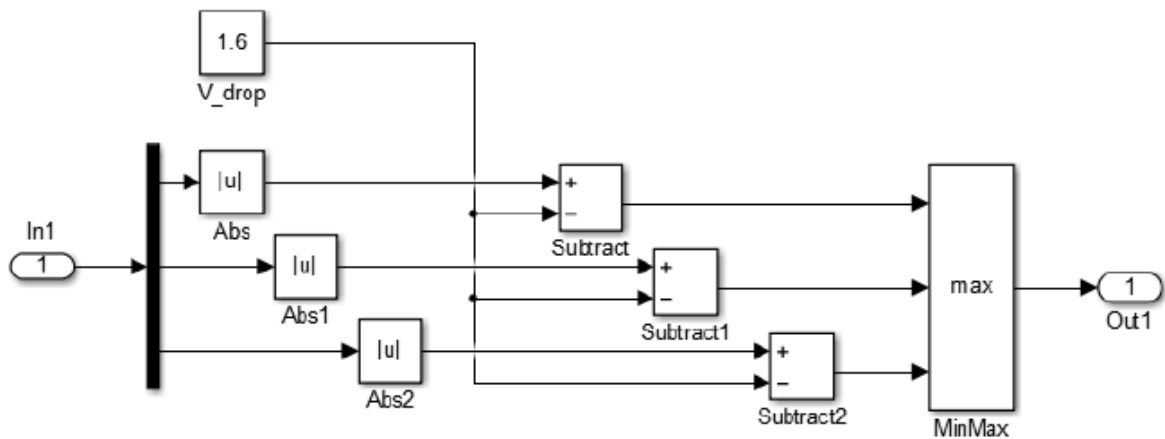


Рисунок 2.12 – Блок-схема моделі трифазного випрямного мосту

На рис. 2.13 наведено результат моделювання роботи генератора при частоті обертання валу 180 об/хв на холостому ході. Верхній графік демонструє ЕРС у фазних обмотках генератора, а нижній графік – напруги на вході та виході випрямляча.

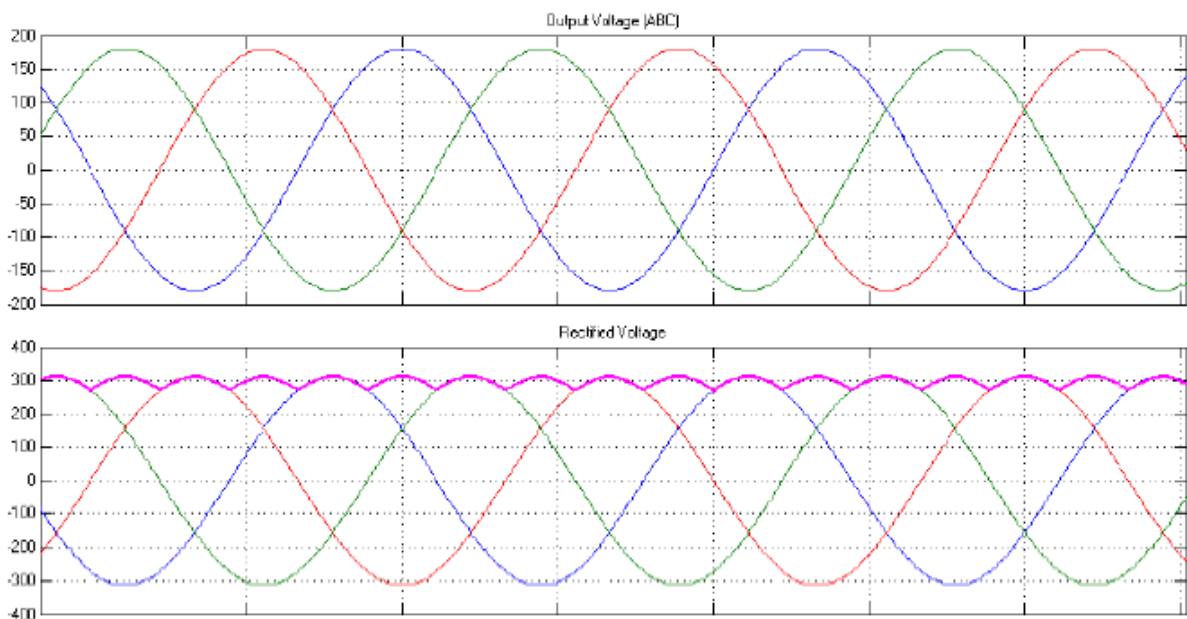


Рисунок 2.13 – Напруги на фазних обмотках та виході випрямляча

Для детальнішого моделювання електричної частини ВЕУ можна використовувати стандартні блоки Simulink бібліотеки SimPowerSystems. Для імітації роботи синхронного електрогенератора на постійних магнітах

використається блок Permanent Magnet Synchronous Machine. Робота генератора такого типу описується наступною системою рівняння в осях q та d , пов'язаних з ротором

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q, \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \\ T_e = 1,5 p [\lambda i_q + L_d - L_q i_d i_q], \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} T_e - F \omega_r - T_m, \\ \frac{d}{dt} \theta = \omega_r, \end{cases} \quad (2.25)$$

де L, L_d – індуктивності статора по осях q та d ;

R – опір обмотки статора;

i, i_d – проекції струму статора на осі q та d ;

U, U_d – проекції напруги статора на осі q і d ;

ω_r – кутова частота обертання ротора;

λ – магнітний потік постійних магнітів, зчеплений із обмоткою статора;

p – кількість пар полюсів;

e – електромагнітний момент;

J – сумарний момент інерції ротора та навантаження;

F – коефіцієнт тертя;

θ – кут положення ротора;

m – момент опору.

На рис. 2.14 представлена блок-схема моделі генератора та випрямляча з використанням стандартних блоків їхньої бібліотеки Simulink.

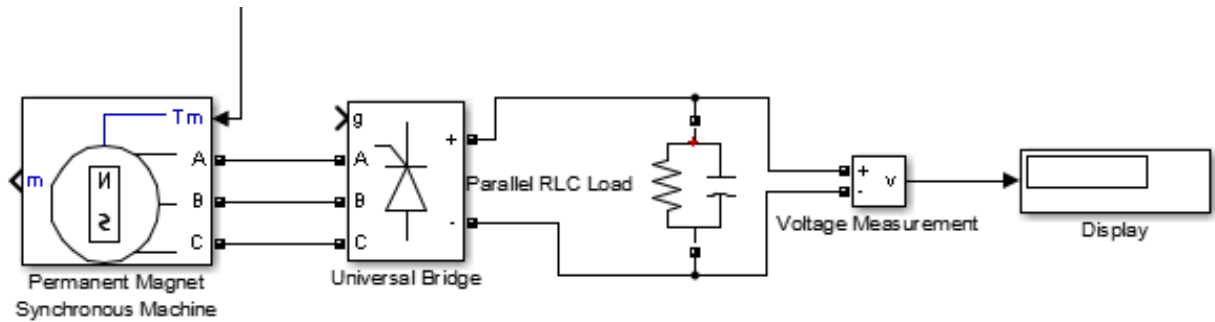


Рисунок 2.14 – Блок-схема моделі генератора із використанням SimPowerSystems.

Напруга подається на трифазний некерований випрямний міст Universal Bridge. Для згладжування пульсації служить RC-фільтр з постійною часу, яка набагато більша періоду коливань струму в обмотці.

2.5 Математичний опис сервоприводу

Як було зазначено раніше, основні функції управління – це оптимізація потужності у зоні 2 і обмеження потужності у зоні 3, останнє досягається зниженням швидкості, або управлінням кутом нахилу ВК (рис. 2.15).

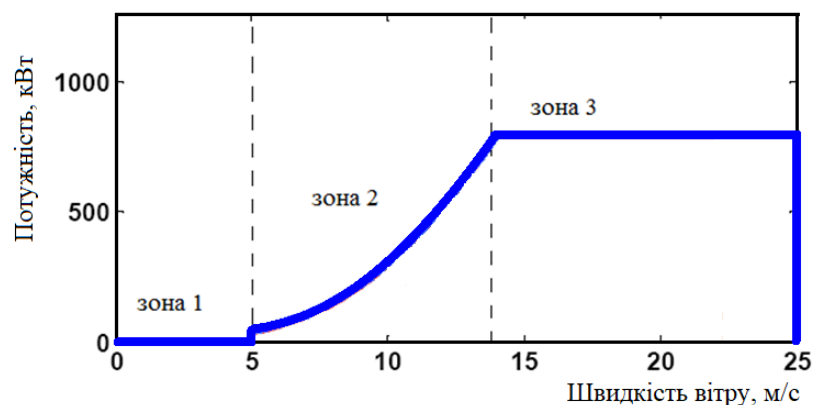


Рисунок 2.5 – Енергетична характеристика ВЕУ

Для управління потужністю здійснимо створення виконавчих механізмів для системи управління ВЕУ. Обмеження значення кута нахилу та його

градієнта забезпечується сервоприводом. У зв'язку з цим, необхідно розробити модель, яка б імітувала роботу сервоприводу.

Раніше, у середині минулого століття, у конструкції лопаті для цих цілей використовувалася система противаг, які забезпечували поворот лопатей навколо своїх поздовжніх осей. Але в міру того, як турбіни росли в розмірах, а електроніка інтенсивно розвивалася, ці механізми були замінені на електрогідравлічні або пневматичні сервоприводи. Висока гнучкість цих пристроїв підвищила якість та ефективність стратегій управління потужності, що виробляється.

Вище було сказано, що головним завданням управління вітряної турбіни є керування кутом нахилу вітроколеса. Для однозначного вибору способу підвищення якості регулювання положення кута нахилу ВК турбіни, поставимо питання «які можливі шляхи поліпшення характеристик регулятора?» Істотного поліпшення показників регулятора слід очікувати навіть за рахунок підвищення швидкодії сервопривода, що виступає як виконавчий елемент глобальної системи управління потужністю турбіни [9].

У реальній системі максимальна швидкість поршня сервоприводу не збільшується, оскільки вона обмежена продуктивністю маслосистеми. Однак у процесах керування вона може підвищуватися до максимально можливої, що виявляється у більш жорсткому та впевненому відпрацюванні сигналів управління: замість млявого «дотягування» сервоприводом до заданого положення спостерігається впевнене переміщення сервоприводу практично з максимальною швидкістю.

Дослідження у цій галузі показують, що для збереження жорсткості позиціонування зі збільшенням посилення необхідно пропорційно збільшувати витрату робочої рідини імпульсної лінії. На жаль, це спричиняє збільшення продуктивності маслосистеми, що робить такий шлях удосконалення системи регулювання практично неможливим.

Однак в електрогідравлічній системі регулювання, де управління сервоприводом реалізується в електричній частині, зазначених обмежень немає,

і це є практичною основою для реалізації електрогідравлічного сервоприводу як виконавчого механізму глобальної системи управління потужністю вітряної турбіни.

Виходячи з вищесказаних міркувань, зробимо висновок, що якість управління становищем сервоприводу робить істотний внесок у характер роботи системи управління турбіною. Отже, контур управління становищем гідравлічного сервоприводу є відповідальною ланкою у всій системі керування.

Сервопривід даної системи управління є нелінійним пристроєм, що здійснює поворот лопатей гвинта турбіни синхронно. У замкнутому контурі сервопривід може бути змодельований як динамічна система першого порядку з насиченням амплітуди і похідної виходу. На рис. 2.16 представлена структурна схема системи першого порядку.

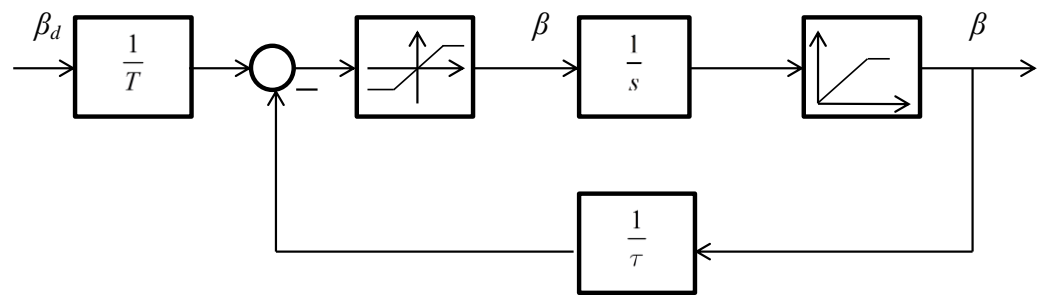


Рисунок 2.16 – Структурна схема сервоприводу

Динаміка цієї системи у лінійній частині описується диференціальним рівнянням виду:

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{1}{\tau}\beta + \beta_d \quad (2.26)$$

де β і β_d - це дійсний та заданий кут нахилу відповідно,
 τ – стала часу, яка характеризує швидкодію сервоприводу.

2.6 Висновок до розділу

1. Розглянуто деякі конструктивні особливості енергоустановки, що генерує електроенергію від вітру. Залежно від призначення установки такого типу можуть відрізнятися за своєю структурою. Використання ВЕУ найчастіше передбачає роботу на зовнішню електромережу, яка, у свою чергу, може впливати на роботу самої ВЕУ.

2. Основні схеми генерації електроенергії ВЕУ реалізовані на синхронному генераторі із постійними магнітами. Така схема добре зарекомендувала себе на практиці у низці європейських країн та США. Саме цей тип електричного генератора увійшов в основу створюваної математичної моделі.

3. Крім віддачі електроенергії в мережу, електроенергія також накопичується в акумуляторних батареях для подальшого місцевого споживання. Для цієї мети одержувану змінну напругу генератора необхідно перетворити на постійний струм, придатний для заряду батареї.

4. У моделі ВЕУ крім АКБ присутній інвертор і фільтруючий пристрій.

5. Запропонована математична модель ВЕУ та сервоприводу використана в наступному розділі для дослідження конструкції ВЕУ з двома вітроколесами на одному валу, а також системи керування такою енергоустановкою.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Вітроенергетична установка з двома вітроколесами

У багатьох регіонах України швидкість вітру протягом року змінюється в настільки широких межах, що вибір для таких умов ефективної вітроенергетичної установки стає досить складним. В такому разі природним і ефективним рішенням є ВЕУ з двома вітроколесами різної потужності, кожне з яких працює у оптимальному для себе діапазоні сили вітру. Цей розділ присвячений розробці системи управління кутом нахилу обох вітроколес.

Пропонується модель аеродинамічної частини ВЕУ, що складається з двох ВК, що обертаються на одному валу і мають різні діаметри лопатей. Для такої системи ВЕУ розроблено класичне управління з ПІ та ПІД законами. Отримані результати проаналізовано з погляду можливості використання у майбутньому даної конструкції ВЕУ із розробленою системою управління.

Зазвичай щодо потужних і силових характеристик взаємодії вітрового потоку з вітроколесом використовується класична теорія чи теорія реального колеса [8]. Відмінність останньої від класичної теорії полягає в тому, що в балансі енергій вітроколеса та вітропотoku враховуються витрати на утворення вихрових шнурів кінцями лопатей колеса.

У класичній теорії ідеальне ВК описується колесом з великим (безкінечним) числом лопатей з мінімальною шириною, вісь обертання співвідносять паралельно швидкості вітру, опір поверхні крил дорівнює нулю, циркуляція вздовж поверхні приймається постійною, втрачена швидкість повітряного потоку на лопаті постійна по всій поверхні вітроустановки, при цьому кутова швидкість прагне до безкінечності.

Представимо рівномірний потік вітру, що набігає на перше ідеальне вітроколесо зі швидкістю V_0 в перерізі A_0 . При зустрічі ламінарного вітрового потоку з перешкодою (рис. 3.1) тиск у потоці зростає від W_0 до W_1 і після проходження через перетин в якому розташоване колесо, різко падає до W_2 .

Розрідження, що утворилося, у міру віддалення від вітроколеса асимптотично наближається до нуля. Швидкість потоку при наближенні до вітроколеса знижується від V_0 до V_1 та після проходження перерізу A_1 досягає мінімального значення V_2 .

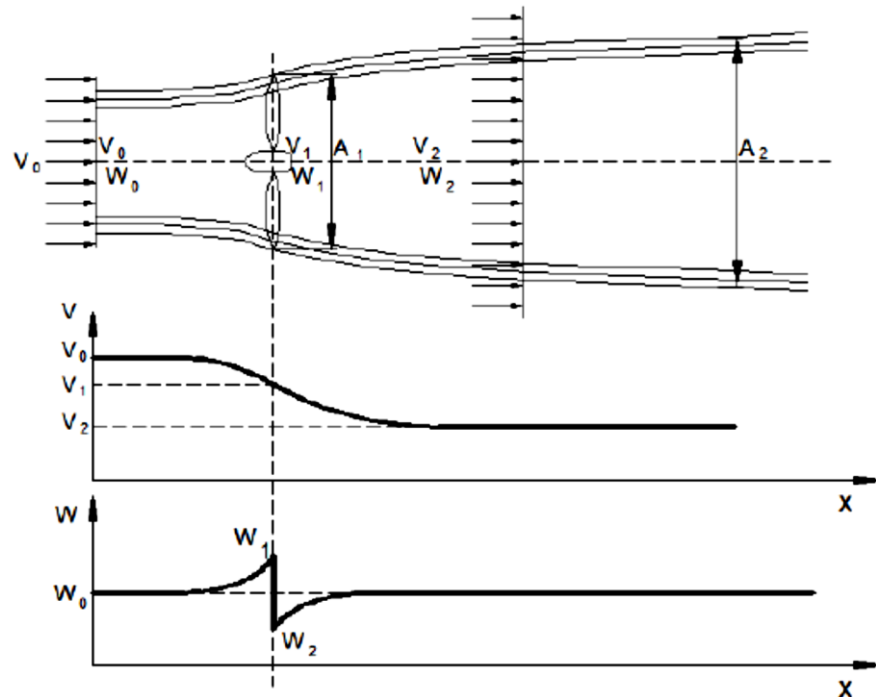


Рисунок 3.1 - Характеристики повітряного потоку, що протікає через вітроколесо

Потік вітру в поперечному перерізі A_1 має кінетичну енергію, що визначається виразом (3.1).

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

Маса повітря, що протікає через поперечний переріз A_1 зі швидкістю V_0 визначається виразом (3.2).

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

Згідно з класичною теорією потужність вітроколеса P_0 дорівнює енергії вітрового потоку, що проходить через одиницю часу через площу A_1 , що охоплюється вітроколесом (3.3)

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

Відношення секундної роботи, виконаної ідеальним вітроколесом (3.4) до енергії вітру, що протікає через перетин A_1 є ідеальним коефіцієнтом використання енергії вітру ξ (3.5).

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

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

Вираз $2 \cdot \frac{P_0}{A_1 \cdot \rho \cdot V_0^2}$ називається коефіцієнтом навантаження на охоплювану площу, коефіцієнт потужності C_p можна записати у вигляді (3.6).

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

Звідси можна бачити, що максимального значення C_p досягає при значенні 0,59 (3.7).

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0,59. \quad (3.7)$$

Вираз (3.7) називається межею Бетца, який був досліджений у 1919 році.

Слід зазначити, що класична теорія не розглядає поведінку повітряного потоку після проходження ним перетину A_2 і не дозволяє визначити осьових координат перерізів A_0 і A_2 щодо A_1 , так само, як і перерізу за колесом, в якому тиск і швидкість збуреного потоку стають рівними початковим значенням.

Використовуючи класичну теорію ідеального вітряка, розглянемо модель вітроустановки із двома вітроколесами. Як відомо, відбір потужності від вітрового потоку відбувається під впливом його на вітроколесо. Повна потужність одного вітроколеса визначається за формулою (3.8).

$$P_1 = \frac{\rho \cdot A_1 \cdot V_0^3 \cdot C_{P_1}}{2} \quad (3.8)$$

На рис. 3.2 представлена модель взаємодії однороторної вітроустановки з повітряним потоком. При цьому використовується класична модель ідеального вітроколеса з усіма обмеженнями і припущеннями.

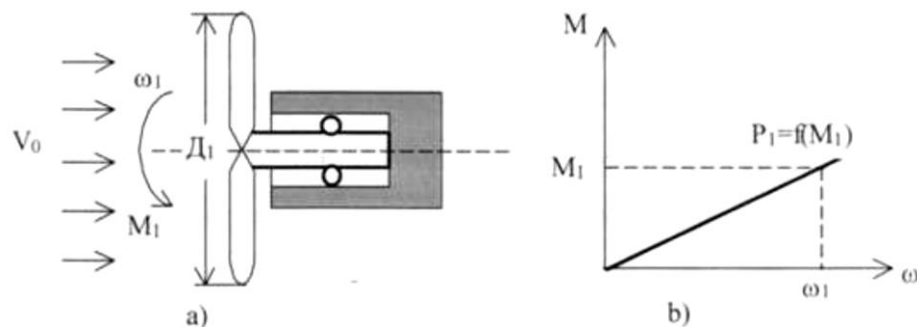


Рисунок 3.2 - Взаємодія першого вітроколеса вітроустановки з повітряним потоком: а) модель взаємодії вітроколеса з повітряним потоком; б) енергетична (потужнісна) характеристика

Тепер представимо потік вітру після проходження першого ідеального вітроколеса, що який на друге ідеальне вітроколесо зі швидкістю V_2 у перетині A_2 . При зустрічі цього ламінарного вітрового потоку з другим вітроколесом на (рис.3.3) за рахунок підпору тиск в потоці зростає від W_2 до W_3 і після проходження через переріз, в якому знаходиться колесо, різко падає до W_4 .

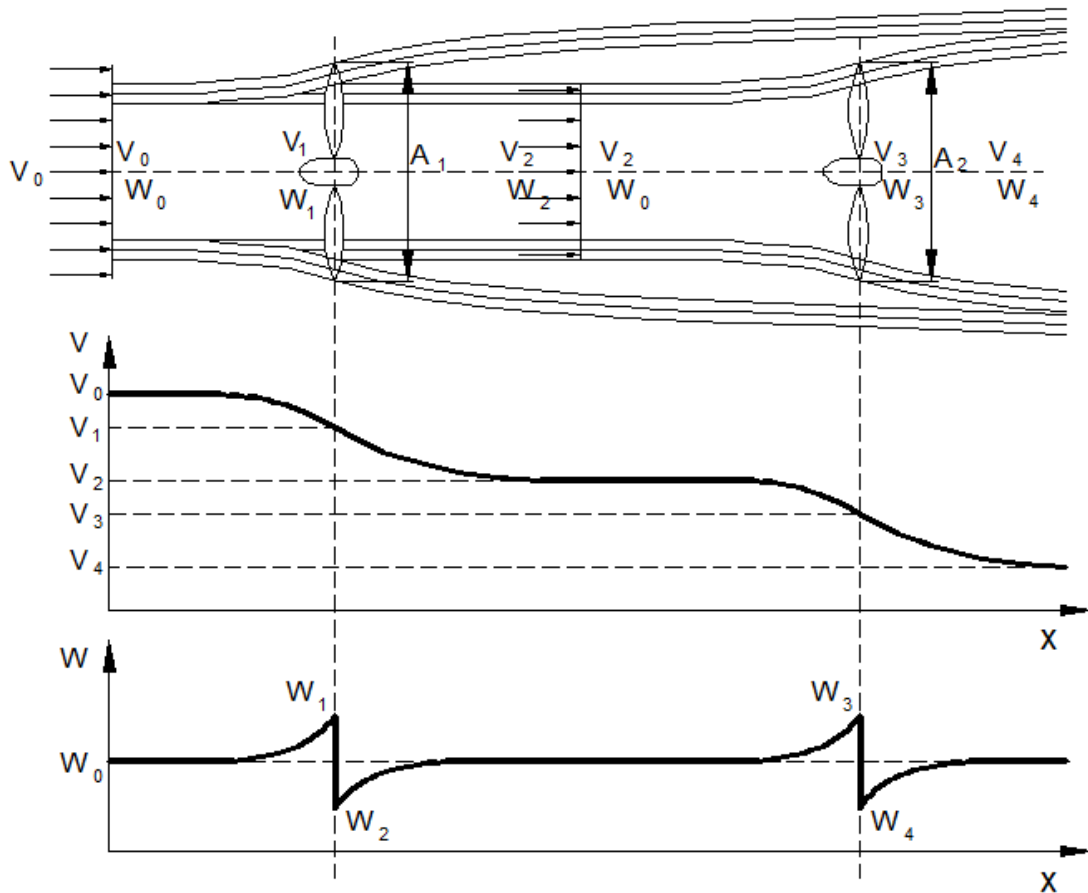


Рисунок 3.3 Взаємодія повітряного потоку з двома вітровими колесами

Розрідження, що утворилося, у міру віддалення від вітроколеса асимптотично наближається до нуля. Швидкість потоку при наближенні до другого вітроколеса знижується від V_2 до V_3 і після проходження перерізу A_2 досягає мінімального значення V_4 .

Потужна характеристика другого вітроколеса показана на рис. 3.4 а. Таким чином, потужність ВЕУ є функцією параметрів p, A, V, C_P (3.9).

$$P = f(p, A, V, C_P). \quad (3.9)$$

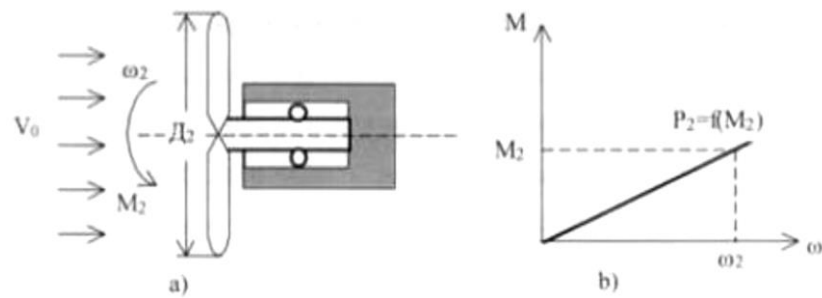


Рисунок 3.4 - Взаємодія другого вітроколеса з повітряним потоком: а) модель взаємодії вітроколеса з повітряним потоком; б) енергетична (потужнісна) характеристика

Припустимо, що два вітроколеса працюють одночасно на один генератор, тоді має відбуватися сумарне відносне збільшення швидкості. Збільшення потужності вітроустановки досягається за рахунок збільшення моменту M та сумарної кутової швидкості ω обох вітроколес.

При

$$\sum M = M_1 + M_2. \quad (3.10)$$

Тоді

$$\sum \omega = I\omega_1 + I\omega_2. \quad (3.11)$$

Тоді сумарна потужність дорівнює (3.12).

$$\sum P = P_1 + P_2 = \rho \cdot V_0 \cdot \frac{A_1 - A_2 \frac{V_1}{V_2}}{2}. \quad (3.12)$$

Спільна робота обох вітроколес показана на рис.3.5 а, а розрахункова модель двомоторної вітроустановки на рис. 3.5 б. Тут V_0 – швидкість вітрового потоку, що набігає на перше вітроколесо, V_2 – швидкість вітрового потоку, що діє на друге вітроколесо.

Розрахункова схема (рис.3.5) показує, що завдання визначення параметрів вітроустановки з двома вітроколесами може мати різні рішення: перше рішення у випадку, коли друге вітроколесо встановлено на відрізьку $A_1 - A_2$ (швидкість

поток при цьому $V_1 > V > V_2$), друге – коли вітроколесо встановлено за перетином A_2 , але в межах збуреного потоку ($V_0 \div V_2$) і, нарешті, коли друге вітроколесо знаходиться за межами збурень ($V \div V_0$). Розглядатимемо два випадки, коли швидкість потоку в перерізі другого вітроколеса максимальна і мінімальна.

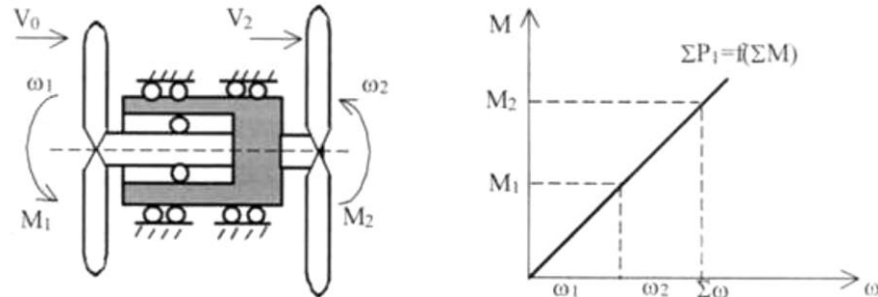


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема двороторної вітроенергетичної установки: а) розрахункова схема двороторної вітроустановки; б) енергетична (потужнісна) характеристика

Варіант компонування вітроустановки, друге вітроколесо якої знаходиться за межами збурень, викликаних першим вітроколесом, є найприйнятнішим на практиці у зв'язку з великим осьовим розміром установки та необхідністю використання довгих валів. Зокрема, практичні дані, наведені в [15], показують, що довжина збуреної області за вітроколесом може досягати шести-дванадцяти діаметрів колеса.

У цьому випадку визначаємо потужність вітродвигуна з двома вітроколесами:

$$P = P_1 + P_2 = C'_P \cdot P'_0 + C''_P \cdot P''_0, \quad (3.13)$$

де P_1 та P_2 – потужності першого та другого ВК відповідно;

C'_P і C''_P – коефіцієнти потужності незбуреного потоку, що набігає, на перше та друге ВК;

P'_0 і P''_0 – потужності незбуреного потоку, що набігає, на перше і друге ВК.

Вважаючи, що два коефіцієнти потужності досягають максимального значення $C_p = C'_p = C''_p = \frac{16}{27}$, знайдемо найбільше теоретичне значення потужності вітроустановки, що дорівнює подвоєній максимальній потужності одиночного вітроколеса:

$$P_{\max} \approx 1,185 \cdot P'_0. \quad (3.14)$$

Запишемо сумарну потужність, у разі коли друге вітроколесо розміщено в перерізі A_2 , сумарна потужність може бути записана наступним чином:

$$P = P_1 + P_2 = \left(\frac{\rho \cdot A_1 \cdot V_0^3}{2} \right) \cdot C'_p + \left(\frac{\rho \cdot A_2 \cdot V_2^3}{2} \right) \cdot C''_p. \quad (3.15)$$

Відповідно V_2 це швидкість потоку, що набігає на друге вітроколесо.

3.2 Регулятор потужності для ВЕУ з двома вітроколесами

Розробка електронного регулятора потужності вітроенергетичної установки, що не має баластного опору, має наступні особливості: підтримання максимального коефіцієнта потужності C_p регулюванням потужності ВЕУ в діапазоні частот обертання ротора в певному діапазоні; обмеження частоти обертання ротора на номінальній (максимальній) частоті обертання з допомогою аеродинамічних регуляторів; відсутність баластного навантаження.

Регулятор може бути побудований на основі сучасних електронних компонентів: імпульсного підвищуючого перетворювача, понижуючого імпульсного перетворювача, системи управління кутом нахилу вітроколеса. Завданням розробки та оптимізації є зниження втрат при перетворенні та максимально повне використання енергії вітру.

Критерієм оптимальності при розробці алгоритму роботи регулятора є максимум вихідної потужності на основі регулювання параметрів виходу з відстеженням потужності ротора. Регулювання електричної потужності ВЕУ здійснюється за допомогою вибору оптимальних робочих режимів на основі методу, що складається з наступних паралельно виконуваних дій: вимірювання зовнішніх параметрів (наявної потужності, потужності навантаження, струму заряду акумуляторної батареї, частоти струму і напруги у фазі генератора, кута нахилу, сили вітру та ін); визначення виходу параметрів за межі безпечних режимів та відключення генератора з переведенням ВЕУ до режиму захисту; забезпечення заряду акумулятора в режимі постійної напруги з обмеженням струму заряду за умови наявності достатньої потужності, що генерується, з запобіганням перезаряду акумулятора.

3.3 Імітаційна модель ВЕУ

Для дослідження ефективності вітроенергетичної установки з двома вітроколесами на одному валу створимо модель ВЕУ у програмі Matlab, заклавши туди описані у попередньому розділі закономірності. Врахуємо також, що установка має кілька режимів роботи та для різних режимів використовуються різні системи керування.

Розглянемо режим роботи ВЕУ, при якому необхідно підтримувати потужність, що виробляється. У даному режимі найчастіше використовується система управління кутом нахилу лопатей вітроколес ВЕУ. Загальні принципи проектування такої системи управління, а також результат моделювання ВЕУ із двома ВК будуть розглянуті нижче. Загальна структура ВЕУ показана на рис.3.6.

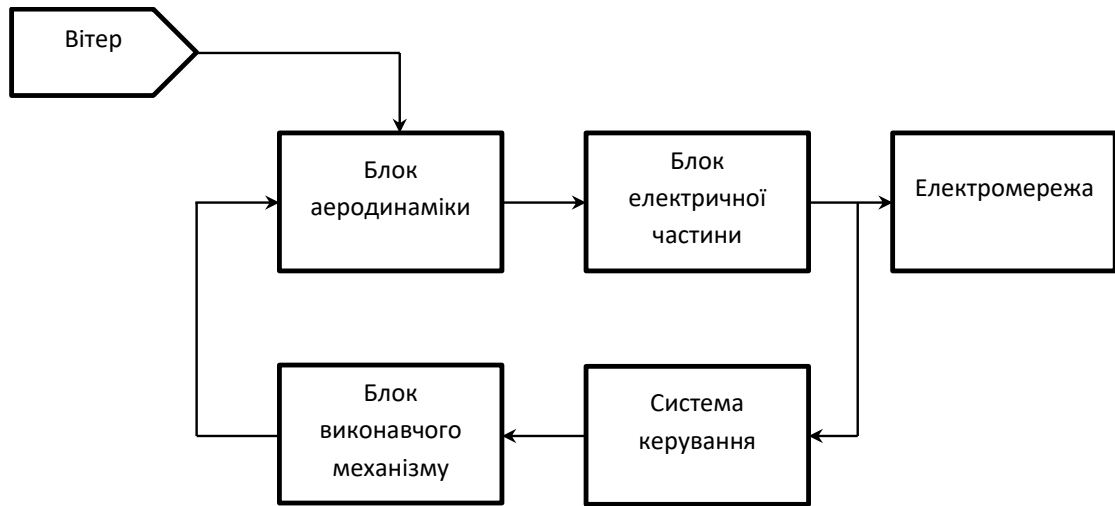


Рисунок 3.6 – Структура моделі ВЕУ

Блок аеродинаміки імітує роботу двох вітроколес, закріплених на одному валу. Модель першого вітроколеса у програмі Matlab представлена на рис. 3.7, а другого на рис. 3.8.

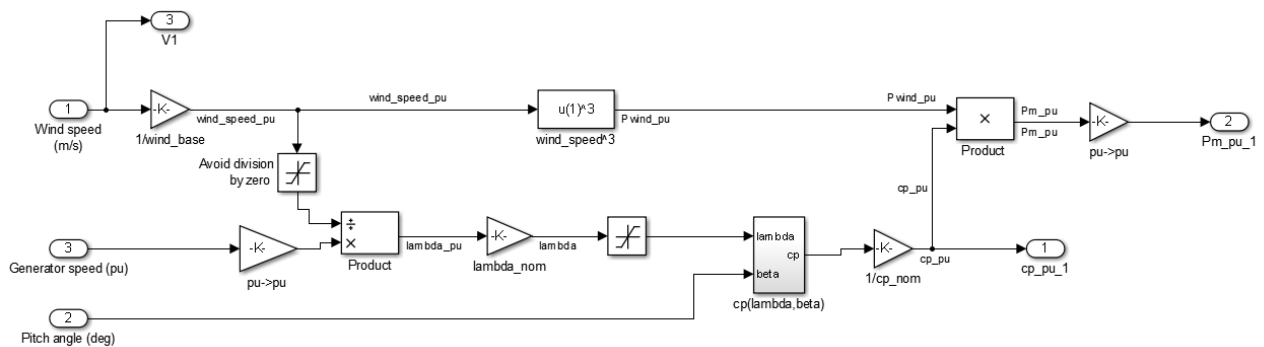


Рисунок 3.7 – Модель у Matlab першого вітроколеса

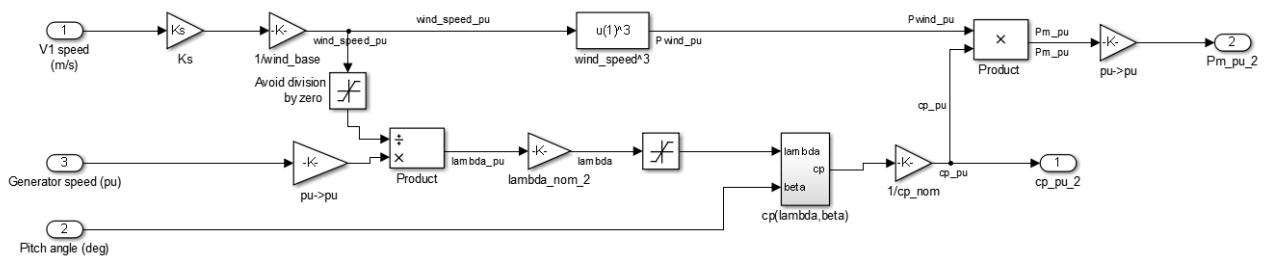


Рисунок 3.8 – Модель у Matlab другого вітроколеса

Зазначимо, що хоча візуально моделі здаються однаковими, вони реалізують різні формули для обчислення коефіцієнтів потужності для першого і другого вітроколеса залежно від їх діаметрів.

Модель обчислення коефіцієнта потужності у програмі Matlab представлена на рис. 3.9, а модель блоку обчислення загального моменту, що створюється, і механічної потужності вітротурбіни в середовищі Matlab — на рис. 3.10.

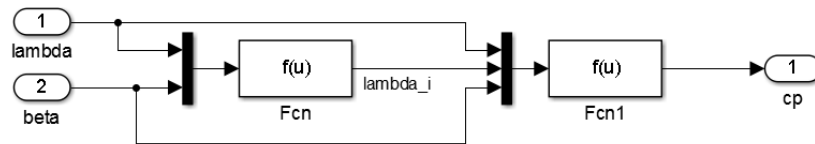


Рисунок 3.9 – Модель Matlab обчислення коефіцієнта потужності

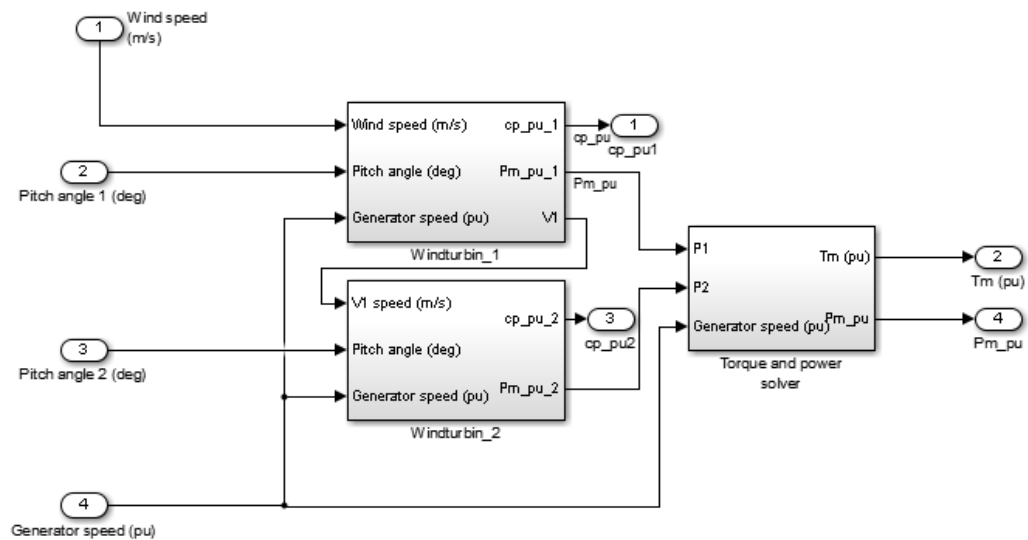


Рисунок 3.10 – Модель блоку обчислення загального моменту, що створюється, і механічної потужності вітротурбіни

Блок електричної частини імітує роботу силової електричної частини та складається з наступних пристроїв:

- 1) модуль синхронного генератора з постійними магнітами;
- 2) модуль пристрою, що перетворює змінну напругу в постійну;
- 3) блок кінцевого споживача;
- 4) модуль обчислення виробленої електричної потужності;

Модель блоку електричної частини ВЕУ у програмі Matlab представлена на рис. 3.11.

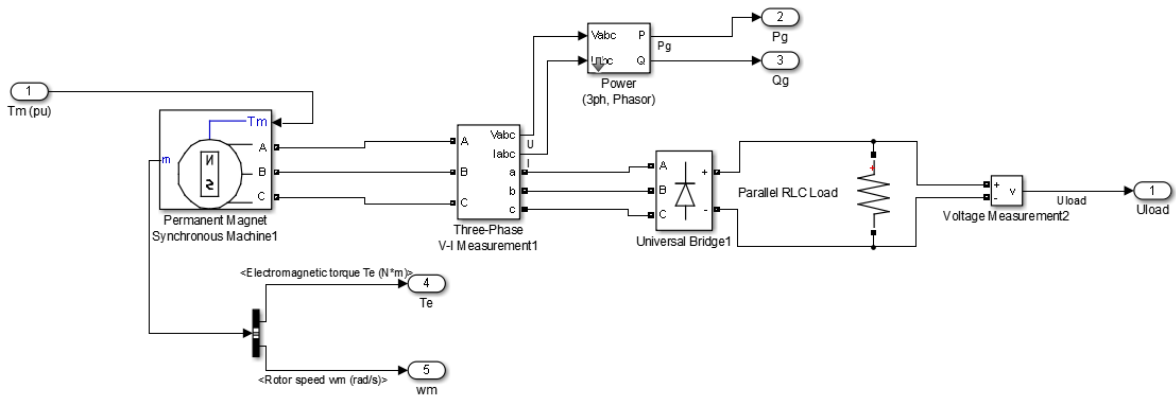


Рисунок 3.11 - Модель у програмі Matlab блоку електричної частини ВЕУ

Модель блоку виконавчого механізму в програмі Matlab представлена на рис. 3.12, а загальна система двох сервоприводів з вітротурбіною на рис. 3.13.

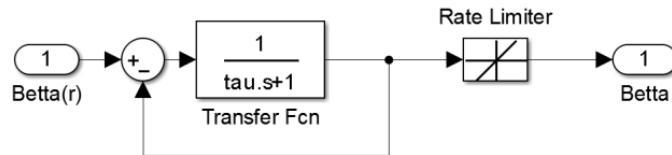


Рисунок 3.12 - Модель у програмі Matlab блоку виконавчого механізму

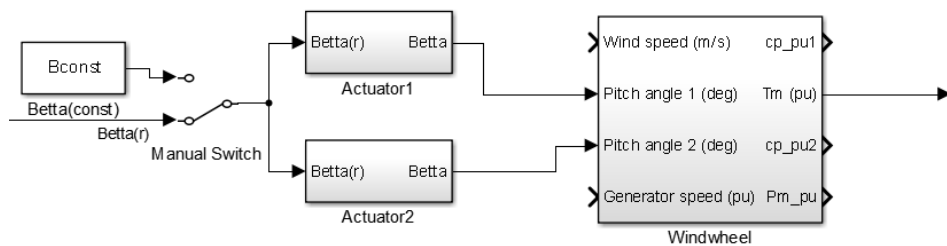


Рисунок 3.13 – Система двох сервоприводів з вітротурбіною.

Результуюча модель вітроенергетичної установки представлена на рис.3.14.

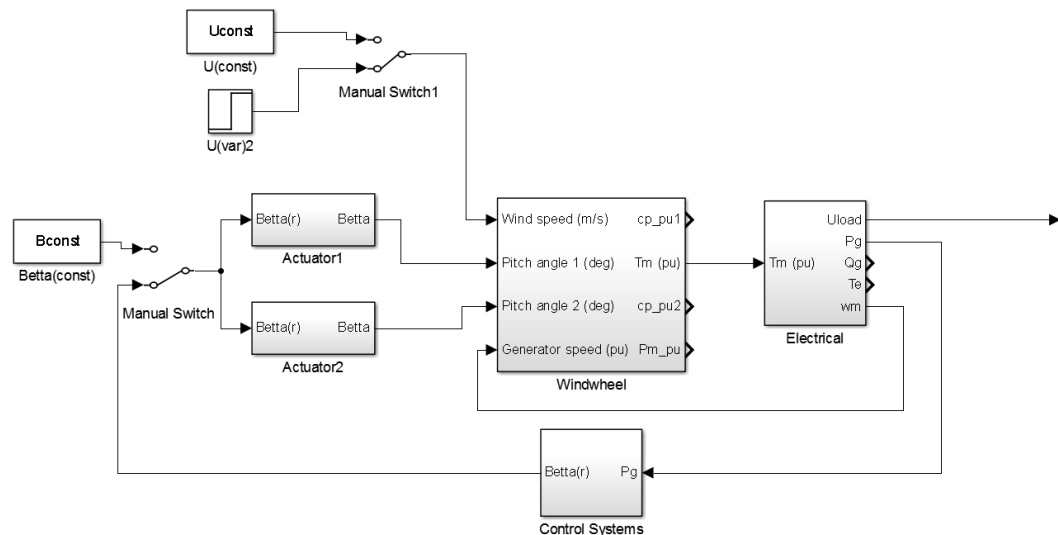


Рисунок 3.14 – Модель ВЕУ у програмі Matlab

Імітація різних режимів роботи реалізується за допомогою двох перемикачів: один для зміни режиму швидкості вітру (змінна та постійна), інший - перемикач кута нахилу з постійного на той що змінюється (керованого).

3.4 Принцип управління кутом нахилу лопаті ВЕУ

У попередніх розділах було розглянуто принципи управління ВЕУ. Показано, що ВЕУ розділена на три зони, в яких цілі управління концептуально відрізняються. У зоні 1 (див. рис. 2.5) завдання управління зводиться до того, щоб зловити мінімальний вітер, здатний подолати силу опору турбіни. Зону 2 можна назвати ділянкою розгону турбіни до робочих значень потужності ВЕУ. У цій зоні завдання управління зводиться до максимального використання сили вітру для вироблення електричної енергії. Іншими словами, ця ділянка вимагає оптимального управління виробленням потужності ВЕУ. Для цих цілей використовуються різні сучасні методи оптимального управління, такі як принцип максимуму Понтрягіна, принцип оптимальності (динамічне програмування Беллмана), метод Гамільтона-Якобі класичного варіаційного обчислення тощо.

У третій зоні швидкість обертання ротора порівняно з попередньою ділянкою залишається незмінною. Що ж до зміни кута нахилу, то в цьому випадку процес має зворотний характер, тобто, до цього кут нахилу розташовувався в оптимальному положенні ($\beta=0^\circ$), а в третій зоні відбувається його зміна (рис. 3.15). На рис. 3.16 показано приклад зміни кута нахилу лопаті при змінній швидкості вітру.



Рисунок 3.15 – Зони роботи ВЕУ та принцип зміни в них кута нахилу

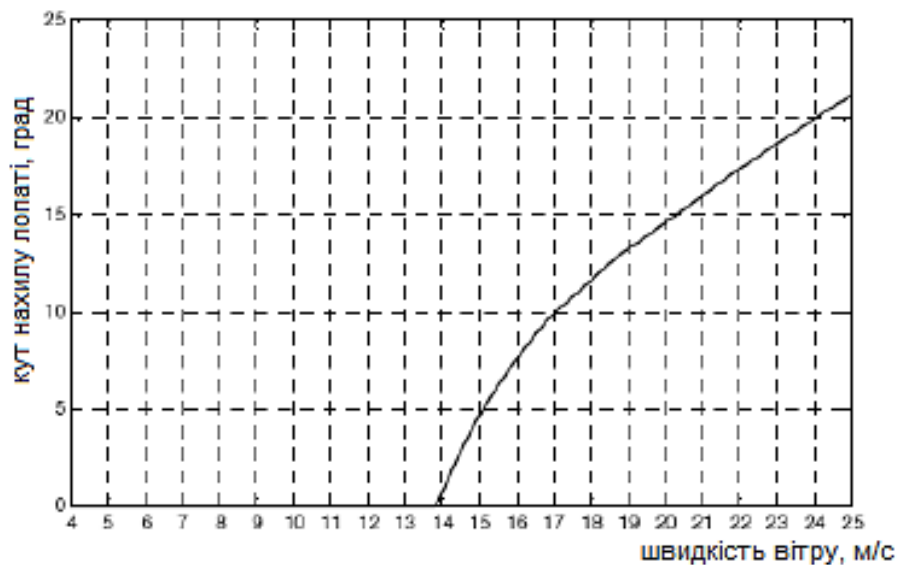


Рисунок 3.16 – Приклад зміни кута нахилу лопаті при змінній швидкості вітру

Отже, цілі управління кутом нахилу:

1. Оптимізація вихідної потужності вітрової турбіни. В області вітрів нижчій за номінальне значення (зона 2), кут повинен зберігати постійну

оптимальну величину (як правило, $\beta=0^\circ$), щоб турбіна видавала максимально можливу потужність;

2. Обмеження вихідної потужності турбіни є номінальним. При швидкості вітру вище номінальної кут нахилу регулюється за певним законом, впливаючи на аеродинамічну потужність та навантаження ротора;

3. Обмеження руйнівних сил, що впливають на конструкцію турбіни. Система управління має сильний вплив на навантаження, що випробовуються турбіною. При проектуванні системи управління необхідно брати це до уваги, щоб бути впевненим, що вона не призведе до надмірних навантажень.

Зазвичай зміни кута нахилу користуються стандартними ПІ- і ПІД-законами регулювання. Розглянемо побудову таких контролерів для конструкції ВЕУ із двома вітроколесами.

Дана установка має два виконавчі механізми із загальною системою управління, що отримують керуючу дію від системи управління потужністю вітрогенератора.

3.5 Імітаційна модель контролера управління кутом нахилу

Основне завдання управління, полягає у регулюванні потужності ВЕУ (рис. 3.17). Таким чином, помилка між значеннями виміряної та заданою потужністю генератора передається на ПІ-регулятор швидкості (рис. 3.18). Вихід з ПІ-регулятора використовується як опорний сигнал для виконавчого механізму, в даному випадку сервоприводу. Щоб отримати реалістичний результат роботи, в контур введено обмеження – максимальна швидкість зміни кута нахилу (± 10 град/с) та максимальне положення кута (від 0 до 30 град). Таким чином, фактичне положення кута β порівнюється із заданим β_d і потім їх помилка коригується сервоприводом.



Рисунок 3.17 – Регулювання потужності турбіни

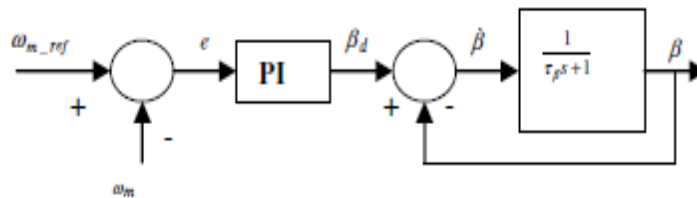


Рисунок 3.18 – Структурна схема ПІ-контролера

Загальний коефіцієнт посилення контуру керування за швидкістю K_{system} можна виразити як добуток коефіцієнта ПІ-регулятора на аеродинамічну чутливість $\frac{dP}{d\theta}$:

$$K_{system} = K_{PI} \frac{dP}{d\theta} = K_{basic} \left[\frac{dP}{d\theta} \right]^{-1} \frac{dP}{d\theta}. \quad (3.16)$$

Аеродинамічна чутливість $\frac{dP}{d\theta}$ системи залежить від умов експлуатації (задане значення потужності, швидкості вітру чи кута нахилу). Чим більша аеродинамічна чутливість системи (більший кут θ / велика швидкість вітру), тим меншим має бути коефіцієнт посилення регулятора і навпаки.

Таким чином, сумарний коефіцієнт посилення системи K_{system} підтримується на постійному рівні. Тобто, зміни коефіцієнту ПІ-регулятора K_{PI}

відбуваються таким чином, щоб він протидіяв змінам аеродинамічної чутливості $\frac{dP}{d\theta}$. Цей сенс закладено у зворотній функції чутливості $\left[\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1}$:

$$K_{PI} = K_{basic} \left[\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1} \quad (3.17)$$

де K_{basic} є розробленим незмінним пропорційним коефіцієнтом ПІ – регулятора.

Рис. 3.19 графічно відображає залежність аеродинамічної чутливості від зміни кута нахилу.

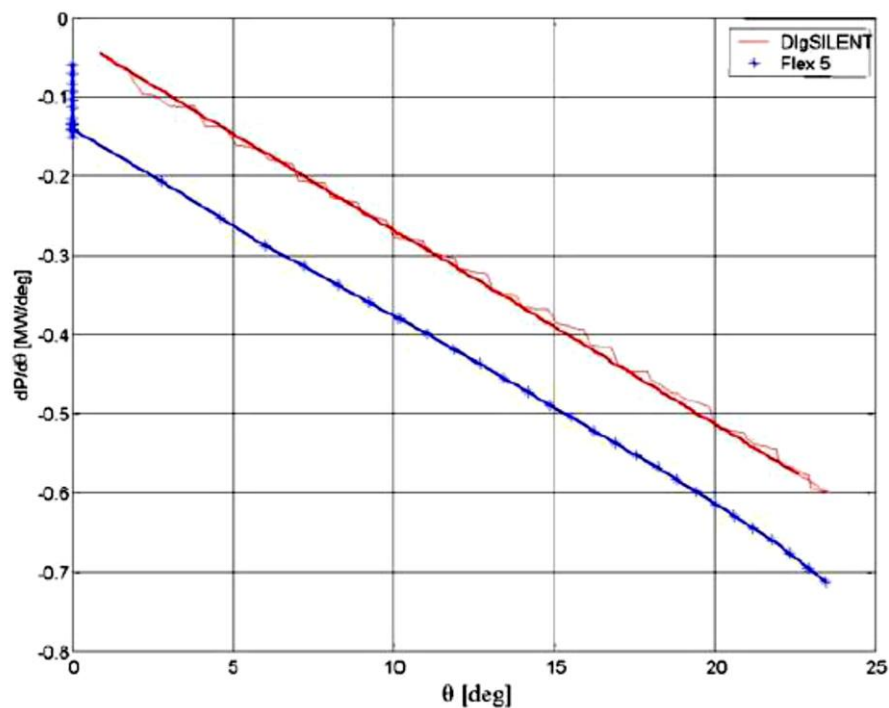


Рисунок 3.19 – Залежність аеродинамічної чутливості від зміни кута нахилу

Припустимо, що динаміка поведінки системи може бути апроксимована поведінкою системи другого порядку. Тоді для параметричного аналізу ПІ-контролера може бути використаний метод аналізу перехідних процесів коливальної ланки.

$$\frac{K}{Is^2 + D_s + K} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2}. \quad (3.18)$$

У формулі (3.18) буквами I , K та D позначені відповідно інерція системи, пружність та демпфування. Тоді власна частота ω_0 та відносний коефіцієнт демпфування ξ можуть бути обчислені як

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{I}}, \quad (3.19)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{D}{I\omega_0} = \frac{D}{2K} \omega_0. \quad (3.20)$$

У літературі зустрічається два методи параметризації ПІ-контролера. Розглянемо перший варіант:

$$y = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) u. \quad (3.21)$$

Тут пропорційний та інтегральний коефіцієнти рівні:

$$K_i = \frac{K\Omega_0}{N_{gear} \frac{30}{\pi}} \left[-\frac{dP}{d\theta} \right]^{-1}, \quad (3.22)$$

$$K_p \cong 2\xi \frac{K_i}{\omega_0}. \quad (3.23)$$

У цьому способі параметризації інтегральний коефіцієнт K_i пропорційний жорсткості системи K , в той час як коефіцієнт пропорційної частини знаходиться в прямій залежності від демпфування $D = 2\xi \frac{K}{\omega_0}$. Звернемо увагу, що коли використовується цей спосіб параметризації, обидва параметри

контролера містять коефіцієнт посилення, що змінюється програмно за зворотною функцією аеродинамічної чутливості $\left[-\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1}$.

Розглянемо другий спосіб параметризації ПІ-контролера:

$$y = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) u. \quad (3.23)$$

Тут пропорційний та інтегральний коефіцієнт можуть бути обчислені як:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (3.24)$$

$$K_p \cong \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{K\Omega_0}{N_{gear} \frac{30}{\pi}} \left[-\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1} \quad (3.25)$$

У системах управління найчастіше використовується саме цей спосіб параметризації ПІ-контролера. Звернемо увагу, що тут лише один параметр налаштування – коефіцієнт пропорційної частини K_n , який прямо пропорційний зворотній аеродинамічній функції чутливості $\left[-\frac{dP}{d\theta}\right]^{-1}$, але в той же час може бути безпосередньо визначеним постійною часу інтегральної частини, яка визначається параметрами, що розробляються (частотою власних коливань ω_0 і відносним коефіцієнтом демпфування ξ).

Для дослідження роботи моделі ВЕУ з двома роторами створимо у програмі Matlab два ПІ- та ПІД-регулятори (рис. 3.20 та 3.21).

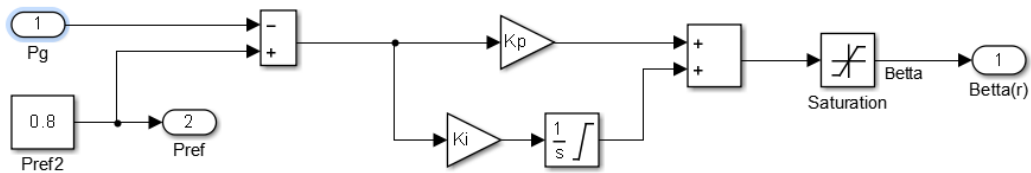


Рисунок 3.20 – ПІ регулятор у програмі Matlab

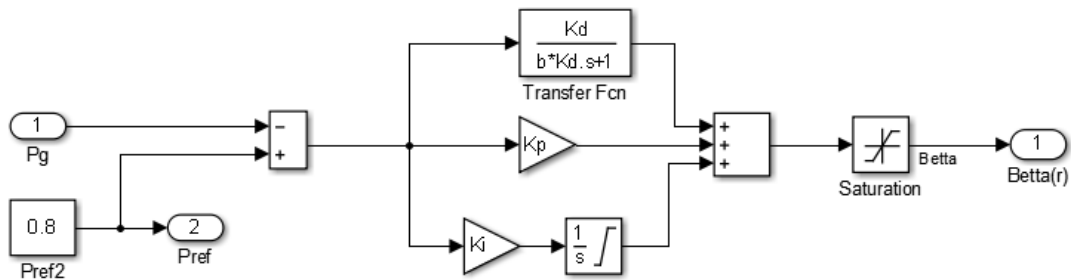


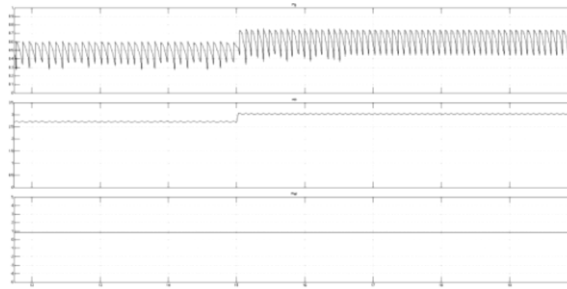
Рисунок 3.21 – ПІД регулятора у програмі Matlab.

Для дослідження роботи моделі ВЕУ з двома роторами створимо в програмі Matlab два ПІ- та ПІД-регулятори.

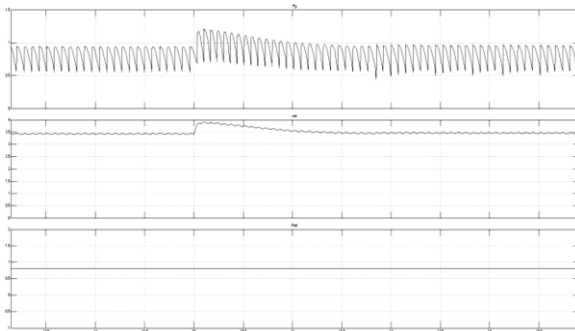
3.6 Дослідження ВЕУ із двома вітроколесами

Дослідження роботи системи управління моделі ВЕУ з двома роторами проведемо в такий спосіб. Припустимо, що модель працює у режимі номінальної потужності. У цьому режимі при зміні вітру система управління повинна утримувати роботу ВЕУ на заданій (номінальній) величині. Підберемо коефіцієнти регуляторів та подивимося роботу моделі.

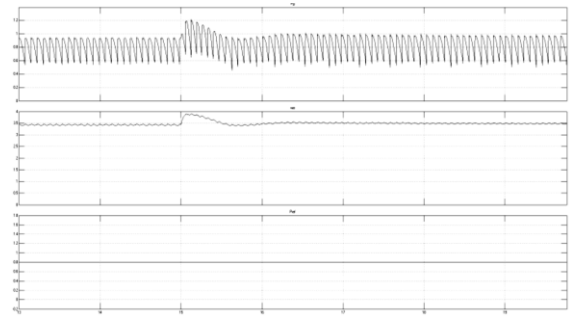
На рис. 3.22 видно результати роботи установки при ступінчастому підвищенні вітру.



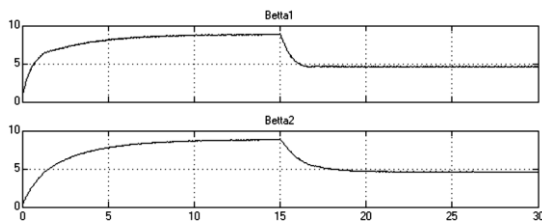
а) без системи управління



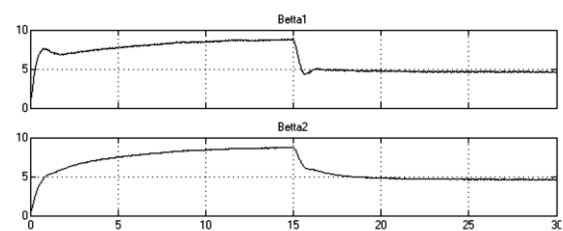
б) із системою управління ПІ-регулятором



в) із системою управління ПІД-регулятором



г) зміна кута нахилу першого ВК



д) зміна кута нахилу другого ВК

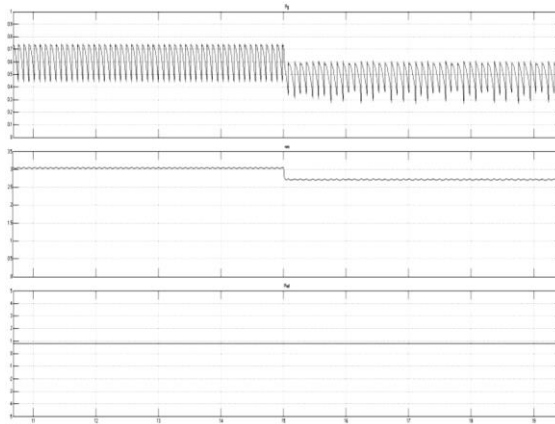
Рисунок 3.22 – Результати моделювання роботи ВЕУ з двома ВК у разі підвищення вітру

Без системи управління, із системою управління ПІ-регулятором, із системою управління ПІД-регулятором, а також зміна кутів нахилу першого та другого ВК. За даними графіками можна зробити висновок, що система управління на основі ПІ-і ПІД-законів управління справляється зі своїм завданням і може утримати роботу енергоустановки на номінальній величині.

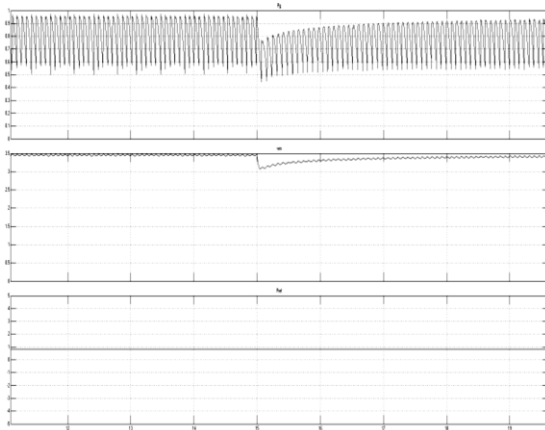
На рис. 3.23 видно результати роботи установки при ступінчастому зменшенні вітру.

Без системи управління, із системою управління ПІ-регулятором, із системою управління ПІД-регулятором, а також зміна кутів нахилу першого та

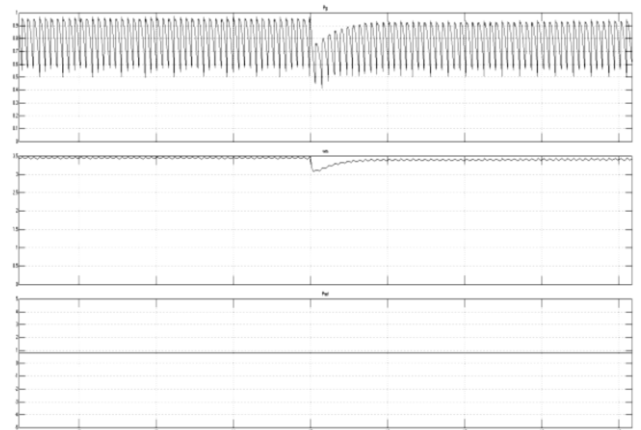
другого ВК. За даними графіками можна зробити висновок, що система управління на основі ПІ-і ПІД-законів управління справляється зі своїм завданням і може утримати роботу енергоустановки на номінальній величині.



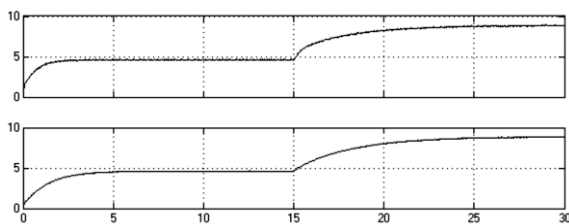
а) без системи управління



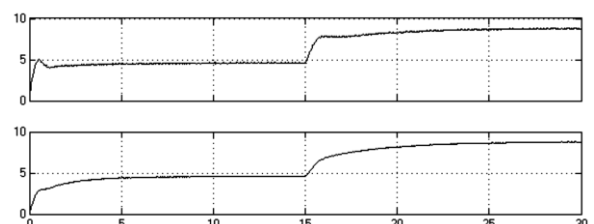
б) із системою управління ПІ-регулятором



в) із системою управління ПІД-регулятором



г) зміна кута нахилу першого ВК



д) зміна кута нахилу другого ВК

Рисунок 3.23 – Результати моделювання роботи ВЕУ із двома ВК при зменшенні вітру

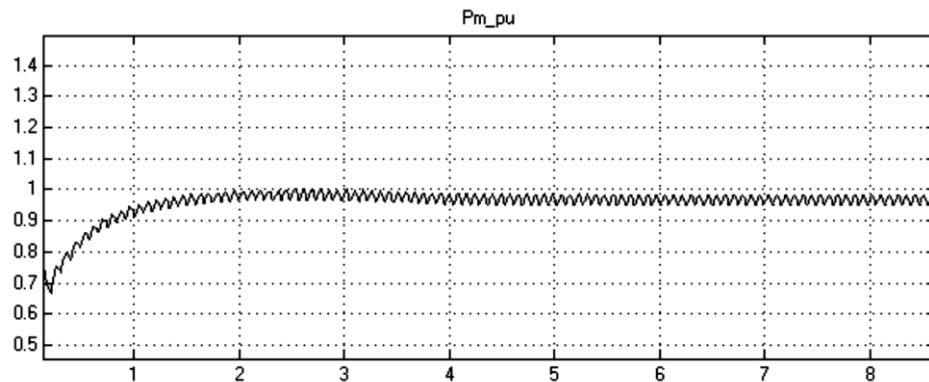
Проведені дослідження свідчать, що система управління з ПІ-регулятором має більш плавний перехідний процес порівняно з ПІД законом управління, при цьому в другому випадку контролер дещо швидше

справляється із завданням відновлення напруги, хоч і з деяким перерегулюванням при різкому збільшенні швидкості вітру. У цілому обидві системи управління регулювання налаштовані і з завданням справляються.

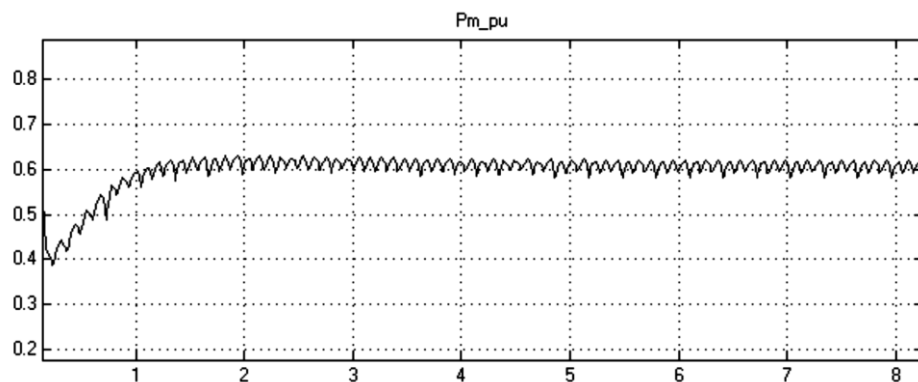
3.7 Дослідження вироблення потужності звичайної ВЕУ з одним вітроколесом та ВЕУ з двома вітроколесами на одному валу

Проведемо аналіз ВЕУ різних виконань. Порівняємо ВЕУ із двома ВК різних радіусів із ВЕУ, що мають одне вітроколесо різних радіусів (малого та великого). Випробування будемо проводити за різних швидкостей вітру: 6 м/с, 10 м/с.

1) При швидкості 6 м/с



а) одне малого діаметру



б) одне великого діаметру

Рисунок 3.24 - Вироблена потужність ВЕУ з одним вітроколесом

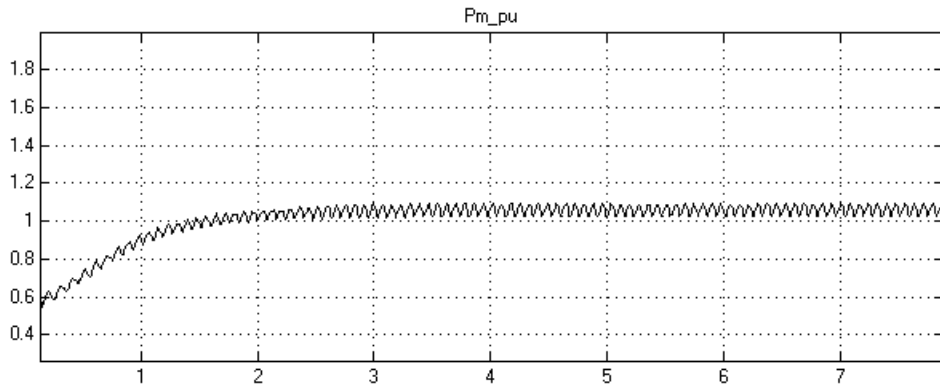
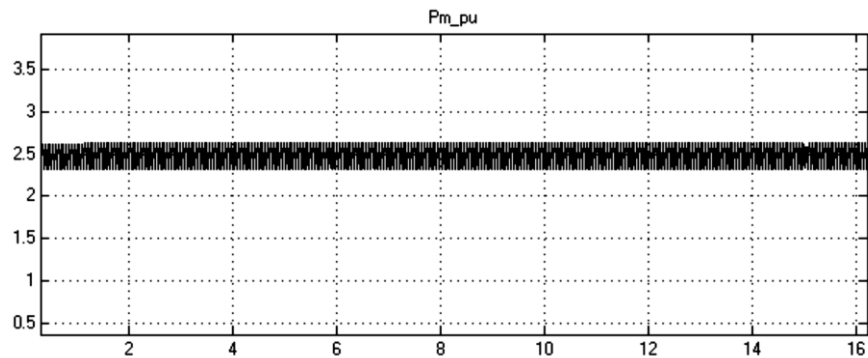


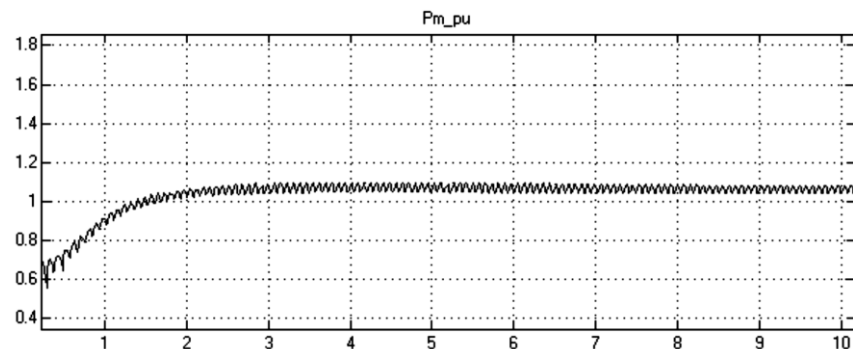
Рисунок 3.25 – Вироблена потужність ВЕУ з двома вітроколесами

При даній швидкості вітру ВЕУ з одним великим ВК виявився б недовантаженим і виробляє мало електроенергії, при цьому ВК з одним малим ВК працював би в нормальному режимі, хоча не на номінальній потужності. З графіка ВЕУ з двома роторами ми бачимо, що установка працює теж у нормальному режимі, але меншою за номінальну. Даний випадок відповідає режиму роботи ВЕУ з двома роторами, при якому швидкість ще менша за номінальну і потужність ще не досягла оптимального максимуму.

2) При швидкості 14 м/с



а) одне малого діаметру



б) одне великого діаметру

Рисунок 3.26 - Вироблена потужність ВЕУ з одним вітроколесом

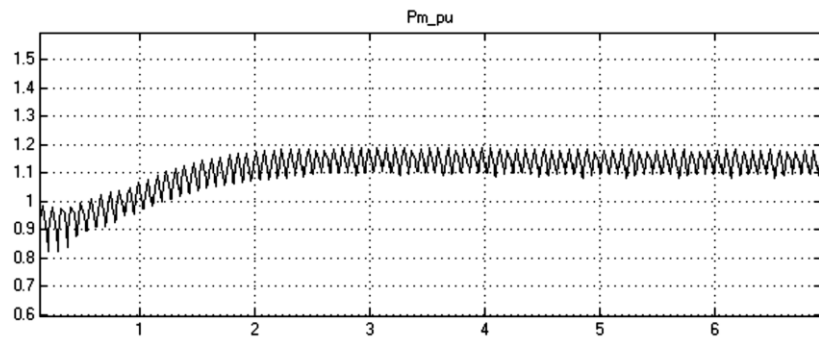
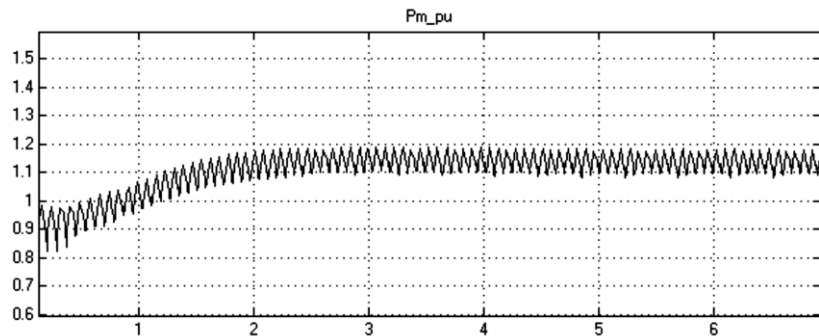


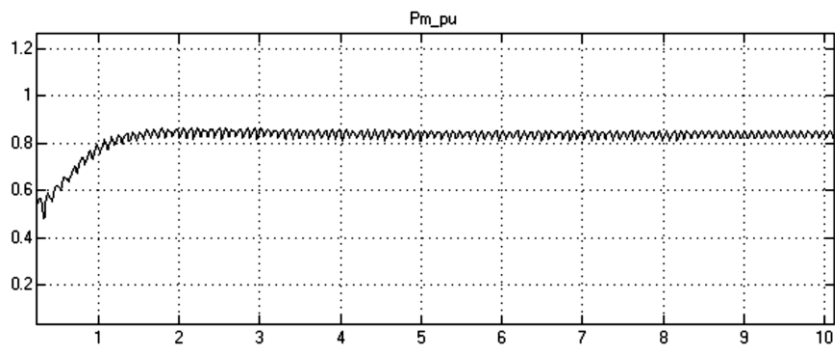
Рисунок 3.27 – Потужність ВЕУ, що виробляється, з двома вітроколесами

При цьому вітрі з графіків видно, що ВЕУ з одним малим ВК працює в аварійному режимі, швидкість для такого радіусу ВК занадто велика. ВЕУ з великим ВК працює у штатному режимі та виробляє номінальну потужність. ВЕУ з двома ВК виробляє ще більше потужності, і дана швидкість для неї є штатною.

3) При швидкості 10 м/с



а) одне малого діаметру



б) одне великого діаметру

Рисунок 3.28 - Вироблена потужність ВЕУ з одним вітроколесом

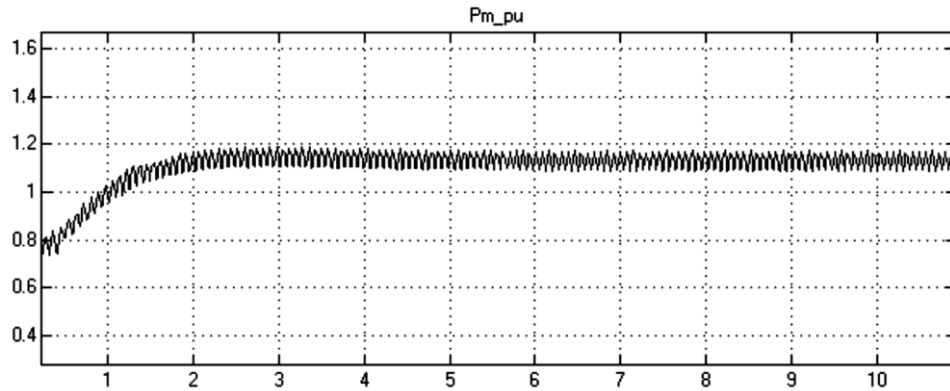


Рисунок 3.29 – Вироблена потужність ВЕУ з двома вітроколесами.

При даній швидкості ВЕУ з одним малим ВК виробляє номінальну потужність, але ВЕУ з великим ВК не довантажено і працює в над оптимальному режимі. З графіка роботи ВЕУ з двома ВЕУ видно, що потужність, що виробляється вища, ніж для інших варіантів ВЕУ, і установка працює в оптимальному режимі.

3.8 Висновки до розділу

1. Моделювання ситуацій з різними швидкостями вітру показує, що ВЕУ з двома ВК поєднує у собі переваги ВК малого радіусу на малих швидкостях та переваги ВК великого радіусу на великих швидкостях, не маючи їх недоліків.

2. При всіх швидкостях вітру ВЕУ з двома ВК виробляла більшу потужність, ніж ВЕУ з одним ВК.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Блискавкозахист енергетичної установки

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою. Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд, накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга — 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок. [10]

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Як зазначено у [10]: «Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у конструкціях, через які проходить струм блискавки. Під вторинними проявами

блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.»

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковідводів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, рельєф місцевості, інтенсивність грозової діяльності. Останній параметр характеризується середньорічною тривалістю гроз у годинах для даної місцевості. Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над захищуваним об'єктом, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавковідводу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавковідводи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавковідводи встановлені окремо та такі, що розташовані на захищуваному об'єкті. Будь-який блискавковідвід складається з

блискавкоприймача (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо сприймає удар блискавки; несучої опори (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки передається в землю; заземлювача, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.[10]

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавковідводу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності.

4.2 Планування заходів цивільного захисту

Відповідно до [11]: «Планування цивільного захисту об'єкта — це розроблення сукупності документів, у яких визначені сили і засоби, порядок і послідовність дій з метою забезпечення захисту населення, виробництва, а також виконання завдань вищих органів, пов'язаних із поданням допомоги населенню інших об'єктів і міст. Ці документи, розроблені з урахуванням реальних можливостей і умов об'єкта, є настановою для організованих дій як з метою підготовки об'єкта до захисту в надзвичайних умовах, так із метою ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (стихійних лих, виробничих аварій і вогнищ воєнних конфліктів). На об'єкті мають бути розроблені два плани: на воєнний та мирний час. План цивільного захисту на воєнний час — це документи, які визначають організацію і порядок переведення об'єкта з мирного на воєнний час і ведення цивільного захисту в початковий період війни. План цивільного захисту на мирний час — це документи, які визначають організацію і порядок виконання заходів цивільного захисту з метою запобігання або зменшення можливих втрат від важких виробничих аварій, катастроф, і стихійних лих, а також ведення рятувальних та інших невідкладних робіт при їх виникненні»

Як вихідні документи, що будуть використані при розробці документів плану цивільного захисту об'єкта, необхідні: директивні документи Президента, Верховної Ради, Уряду України та МНС; витяг із рішення керівника цивільного захисту району про організацію і ведення цивільного захисту на території району, дані про кількість формувань, їх особовий склад, які потрібно створити на даному об'єкті; витяг із плану прийому і розміщення евакуйованого населення; витяг із наряду райвійськкомату на постачання техніки у збройні сили у зв'язку з мобілізацією; окремі розпорядження керівника цивільного захисту району (наряд для виконання спеціальних завдань та ін.); документи, які характеризують господарство і населений пункт.

Об'єкт, що знаходиться на території одного або кількох населених пунктів, є основним об'єктом, який складає єдиний план разом з адміністрацією населеного пункту.

Розробка плану відбувається у три етапи в певній послідовності. Перший етап — підготовчий, протягом якого визначається склад виконавців і затвердження їх, підготовка виконавців до роботи, доведення до них директив, рекомендацій та інших документів, узагальнення й аналіз вихідних даних, необхідних для розробки плану ЦЗ, визначення обсягу робіт і розподіл обов'язків між виконавцями та закріплення відповідальних за розділами плану. Планування евакуації має передбачати виникнення найбільш несприятливих ситуацій під час підготовки і проведення евакуації: відсутність відповідних керівників, транспорту, електрозабезпечення, погані погодні умови, аварія на дорозі, паніка серед людей та ін. Другий етап — практична розробка, оформлення документів. Заходи, які плануються в документах плану, мають бути спрямовані на виконання завдань ЦЗ в надзвичайних ситуаціях. [18]

У документах плану визначають заходи, які потрібно виконати в мирний час, при загрозі виникнення надзвичайних ситуацій, несподіваному нападі противника, стихійних лихах, виробничих аваріях, катастрофах і при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, проведенні рятувальних та інших невідкладних робіт, а також характер і порядок дій формувань, зміст і обсяг

робіт, строки виконання заходів з урахуванням конкретних умов і можливостей даного об'єкта.

Оскільки заходи потребують матеріальних затрат, вони повинні здійснюватися у комплексі з іншими економічними заходами, через що їх необхідно включити в поточний і перспективний план об'єкта, де вони будуть забезпечені коштами.

Третій етап — узгодження розроблених планів із відділом ЦЗ району, з районним агропромисловим управлінням, адміністрацією населеного пункту, службами ЦЗ району, після цього затвердження документів плану ЦЗ. Документи плану ЦЗ підписує керівник — ЦЗ об'єкта, деякі (план евакуації, прийому і розміщення евакуйованого) підписує і начальник ЦЗ голова адміністрації населеного пункту. Зміст плану ЦЗ об'єкту узгоджується з вимогами плану ЦЗ району, що підтверджує начальник відділу з питань цивільного захисту населення району, після чого план ЦЗ затверджує керівник ЦЗ об'єкта.

Після затвердження плану об'єкта організовується вивчення документів усім керівним складом об'єкта.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У енергетиці України є значна потреба в розвитку вітроенергетичних установок для забезпечення її енергонезалежності. Підвищення якості та об'єму вироблюваної електроенергії є основними напрямками досліджень, які зараз проводяться.

2. Розроблено вітроенергетичну установку нового типу та представлено її математичну модель. Ця установка відрізняється від інших тим, що для вироблення електроенергії використовуються два вітроколеса різних діаметрів, розташованих один за одним і які обертаються на одному валу.

3. Для управління вітротурбіною розроблено систему управління, яка побудована на класичних методах управління. Такі системи управління знаходять широке застосування у вітроенергетиці, вони безпечні, ефективні і можуть бути реалізовані на нескладному електронному обладнанні.

4. Аналіз запропонованої моделі вітроенергетичної установки та моделі системи управління виявив, що подібна конструкція вітротурбіни здатна виробляти більшу кількість енергії у розширеному діапазоні швидкостей. Такі конструкції ВЕУ у майбутньому доцільно використовувати у регіонах України, у яких є сильна мінливість погодних умов та сили вітру.

5. Використана у ВЕУ система управління забезпечує стійку роботу на номінальній потужності навіть за різких підвищеннях чи зниженнях швидкостей вітру. Це добре позначається на якості енергії, яка виробляється і може бути використана локальними (місцевими) споживачами або віддана в загальну енергомережу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2022. – С.

2. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern. : TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19..

3. Карпишин Р. А. Застосування гібридних вітро-сонячних електростанцій для електрозабезпечення автономних споживачів / Р. А. Карпишин, Н. В. Бабанін, Наконечний М.С. // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 24-25 листопада 2021 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2021. — Том II. — С. 33.

4. Anca D. Hansen et al. Overall control strategy of variable speed doubly-fed induction generator wind turbine: Nordic wind power conference – Chalmers university of technology, march 1– 2, 2004. – p.1– 7.

5. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій“ присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.

6. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана

Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204.

7. Akhmatov V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power/ Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Denmark, 2003.

8. Wind Energy [Электронный ресурс]. – The Facts, March 2009. – Режим доступа: <http://www.wind-energy-the-facts.org/> .

9. Hansen M.H. Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine: Technical Report RISO–R–1500/ M.H.Hansen [et al.]// RISO National Laboratory. – Denmark, Roskilde, 2005. – p.156.

10. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

11. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с.