

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Система оптимального керування електро-
механічною системою вітроенергетичної установки
в умовах поривчастого характеру вітряного потоку

Виконав: студент II курсу, групи 8.1710

спеціальності 171 «Електроніка»

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Електроніка

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.ч. доц. Алексієвський Д.Т.

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

Рецензент Заступник директора Шершов С.А.

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

Запоріжжя
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і назва)
Освітня програма Електроніка
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Критська Т.В.
“ ” 2021 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Савицу Миколи Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Система оптимального керування електромеханічною системою вітровою електричною установкаю в умовах поривчастого харчиду вітряного потоку.

керівник роботи Алексієвський Дмитро Геннадійович д.т.н., доцент.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від “30” 06 2021 року № 974-С

2 Строк подання студентом роботи 06.12.

3 Вихідні дані до роботи Тип електромеханічної установки - керування; напруга мережі - 220В (фазна); поривчастість вітряного потоку - 3-5 м/с; індуктивний діаметр в колі постійного струму 0,01 Гн.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз проблеми ефективного відбору потужності вітровою електричною установкаю із змінною швидкістю обертання; 2. Вибір оптимальної моделі електромеханічної системи вітровою електричною установкаю із змінною швидкістю обертання; 3. Дослідження динамічних характеристик вітровою електричною установкаю зі змінною швидкістю обертання; 4. Виконання розгін; 5. Охорона праці та техніка безпеки.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Електромеханічна система вітровою електричною установкаю зі змінною швидкістю обертання.

ЕС М.404-20.00.00.00.00.00.01; Підмодель Вітряної турбіни, ЕС М.404-20.00.00.00.00.02;
 Підмодель некерівничої Вітряної турбіни, ЕС М.404-20.00.00.00.00.03; Результат мед.
 техніки генератора, ЕС М.404-20.00.00.00.00.04; Результат мед. швидкості генератора,
 ЕС М.404-20.00.00.00.00.05; Результат мед. потужності генератора, ЕС М.404-20.00.00.00.00.06;
 Сітковий план, ЕС М.404-20.00.00.00.00.07; Схема заземлення,
 ЕС М.404-20.00.00.00.00.08;

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Алексієвський Д.І. уст. н. прог.		
2	— / —		
3	— / —		
4	— / —		
5	— / —		

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка розділа 1		
2	Розробка розділу 2		
3	Розробка розділу 3		
4	Розробка розділу 4		
5	Розробка розділу 5		
6	Розробка загальної частини		
7	Підготовка до захисту		

Студент Су- Савін М.В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проєкту) Алексієвський Д.І.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено
 Нормоконтролер Гуринев К.О.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

102 Сторінки, 37 рисунків, 8 таблиць, 23 джерел.

Савін Микола Володимирович. Система оптимального керування електромеханічною системою вітроенергетичної установки в умовах поривчастого характеру повітряного потоку.

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 171- електроніка, науковий керівник Д.Г. Алексієвський. Інженерний Навчально-Науковий Інститут ім. Ю.М. Потебні, 2021.

Мета і завдання дослідження полягає в отриманні оптимальних алгоритмів керування такою електромеханічною системою вітроенергетичної установки.

Об'єктом дослідження є алгоритми керування електромеханічною системою вітроенергетичних установок.

В дипломному проєкті розглядаються питання розрахунку та побудови синтезованої математичної моделі вітроенергетичної установки зі змінною швидкістю обертання.

Крім того були розроблені заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ЗМІННА ШВИДКІСТЬ ОБЕРТАННЯ, ГЕНЕРАТОР, ШВИДКОХІДНІСТЬ, НЕКЕРОВАНІЙ ВИПРЯМЛЯЧ, МОМЕНТ ГЕНЕРАТОРА, КУТОВА ШВИДКІСТЬ, МУЛЬТИПЛІКАТОР, ВЕДЕНИЙ МЕРЕЖЕЮ ІНВЕРТОР.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВЕУ – Вітроенергетична установка

ВЕС – Вітроенергетична станція

ВТ – Вітротурбіна

PLL – Фазове автопідстроювання частоти

SDBR – Перетворювач з послідовним динамічним гальмівним резистором

PSCAD / EMTDC – Система автоматизованого проектування енергосистеми електромагнітних перехідних процесів, включаючи постійний струм

DFIG – Асинхронний генератор з подвійним живленням

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

NPC – Перетворювач із затиснутою нейтраллю

Г – Генератор

СУ – Система управління

ЕМСВЕУ – Електромеханічна система вітроенергетичних установок

ЗМІСТ

1. Аналіз проблеми ефективного відбору потужності вітроенергетичної установки із змінною швидкістю обертання	9
1.1 Вітроенергетика	9
1.1.2 Вітрогенератор	12
1.1.3 Вітряна електростанція	15
1.2 Системи змінної швидкості руху та їх опис	17
1.3 Силова електроніка в малих системах вітрових турбін	40
1.3.1. Невелика система вітрових турбін	40
1.3.2. Силові електронні перетворювачі для віротурбінної системи	45
1.3.3. Перетворювачі змінного/постійного / змінного струму для силового електронного інтерфейсу	46
2. Розробка математичної моделі електромеханічної системи вітроенергетичної установки із змінною швидкістю обертання	55
3. Дослідження динамічних характеристик вітроенергетичної установки зі змінною швидкістю обертання	67
3.1. Реалізація математичної моделі ВЕУ	67
3.2. Результати моделювання	69
4. Економічний розділ	71
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	87
5.1. Техніка безпеки	87
5.2. Охорона праці	89
5.2.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	91
5.2.3. Розрахунок заземлення	93
Висновок	98
Список використаних джерел	99
Додатки	101

ВСТУП

Основною проблемою впровадження вітроенергетичних установок та розвитку вітроенергетики є підвищення техніко-економічних показників вітряка.

Способів підвищення ефективності досить багато. Один із способів це використання жорсткої вітротурбіни, у якої немає механізмів кута повороту лопатей щодо власної осі. При цьому способі досягається економія за рахунок вилучення складних механізмів повороту, вітряк стає дешевшим, і підвищується експоненційна надійність. Такий напрямок у всьому світі називається: "система вітроенергетичних установок зі змінною швидкістю обертання". Тут виникає проблема, тому що у нас змінюється швидкість обертання, отримання оптимальних алгоритмів керування такою електромеханічною системою вітроенергетичної установки.

Один із способів реалізації є забезпечення так званої статичної траєкторії регулювання. Можуть бути різні способи застосування статичної траєкторії регулювання, однак такий спосіб вимагає певної експериментальної перевірки.

В даний момент провести експеримент досить складно, тому що він дорогий, тому на допомогу приходить математичне моделювання.

Так як вітроенергетична установка є досить складним технічним об'єктом, побудова його математичної моделі важко, то у своїй роботі я застосував методика яка розроблена і використовується кафедрою мікроелектронних та електронних інформаційних систем, тобто методика синтезу математичних моделей складних електромеханічних комплексів за допомогою так званого візуально-блокового моделювання. Нині розвивається колективом викладачів, студентів, магістрантів та аспірантів. Я використав цю методологію і використав для побудови математичної моделі для

перевірки свого алгоритму. Основною темою роботи є: "ВЕУ з оптимальним відбором потужності та з оптимальним алгоритмом управління", тому опис алгоритмів управління у мене наведено в пояснювальній записці, і побудована синтезована математична модель дозволяє перевірити працездатність

1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНОГО ВІДБОРУ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ІЗ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ

1.1. Вітроенергетика

Вітроенергетика – галузь енергетики, що займається розробленням та використанням методів і засобів перетворення енергії вітру в механічну, теплову, хімічну або електричну енергію. Використовуючи енергію вітру, як відновлюване джерело енергії, розробляє способи найефективнішого використання вітроенергетичного потенціалу в галузях народного господарства. Вітрова енергія може бути використана практично повсюдно – від застосування малих вітроенергетичних установок (ВЕУ) у приватних сільських господарствах до експлуатації промислових вітроелектричних станцій (ВЕС) великої потужності, підключених до високовольтних електричних мереж.

Використання енергії вітру для виробництва електроенергії є однією із найбільш екологічно чистих технологій. Це зумовлено тим, що процес одержання електроенергії за допомогою ВЕУ не припускає використання хімічних, фазових або температурних змін станів робочого тіла енергоагрегата. Вплив на довкілля носить, переважно, непрямий характер і пов'язаний лише з виробництвом вітроенергетичного устаткування на підприємствах машинобудування. Природоохоронні організації, як правило, до недоліків зараховують шумовий вплив на довкілля, зміну зовнішнього вигляду ландшафту, збільшення ризику загибелі птахів.

З технічного боку використання енергії вітру характеризується низькою, у порівнянні з тепловими машинами, щільністю потоку енергії, що перетворюється, і випадковим характером параметрів вітрового потоку. Ці недоліки компенсуються тим, що вітер є поновлюючим джерелом енергії, причому в енергію переміщення повітряних мас перетворюється близько 2 %

енергії всієї сонячної радіації, що попадає на Землю. Наприклад, потенційні ресурси вітрової енергії на території країн колишнього СРСР оцінюються в 109 млрд кВт із можливою річною віддачею рівної $1,8 \cdot 10^{13}$ кВт·год. Як галузь науки бере початок від праць Г. Проскури з теорії взаємодії вітру з лопатями вітроустановок.

Практичного використання енергії вітру має багатовікову історію, зокрема й в Україні, проте раніше вітроустановки використовували переважно для механічної роботи (помолу зерна, перекачування води тощо). Найдавніші залишки вітряних млинів, знайдені археологами, належать до 2 ст. до н. е. (Єгипет, Іран). Ще кілька століть тому використання їх та водяних млинів (разом з мускульною силою тварин) було основою енергетики. Наприклад, використання водяних насосів, рухомих вітром, дозволило до 17 ст. збільшити територію Нідерландів на третину внаслідок осушення. Наприкінці 19 ст. лише в Російській Імперії сумарна потужність вітряних і водяних млинів (більшість з яких розташовувались на території України) дорівнювала потужності двох блоків ЧАЕС. У 20 ст. Вітроенергетика набула вигляду сучасного промислового енерговиробництва, з'явилися серійні ВЕУ, що використовуються в індивідуально у господарствах і сільсько-господарському виробництві. 1936р. в Україні розпочато будівництво вітроенергетичних станцій на Ай-Петринській яйлі (АР Крим) потужністю 10 тис. кВт (реалізації проекту П. Горчакова і Ю. Кондратюка перешкодила 2-а світова війна).

Внаслідок енергетичної кризи 1970-х рр. та Чорнобильської катастрофи у 1986 стали розглядати як екологічно чистий засіб одержання електричної енергії в промислових обсягах. В Україні поштовхом для розвитку досліджень у цьому напрямі були праці Г. Денисенка, під керівництвом якого вперше в Україні на початку 1980-х рр. споруджено вітроенергетичну станцію з 8-ма вітрогенераторами сумарною потужністю 160 кВт.

Експериментні дослідження на ній дозволили вивчити особливості використання вітрової енергії для енергетичних потреб і суттєво поліпшити технічні характеристики вітрогенераторів різного призначення. Наприкінці 20 ст. завдяки науково-технічним досягненням у сфері проектування і технології виготовлення ВЕУ, світова вітроенергетика стала конкурентоздатною галуззю енерговиробництва, з'явилися ВЕУ нового покоління, що використовують останні досягнення науково-технічного прогресу. У 80-х рр. 20 ст. собівартість електроенергії, виробленої на ВЕС, досягла собівартості електроенергії, виробленої на ТЕС. Від 1994 розпочато проектування і будівництво перших українських ВЕС на основі ліцензійних ВЕУ вітчизняного виробництва.

Вичерпність традиційних енергоресурсів (нафти, газу), екологічні проблеми, вимоги енергетичної незалежності, прагнення до децентралізації енергопостачання разом з високою економічною ефективністю вітроенергетичних проектів, призвели до різкого зростання встановленої потужності ВЕС у світі (раз на 3 роки подвоюється). Наприкінці 2004 сумарна потужність всіх світових ВЕС становила 47,6 тис. МВт, зокрема в Європі – 34,6 тис. МВт. Електроенергії, виробленої європейськими ВЕС, вистачає для енергозабезпечення 19 млн середніх споживачів. Виробництво вітроелектричного устаткування є високотехнологічним, тому виробляє його лише декілька країн у світі – переважно це Данія, Німеччина і США. Україна – єдина з країн колишнього СРСР, що має власне виробництво цього устаткування, і, відповідно, є лідером у галузі Вітроенергетичного Устаткування для ВЕУ виготовляють понад 80 підприємств Києва, Харкова, Дніпропетровська, Севастополя, Луцька. Серед них найбільші – держпідприємство «Завод імені Малишева», ВАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування», «Харківський електромеханічний завод», «Більшовик». Підприємства України виробляють ліцензійні ВЕУ потуж.

107,5 кВт і 600 кВт, вирішується завдання щодо підготовки їх виробництва потужністю 2500 кВт.

На базі вироблених в Україні ВЕУ побудовано 6 промислових і 2 дослідно-експериментальних ВЕС, сумарна потужність яких наприкінці 2005 становила 71,2 МВт. Серед них – Новоазовська (21,2; Донец. обл.), Мирнівська (19,0), Тарханкутська (13,9), Донузлавська (10,9), Судацька (6,3), Східно-Кримська (0,4; усі – АР Крим), Трускавецька (0,75; Львів. обл.), Аджигольська (0,75; Херсон. обл.). До кінця 2005 на ВЕС України вироблено понад 151,4 млн кВт·год. електроенергії. 1996 в Україні прийнято державну «Комплексну програму будівництва вітрових електростанцій до 2010 р.». Особливого значення розвиток вітроенергетики набув у зв'язку з прийняттям низки міжнародних угод із запобігання глобальної зміни клімату. Більшість європейських країн ратифікувало «Кіотський протокол рамочної конвенції ООН про зміну клімату», згідно з яким у цих країнах введено обмеження щодо викидів так званих парникових газів (переважно CO₂). Ратифікація цього протоколу ВР України (2004) включає Україну в сферу міжнародної торгівлі квотами на викиди парникових газів, що зумовлює підвищення встановленої потужності українських ВЕС не лише як джерела екологічно чистої електроенергії, але й для заміщення потужностей ТЕС. Проблеми Вітроенергетики вивчають фахівці Інституту відновлювальної енергетики і Міжгалузнього науково-технічного центру вітроенергетики НАНУ (обидва – Київ). Науковим супроводом щодо ефективності використання, виробництва та організацією питаньми галузі займаються Н. Мхітарян, С. Кудря, В. Резцов, П. Васько та ін. Питання вітроенергетики висвітлює інформаційний бюлетень «Вітроенергетика України».

1.1.2 Вітрогенератор

Вітрогенератор (вітряна турбіна) — пристрій для перетворення кінетичної енергії вітру на електричну, що складається з вітряної турбіни,

електрогенератора та допоміжного обладнання. Виробництво вітрогенераторів належить до складних та наукоємких виробництв.

За областю використання вітрогенератори умовно можуть бути поділені як для промислового, приватного та спеціального призначення.

Промислові вітрогенератори встановлюються державними органами або енергетичними компаніями. Потужність сучасних промислових вітрогенераторів досягає 8 МВт. Як правило, такі генератори об'єднують у мережу. Основна відмінність вітроелектростанцій від теплових електростанцій — повна відсутність сировини та відходів. Створення таких електростанцій економічно доцільне в районах з високим середньорічним значенням швидкості вітру або у віддалених від промислових електромереж районах.

Вітрогенератори приватного призначення мають відносно невелику потужність (звичайно до декількох кіловат) та використовуються разом з стаціонарною електромережею як джерела додаткової енергії, або як складові (разом з сонячними панелями, акумуляторними батареями, інверторами) в системах автономного електрозабезпечення. Такі генератори є популярним об'єктом аматорського конструювання.

Вітрогенератори спеціального призначення використовуються для автономного електрозабезпечення окремих технологічних об'єктів: туристичних стоянок, вітрильних гоночних яхт тощо. Такі генератори мають малу потужність (звичайно до десятків ват) і часто використовуються без інверторів — як джерела постійного струму для підзарядки акумуляторних батарей (в тому числі — батарей мобільних пристроїв через USB-адаптери).



Рисунок 1.1. Вітрогенератор

Принцип праці вітрогенератора: Потоки вітру обертають лопаті вітрогенератора: проходять через турбіну, що приводить її в дію і вона починає обертатися. На валу турбіни виникає енергія, яка буде пропорційна вітровому потоку. Чим сильніший вітер, тим більша кількість енергії виникає. Далі енергія передається по валу ротора на мультиплікатор (якщо він є), який її створює. Врахуйте, що продуктивнішими є пристрої без мультиплікатора, який прискорює обертання осі, тому що не створюється, а, відповідно, і не витрачається зайва енергія, а швидкості вітру цілком достатньо для оптимальної роботи вітрогенератора. Генератор перетворює механічну енергію в електричну.

Потужність вітряка вимірюється «ометаємою» площею турбіни. Чим більший розмір лопатей, тим більшу потужність він створює. Потужність вітрогенератора розраховується виходячи з кубічної залежності швидкості вітру.

1.1.3. Вітряна електростанція

Вітрові електростанції (ВЕС), або як ще їх називають Wind Farm, – це комплекс вітряних електроустановок (ВЕУ) або вітрогенераторів, що складається з контролера заряду, ротора, інвертора напруги та акумуляторних батарей. Ротор складається з трьох лопастей, від довжини яких залежить вловлювання вітряного потоку. Ротор перетворює енергію набігаючого вітропотуку у механічну енергію обертання турбіни з подальшим її перетворенням в електричну. Лопасті вітрогенератора вкриті ізоляційним матеріалом для захисту від блискавок. «Вітряки» бувають двох видів: з горизонтальною та вертикальною віссю. На сьогоднішній день 95% вітряної енергії виробляють горизонтальні вітрогенератори, оскільки їхня продуктивність в три рази вище за вертикальні. Управління вітряними електроустановками здійснюється на відстані через диспетчерську: запуск/зупинка ВЕУ, аналіз роботи кожного вітрогенератора та всієї станції, контроль за метеорологічними показниками, формування звіту продуктивності ВЕУ.

З усіляких пристроїв, що перетворюють енергію вітру в механічну роботу, у переважній більшості випадків використовуються лопатеві машини з горизонтальним валом, установлюваним по напрямку вітру. Набагато рідше застосовуються пристрої з вертикальним валом.

Турбіни з горизонтальною віссю і високим коефіцієнтом швидкохідності мають найбільше значення коефіцієнта використання енергії вітру (0,46-0,48). Віротурбіни з вертикальним розташуванням осі менш ефективні (0,45), але мають ту перевагу, що не вимагають настроювання на напрямок вітру.

Вітряне колесо, розміщене у вільному потоці повітря, може в найкращому випадку теоретично перетворити в потужність на його валу $16/27=0,59$ (закон Бетца) потужність потоку повітря, що проходить через

площу перетину, яке захоплюється вітряним колесом. Цей коефіцієнт можна назвати теоретичним ККД ідеального вітряного колеса. У дійсності ККД нижче і досягає для найкращих вітряних коліс приблизно 0,45. Це означає, наприклад, що вітряне колесо з довжиною лопаті 10 м при швидкості вітру 10 м/с може мати потужність на валу в найкращому випадку 85 кВт.

Сьогодні запропоновано безліч варіантів механізмів для перетворення вітру в електричну енергію. Основним його елементом є вітроколесо. За принципом роботи та схемою будови вітроколеса вітряні електростанції поділяються на 3 класи:

- крильчасті (пропелерні) — мають вітроколесо з лопатями, розташованими перпендикулярно до валу;
- карусельні або роторні;
- барабанні.

В карусельних та барабанних вал вітроколеса встановлюється вертикально. Воно обертається під дією вітру на лопаті, розташованій з одного боку осі колеса, у той час як інші лопаті прикриваються ширмою або повертаються з допомогою спеціального пристрою ребром до вітру. Ці обидва класи є громіздкими і менш ефективними порівняно з крильчастими. Виходячи з цього вся сучасна вітроенергетика базується в основному на крильчастих типах вітродвигунів. Пропелерні вітродвигуни досконалі, відносно мало матеріаломісткі, забезпечують досить високий коефіцієнт використання енергії вітру.

Необхідно враховувати, що при розташуванні поруч кількох вітряків вони повинні розташовуватися не ближче ніж за три висоти один від одного аби не перехоплювати «чужий» вітер.

Вітрогенератори бувають з горизонтальною або вертикальною віссю. Сучасний вітровий електрогенератор з горизонтальною віссю більш

розповсюджений, має більший КПД (майже в 3 рази), легкий в регулюванні і здійсненні штормового захисту та має більш низьку вартість. Одночасно вітрогенератор малої потужності до 1 кВт з вертикальною віссю має перевагу в роботі від слабких вітрів усіх напрямків, легкий в конструюванні і майже не створює шум. Такий вітрогенератор незважаючи на набагато більшу вартість знайшов деяке застосування. Але в основному використовуються вітрогенератори з горизонтальною віссю, що виробляють 95% вітрової електроенергії.

Вітрові електрогенератори найбільш вигідно використовувати в місцях, де неможливо провести загальну електромережу, або підключення є дуже витратним, а також - у місцях з частими відключеннями електрики. Також потрібно врахувати середньорічну швидкість вітру та встановлювати там де цей показник перевищує 3 м/с.

1.2. Системи змінної швидкості руху та їх опис

У вітроенергетиці перетворювачі джерела напруги використовуються для досягнення енергозбереження. Останнім часом багаторівневі перетворювачі демонструють багатообіцяючі переваги в порівнянні з традиційною схемою дворівневих перетворювачів, оскільки вони можуть долати певні обмеження в перехідних режимах. У даній статті досліджуються перехідні характеристики швидкісних вітряних турбін на основі індукційних генераторів з регульованим подвійним живленням з урахуванням різних схемних конфігурацій системи перетворювача енергії. Досліджувані схеми являють собою дворівневий шестиступінчастий інвертор IGBT, дворівневий шестиступінчастий інвертор IGBT з паралельним чергуванням і трирівневий інвертор IGBT. Всі схеми порівнювалися під час серйозного трифазного замикання на землю на виході вітряної турбіни на основі індукційного генератора з подвійним живленням з використанням звичайного контуру фазової автопідстроювання частоти (PLL) і захисту переривника постійного

струму. Проаналізовано узгоджений підхід до підвищення продуктивності всіх схем перетворювача з послідовним динамічним гальмівним резистором (SDBR). Також було проведено дослідження найкращого місця для послідовного динамічного гальмівного резистора в архітектурі індукційного генератора з подвійним живленням з урахуванням найкращого комутуючого сигналу. Крім того, була запропонована нова стратегія управління фазовою синхронізацією для системи індукційного генератора з подвійним живленням в поєднанні зі схемою послідовного динамічного відключає резистора для систем перетворювача. Моделювання проводилося в системі автоматизованого проектування енергосистем і електромагнітних перехідних процесів, включаючи постійний струм (PSCAD / EMTDC). Результати показують, що запропонована Гібридна схема з фазовою синхронізацією і послідовним динамічним гальмівним резистором в різних топологіях інвертора, розглянутих в дослідженні, може поліпшити характеристики змінних вітрогенератора під час серйозного трифазного замикання на землю. Це пов'язано з тим, що запропонована Гібридна схема може допомогти підвищити потужність по струму і відновлення вітрогенератора після сценаріїв після аварії. Крім того, комутувана вихідна напруга гілки перетворювача джерела напруги може бути збільшена до максимальної зміни синфазного напруги за допомогою модуляції просторового вектора схемами інвертора з використанням запропонованої стратегії.

Останнім часом все частіше використовуються біполярні транзистори з ізолюваним затвором для застосування в напівпровідникових пристроях з високою потужністю. Це пов'язано з тим, що пропускна здатність біполярних транзисторних перемикачів з ізолюваним затвором може бути збільшена за рахунок їх налаштування в паралельному з'єднанні. Оскільки біполярні транзисторні вимикачі з ізолюваним затвором мають високу потужність і піддаються впливу високої напруги і струму, їх перехідні операції протягом декількох мікросекунд мають життєво важливе значення. Отже, здатність

вітрових турбін на основі біполярних транзисторів з ізольованим затвором зі змінною швидкістю витримувати ненормальні умови необхідна для досягнення експлуатаційних характеристик вітряної турбіни і в той же час виконання вимог мережевих кодів.

У вітроенергетичних додатках асинхронний генератор з подвійним живленням (DFIG) має одне головне достоїнство: він використовує тільки 20-30% потужності вітрогенератора для перетворювачів потужності, що з'єднують сторону ротора і мережеву сторону. Крім того, ця технологія вітрогенератора має низькі втрати потужності, економічні перетворювачі потужності, чотири квадранти регулювання потужності для активної і реактивної потужності і покращений механізм уловлювання енергії вітру в порівнянні з більш ранньою технологією асинхронних генераторів з фіксованою швидкістю. Всі ці особливості означають, що цей тип вітрової турбіни широко використовується в системах перетворення енергії вітру. Однак ця технологія вітряних турбін має два тенденційні перетворювача потужності "спина до спини", які схильні до пошкоджень при роботі в умовах сильного трилінійного замикання на землю. Отже, ці перетворювачі потужності повинні бути захищені, щоб уникнути пошкоджень, а також для виконання вимог мережі, шляхом регулювання частоти і напруги через ланцюг ротора. В принципі, ця трифазна напруга змінного струму може управлятися різними методами перемикання, починаючи від шестиступінчастого перемикання, широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та просторової ШІМ. У традиційних вітрогенераторах, заснованих на асинхронному генераторі з подвійним живленням, перетворювачі потужності підключені спина до спини, і ця топологія обмежена в своїх додатках щодо високої потужності. Тому, якщо використовувати перетворювачі, засновані на багаторівневій топології, цей недолік можна було б подолати. Отже, в додатках для вироблення енергії вітру все більшої популярності набувають багаторівневі перетворювачі. Це пов'язано з тим, що цей тип топології

перетворювача для вітрових турбін має більш високі показники потужності, ніж структура перетворювача потужності, що призводить до меншого впливу на перемикачі біполярних транзисторів з ізолюваним затвором. Отже, низький вміст гармонік з поліпшеними формами сигналів напруги буде досягнуто з урахуванням такого типу стратегії перетворювача.

Перетворювач із затиснутою нейтраллю (NPC) є однією з найбільш популярних структур в багаторівневому інверторі джерела напруги, запропонованому в літературі. Однак в останні роки було запропоновано безліч звітів з управління струмами перетворювачів, повідомлялося про різні класифікації регуляторів струму системи перетворювачів потужності, деякі з яких були розроблені, починаючи від гістерезису і лінійного пропорційного інтеграла і закінчуючи прогнозуючим мертвим биттям. Регулятор гістерезисного струму використовується в основному тому, що він простий і не вимагає будь-яких знань про навантаження з перевагою швидкої динамічної реакції. Основними недоліками цього звичайного контролера є граничні циклічні коливання, перемикання з випадковою частотою і взаємодія фазних струмів. Повідомлялося про застосування трирівневого перетворювача джерела напруги з затиснутою нейтральною точкою для асинхронного генератора з подвійним живленням і управління векторним гістерезисним струмом відповідно для ефективного управління потужністю вітрових турбін зі змінною швидкістю. У довідкових джерелах повідомлялося, що при чергуванні несучих сигналів перетворювача джерела напруги, підключеного в паралельній конфігурації, можуть бути досягнуті поліпшені форми сигналів ефективною напруги в додатках з високою потужністю, незважаючи на присутнє якість гармонік. Відповідно, була проаналізована оцінка надійності та ефективності біполярних транзисторних ключів з ізолюваним затвором з урахуванням несправностей короткого замикання. Порівняльне дослідження підвищення якості електроенергії для системи асинхронного генератора з подвійним живленням шляхом впливу на

вітрогенератор різних типів роторних перетворювачів. повідомлялося, що в схемах дворівневого шестиступінчастого біполярного транзисторного інвертора з ізольованим затвором зміст гармонік дуже висока, оскільки частота перемикачів перемикачів низька. Отже, продуктивність інвертора знижується. Виробництво високого вмісту гармонік у звичайній дворівневій системі асинхронного генератора з подвійним живленням через низьку частоту перемикачів знижує продуктивність системи вітротурбіни зі змінною швидкістю. Таким чином, чергування перетворювачів в паралельній конфігурації може допомогти поліпшити продуктивність вітрогенератора.

Оскільки використання багаторівневих перетворювачів стає популярним в системах перетворення енергії вітру через їх надійності в перехідних умовах, метою даної статті є підвищення продуктивності біполярного транзисторного інвертора з шестиступінчастим 2-рівневим ізольованим затвором, пропонуючи скоординоване управління інверторною системою з новою конфігурацією контуру фазової автопідстроювання частоти (PLL) разом з послідовним динамічним гальмівним резистором (SDBR). Висока напруга, зазвичай виникає під час збоїв в мережі, розділяється невеликим вбудованим опором через стратегію послідовного підключення з використанням гальмівного резистора. Таким чином, втрата системи управління перетворювачем в цій топології не виникає через індукованого перенапруги. Крім того, стратегія послідовно з'єднаних гальмівних резисторів значно знижує дуже високий струм в схемі ротора вітрогенератора до більш низьких значень. Отже, перенапруження лінії постійного струму, яке повинно було бути небезпечним для перетворювачів потужності вітрогенератора, можна уникнути через низький струм зарядки конденсатора лінії постійного струму. Хоча в багатьох дослідженнях в літературі розглядалося використання обмежувачів струму пошкодження для підвищення якості електроенергії та обмеження струмів пошкодження вітрогенераторів з подвійним живленням асинхронних генераторів на

вітроелектростанціях, в цій статті було проаналізовано переважне положення гальмівного резистора в системі вітрогенератора з урахуванням різних сигналів перемикачів. Оптимальне положення гальмівного резистора і стратегія перемикачів були використані для подальшого аналізу запропонованих схем вітрогенераторів, використаних в даному дослідженні. Крім того, було проведено порівняльне дослідження з використанням запропонованої схеми для 2-рівневого біполярного транзисторного інвертора з ізольованим затвором зі схемами, що містять біполярний транзисторний інвертор з ізольованим затвором з паралельним чергуванням і 3-рівневий біполярний транзисторний інвертор з ізольованим затвором. Моделювання проводилося в системах автоматизованого проектування енергосистем і електромагнітних перехідних процесах, включаючи постійний струм. Запропонована Гібридна схема може допомогти збільшити поточну потужність і відновлення вітрової турбіни після збою. Крім того, просторово-векторна модуляція схем інвертора призвела до максимальної зміни значення синфазного напруги з використанням запропонованої гібридної стратегії управління контуром фазової автопідстроювання частоти і послідовної схеми динамічного гальмівного резистора. Отже, покращується комутувана вихідна напруга перетворювальної гілки перетворювача джерела напруги. Результати показують, що гібридна схема в різних топологіях інверторів, розглянутих в дослідженні, може підвищити продуктивність змінних вітрогенератора при сильному трифазному замиканні на землю.

Ранні системи перетворення енергії вітру були засновані на генераторах, безпосередньо підключених до мережі, тому швидкість цих систем була постійною (з синхронними генераторами) або квазіпостійною (з асинхронними генераторами). Еволюція силових напівпровідників зробила величезний внесок у системи перетворення енергії вітру зі змінною швидкістю за рахунок сполучення постійної частоти мережі зі змінною частотою генератора. Робота вітряних турбін зі змінною швидкістю вимагає

застосування генераторів зі змінною швидкістю, що працюють на постійній частоті мережі. Можуть використовуватися різні типи генераторів, зазвичай асинхронні генератори (з сепаратором або намотаним ротором) або синхронні генератори (з обмоткою збудження або постійними магнітами); всі вони вимагають використання відповідного електронного перетворювача потужності. У літературі були запропоновані різні стратегії управління для роботи зі змінною швидкістю, але можлива класифікація може призвести до так званого управління в режимі швидкості і управління в режимі крутного моменту. Управління режимом крутного моменту полягає в отриманні еталонного електричного крутного моменту по вимірюванню частоти обертання валу, що призводить до оптимального співвідношення швидкостей наконечника. Звичайно, замість еталону крутного моменту також може бути отриманий еталон потужності. Управління швидкісним режимом засноване на отриманні еталону швидкості обертання, який призводить до оптимального співвідношення швидкостей наконечника, тому потрібно контур управління швидкістю. Існують різні підходи до отримання цього еталону швидкості. Вимірювання швидкості вітру може бути використано для отримання еталонної швидкості обертання. Недоліком цього методу є те, що потрібно анемометр, який вимірює тільки швидкість вітру в одній точці ротора, а також на це вимірювання впливає слід ротора. Замість цього можна використовувати оцінку швидкості вітру. Інша альтернатива управління швидкісним режимом полягає в отриманні еталонної швидкості обертання з характеристики потужності (або крутного моменту) - швидкості, яка призводить до оптимального співвідношення швидкостей наконечника. Цей метод має недолік, що потрібно спостерігач крутного моменту вітрової турбіни, хоча крутний момент генератора (або потужність) також може бути використаний, але еталонна частота обертання буде оптимальною тільки в сталому режимі. Нарешті, еталонна швидкість, яка максимізує потужність турбіни, може бути отримана за допомогою пошуку на основі нечіткої логіки,

як в . При швидкостях вітру, що перевищують номінальні, уловлювання енергії турбіною має бути обмежене регулюванням швидкості або кроку. Для наступних випадків враховуються тільки швидкості вітру, зазначені нижче, оскільки тільки в цьому діапазоні швидкостей може бути досягнута максимальна потужність.

Стратегії управління змінною швидкістю:

Аеродинамічна потужність вітротурбіни визначається рівнянням:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 c_p \quad (1.1)$$

де ρ -щільність повітря, R -радіус турбіни, v -швидкість вітру і c_p - коефіцієнт потужності. Коефіцієнт потужності визначається як відношення потужності турбіни до потужності вітру, і він залежить від співвідношення швидкостей наконечника (λ), а також кута нахилу лопаті (β).

Задля наступного β вважається постійним, так як він змінюється тільки при досягненні повного навантаження через контур управління зі зворотним зв'язком, який регулює вихідну потужність. λ визначається як відношення швидкості турбіни на кінчику лопаті до швидкості вітру і задається:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (1.2)$$

де Ω -частота обертання турбіни. У типовій вітряній турбіні з фіксованим β функція $c_p(\lambda)$ показує (мал. 1), що існує оптимальне значення коефіцієнта швидкості наконечника (λ_{opt}), яке робить коефіцієнт потужності максимальним ($c_{p, max}$). На рисунку 2 Показані характеристики потужності і швидкості турбіни для різних значень швидкості вітру.

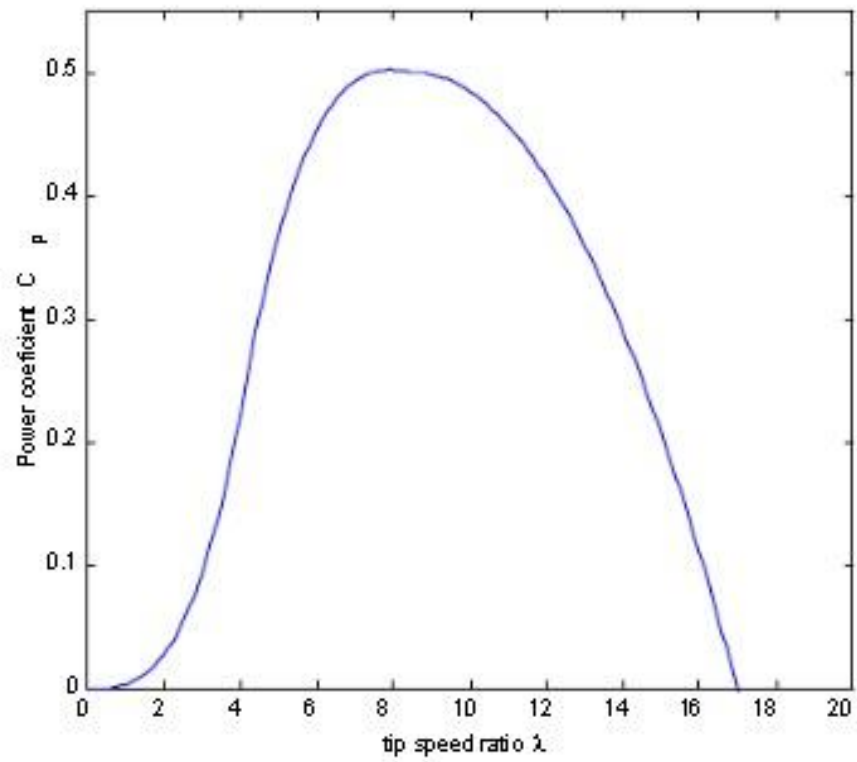
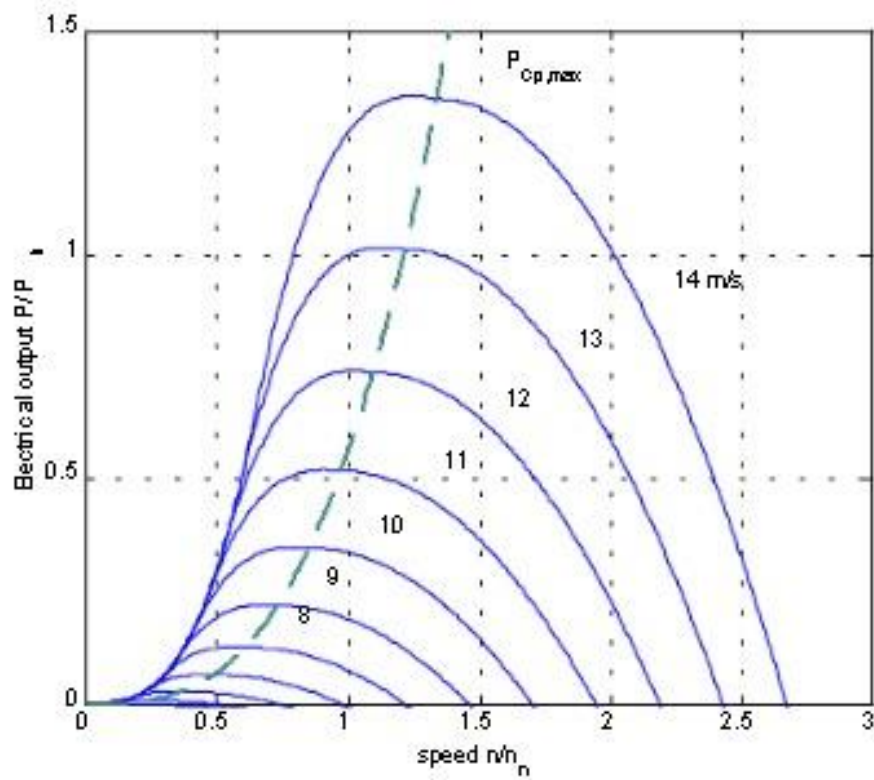
Рис. 1.2. Функція $c_p(\lambda)$ 

Рис. 1.3. Швидкісно-силові характеристики

Шляхом виключення швидкості вітру з (1.1) у (1.2), коли коефіцієнт потужності максимальний:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left(\begin{matrix} R \cdot \Omega_{opt} \\ \lambda_{opt} \end{matrix} \right)^3 c_{p, max} \quad (1.3)$$

де Ω_{opt} -функція швидкості вітру:

$$T_{opt} = K \cdot \Omega_{opt}^2 \quad (1.4)$$

Потім

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{c_{p, max}}{\lambda_{opt}} \quad (1.5)$$

або, розділивши обидва члени (5) на Ω_{opt}

$$T_{opt} = K \cdot \Omega_{opt}^2 \quad (1.6)$$

Де

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{c_{p, max}}{\lambda_{opt}} \quad (1.7)$$

Вираз (1.5) показує, що максимальна потужність, яку конкретна турбіна може витягнути з вітру, є кубічною функцією оптимальної швидкості турбіни (рисунок 1.2). Вираз 6 показує залежність між крутним моментом і швидкістю в точці максимальної потужності роботи. Будуть розглянуті дві

стратегії управління для отримання максимальної потужності від конкретного вітру: управління в режимі швидкості і управління в режимі крутного моменту. А. вираз управління швидкісним режимом (1.2) показує, що для вилучення максимальної потужності від конкретного вітру управління повинно регулювати швидкість турбіни так, щоб завжди виходило оптимальне співвідношення швидкостей наконечника (λ_{opt}). Еталон швидкості, що забезпечує максимальну потужність, може бути отриманий різними способами. По-перше, його можна отримати з вимірювання швидкості вітру за допомогою (1.4), але потрібен анемометр, який вимірює тільки швидкість вітру в одній точці ротора, а також на це вимірювання впливає слід від ротора. Можна використовувати оцінку швидкості вітру, видимої для всього ротора турбіни. У точці максимальної потужності швидкість обертання і швидкість вітру пов'язані виразом (1.4). Тоді оптимальна швидкість може бути отримана безпосередньо з (1.6) Як

$$\Omega_{opt} = \sqrt{\frac{\hat{T}_t}{K}} \quad (1.8)$$

Де \hat{T}_t це оцінка крутного моменту турбіни. Цей метод має недолік, що потрібно спостерігач крутного моменту турбіни.

У сталому режимі крутний момент турбіни дорівнює крутному моменту генератора, тому, якщо відстеження максимальної потужності є метою тільки в сталому режимі, то оптимальну швидкість можна отримати з (1.5), використовуючи вихідну потужність генератора в якості вхідного сигналу:

$$\Omega_{opt} = \sqrt[3]{\frac{P_g}{K}} \quad (1.9)$$

Перевага цього методу полягає у використанні потужності генератора в якості вхідного сигналу, яка є змінною, яку можна легко виміряти (фактично вона вимірюється для інших функцій управління). На рисунку 3 показана структурна схема системи. Тут для певної швидкості вітру (нижче номінальної) задана швидкість, при якій досягається максимальна потужність, передається контуру управління швидкістю. Регулятор швидкості встановить прив'язку крутного моменту до електричного генератора. Баланс між крутним моментом турбіни та крутним моментом генератора призведе до прискорення (або уповільнення) крутного моменту, доки не буде досягнута бажана швидкість. Підпорядкований контур управління крутним моментом буде керувати крутним моментом генератора, впливаючи на відповідну змінну, в залежності від типу генератора.

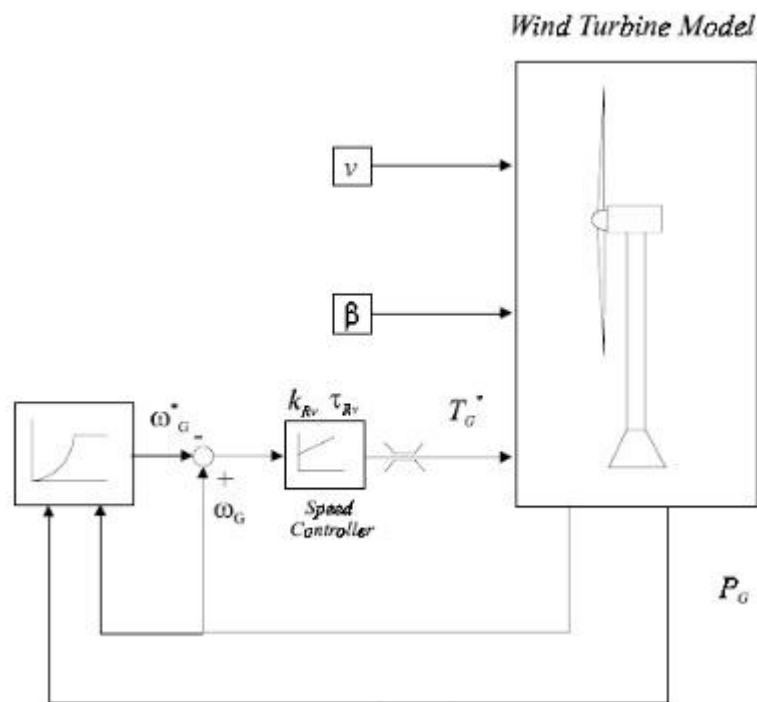


Рис. 1.4. Блок-схема управління швидкісним режимом

Управління швидкісним режимом забезпечує швидке відстеження максимальної потужності, якщо використовується контур управління швидкістю з високою пропускнуою здатністю, але, як буде показано пізніше,

хоча захоплення енергії максимальне, результати не такі хороші з точки зору якості електроенергії. В. вираз управління режимом крутного моменту (1.6) показує взаємозв'язок між крутним моментом і швидкістю на максимальному рівні. Потім, щоб отримати оптимальний крутний момент турбіни, система управління повинна відрегулювати опорний крутний момент генератора таким чином, щоб була отримана Максимальна потужність. У сталому режимі крутний момент турбіни дорівнює крутного моменту генератора. Потім Максимальна потужність може бути досягнута за рахунок вимоги електричного крутного моменту від генератора в якості:

$$T_g = K \cdot \Omega^2 \quad (1.10)$$

На рисунку 1.4 показана структурна схема системи, тут для певної швидкості вітру (нижче номінальної) задається електромагнітний момент, який забезпечує максимальну потужність, для внутрішнього контуру управління крутним моментом. Якщо швидкість вітру раптово збільшиться, відбудеться збільшення крутного моменту турбіни, і оскільки швидкість турбіни не може змінитися миттєво, з наведеного вище виразу крутний момент генератора залишиться колишнім, що призведе до прискорюючого крутного моменту до тих пір, поки не буде досягнута Нова оптимальна точка роботи.

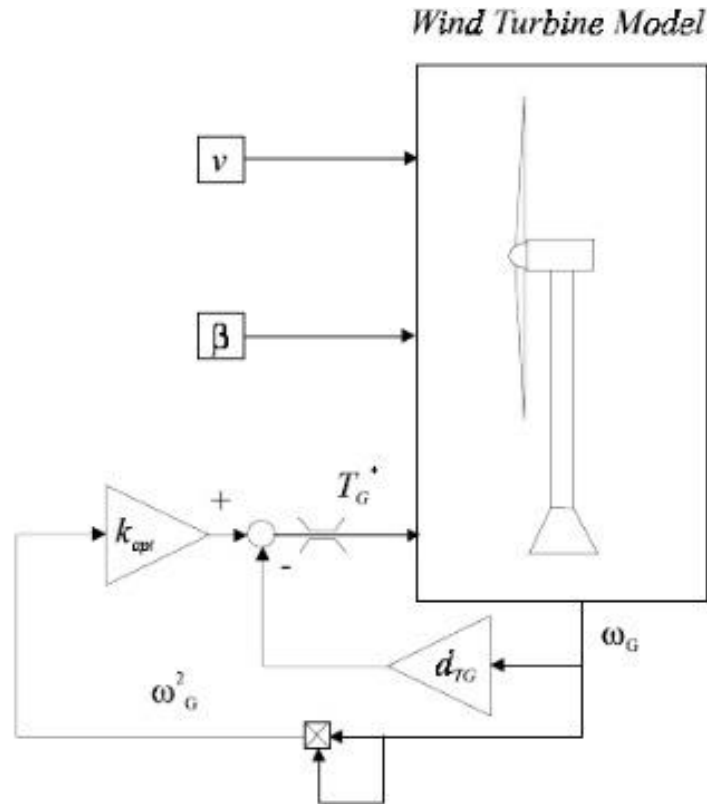


Рис. 1.5. Блок-схема управління режимом крутного моменту

Результати моделювання

Порівняльний аналіз вищезазначених стратегій управління буде проведено з використанням результатів моделювання. Для порівняння результатів моделювання використовуються наступні характеристики: відстеження максимальної потужності і якість харчування. Ці характеристики кількісно визначаються наступним чином:

Відстеження максимальної потужності оцінюється як вихід енергії під час моделювання.

Якість електроенергії оцінюється як стандартне відхилення вихідної потужності генератора.

Для порівняльного аналізу розглядаються чотири випадки:

- випадок 1: вітряна турбіна з фіксованою швидкістю.
- випадок 2: стратегія управління режимом крутного моменту.

- випадок 3, А і в: стратегія управління швидкісним режимом.

Як вже було сказано, регулятор швидкості необхідний, коли вітряна турбіна працює в режимі управління швидкістю. Цей контролер буде сильно впливати на динамічну поведінку всієї системи. Тому особливу увагу буде приділено дизайну регулятора швидкості. Для швидкості був обраний рі-контролер

контуру управління. Для порівняльного аналізу були розроблені два контролери (випадки а і б), обидва були розроблені для забезпечення однакового запасу по фазі, але вони розрізняються по результуючій смузі пропускання контуру управління швидкістю. Параметри обох контролерів і результуючі характеристики контурів управління наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.1. Параметри і характеристики контуру регулювання швидкості

Пі-контролер	пропорційний коефіцієнт посилення	інтегральний коефіцієнт посилення	Запас по фазі	Пропуск на спроможність
Випадок а	10.94	7.76	65°	2 rad/s
Випадок б	22.04	31.04	65°	4 rad/s

Реакція системи буде отримана при порушенні вітротурбіни з певним профілем вітру. Цей профіль вітру, наведений на рисунку 5, представляє швидкість вітру на роторі турбіни, виміряну анемометром.

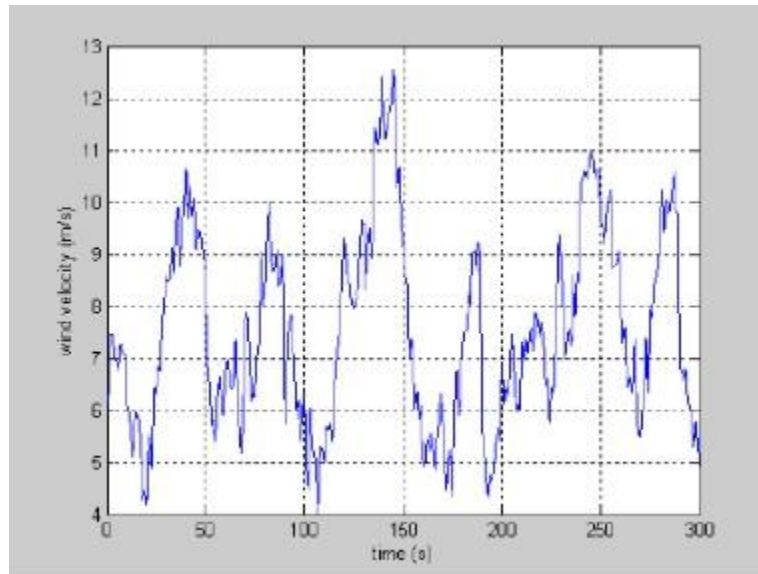


Рис. 1.6. Профіль вітру

Параметри вітротурбіни і профіль вітру наведені в таблиці 1.2.

Table II. Turbine and wind profile characteristics

Таблиця 1.2. Характеристики профілю турбіни і вітру

Радіус турбіни	25,85 м
Номінальна потужність	1 МВт
Номінальна частота обертання	26,6 об / хв
Постійна інерції	3,88 С
номінальна швидкість вітру	12 м/с
середня швидкість вітру	7,5 м / с
інтенсивність турбулентності	0,244

А. Аналіз відстеження максимальної потужності

На рисунках 1.6, 1.7, 1.8 і 1.9 Показані відповіді системи у випадках 1, 2, 3А і 3В відповідно. На рисунках характеристика швидкості обертання показана червоним кольором, а характеристика вихідної потужності - пурпуровим. Очевидно, що швидкість майже постійна у випадку 1, в той час

як у випадках 2 і 3 Швидкість обертання має тенденцію слідувати за змінами швидкості вітру. рисунки показують, що динамічне відстеження максимальної потужності краще в режимі управління швидкістю, ніж в режимі управління крутним моментом, а також що чим вище пропускна здатність контролера, тим краще відстеження. Проте, як наслідок цього, коливання крутного моменту генератора, створювані регулятором швидкості для досягнення оптимального співвідношення швидкостей наконечника, будуть впливати на коливання вихідної потужності.

З рисунків видно, що управління швидкісним режимом вітряних турбін зі змінною швидкістю призводить до ще більших коливань потужності, ніж вітряні турбіни з фіксованою швидкістю, і чим вище пропускна здатність контролера, тим вище коливання потужності. Очевидно, що найкращий відгук на потужність виходить в разі 2, де використовується управління режимом крутного моменту вітротурбіни зі змінною швидкістю. При інтегруванні вихідної потужності в досліджуваному інтервалі часу виходить вихід енергії за цей період (див.таблицю III). Захоплення енергії вище в разі 3В, коли швидкість турбіни більш точно відповідає швидкості вітру, і захоплення енергії, очевидно, нижче в разі 1, коли використовується вітротурбіна з фіксованою швидкістю.

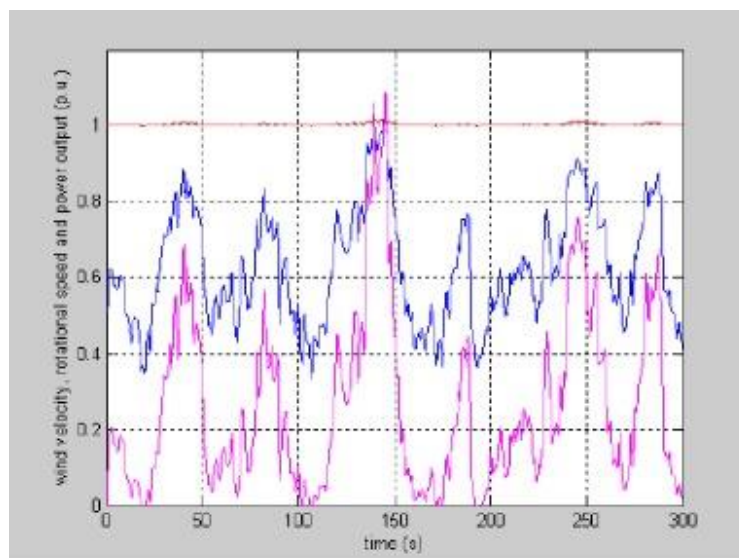


Рис. 1.7. Результати моделювання (випадок 1)

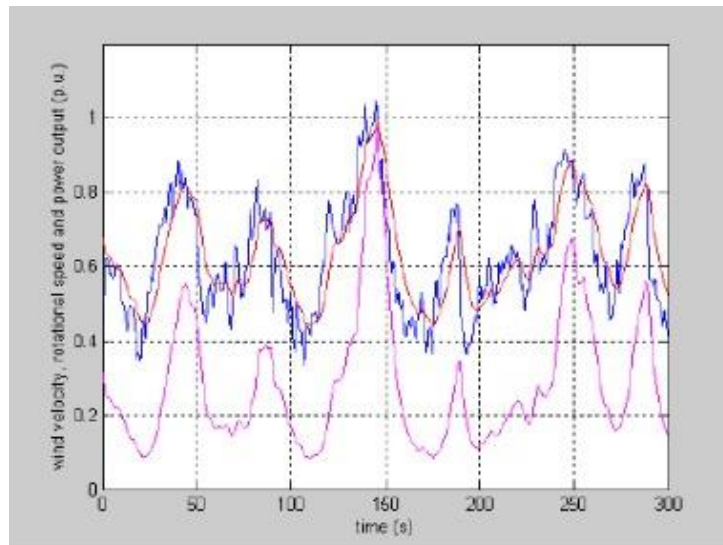


Рис. 1.8. Результати моделювання (випадок 2)

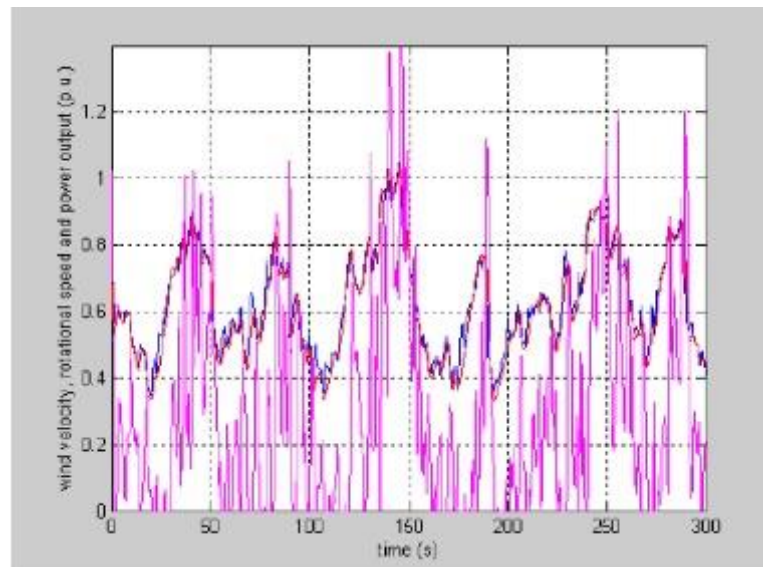


Рис. 1.9. Результати моделювання (випадок 3а)

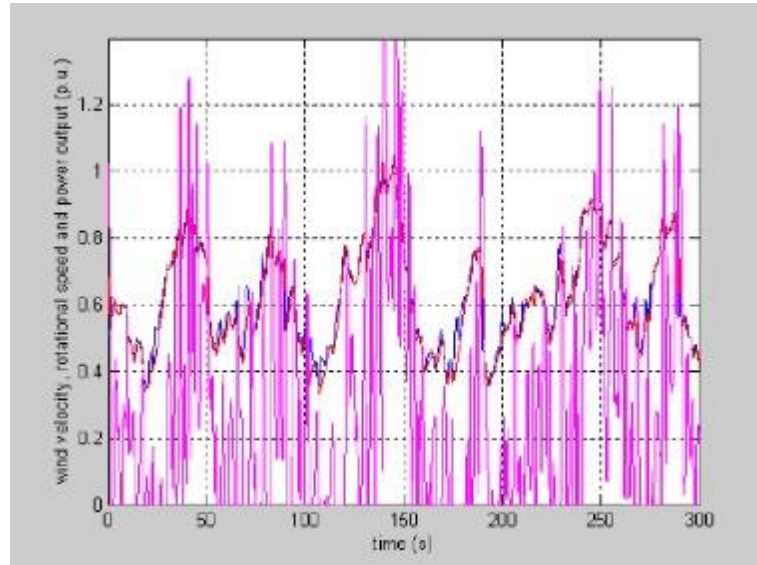


Рис. 1.10. Результати моделювання (випадок 3b)

Тим не менш, вихід енергії і, отже, відхилення від максимального коефіцієнта потужності залежать від форми кривої $\text{sr}-\lambda$. З різкою характеристикою значне збільшення захоплення енергії може бути отримано при використанні хорошого методу управління відстеженням потужності

В. Аналіз якості електроенергії

Як показано на рисунках 1.6, 1.7, 1.8 і 1.9, вітряні турбіни виробляють потужність, яка не є постійною через коливання вітру. Коливання потужності викликають коливання напруги в точці загального зв'язку (РСС), які збільшуються з інтенсивністю турбулентності. Мерехтіння напруги може стати обмежуючим фактором для підключення вітрогенераторів в слабких мережах і навіть у відносно сильних мережах з високою встановленою потужністю вітроенергетики.

Вітрові турбіни зі змінною швидкістю можуть поліпшити багато аспектів якості електроенергії в розподільних мережах за рахунок зменшення короточасних коливань потужності, що призводить до зменшення мерехтіння. Крім того, реактивну потужність можна регулювати в вітряних

турбінах зі змінною швидкістю, що допомагає поліпшити якість електроенергії.

Вимірювання мерехтіння в точці загального з'єднання має той недолік, що вимірювання включає в себе внесок в мерехтіння, створюване іншим обладнанням, підключеним до тієї ж точки загального з'єднання. З цієї причини оцінка випромінювання мерехтіння вітряними турбінами заснована на вимірах струму або потужності, а не напруги.

Коливання напруги ΔU в точці загального зв'язку пов'язані з коливаннями потужності відповідно до:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \quad (1.11)$$

де P і Q -відповідно активна і реактивна потужність, що подається в мережу генератором вітрової турбіни (рис. 10), а R і X - відповідно опір короткого замикання і реактивний опір мережі.

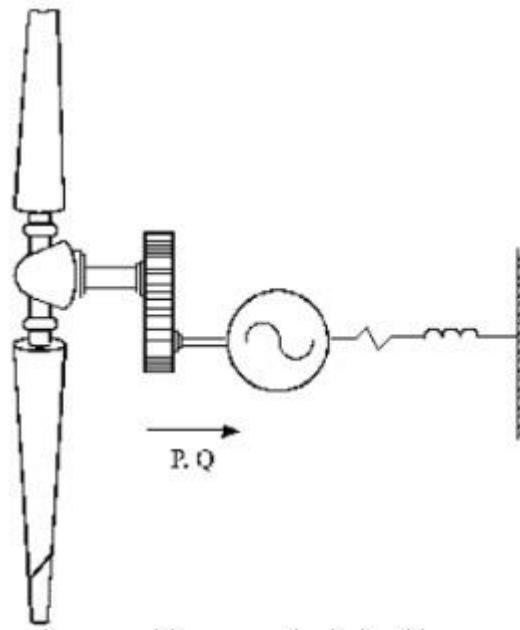


Рис. 1.11. Вітрогенератор, підключений до мережі

Коливання напруги на РСС можна використовувати для розрахунку короткочасної інтенсивності мерехтіння, P_{st} , за допомогою флікерметра, відповідного стандарту IEC 61000-4-15.

У цьому підрозділі P_{st} не буде використовуватися для порівняльного аналізу, а тільки для коливань потужності, так як цього достатньо для висновків цього підрозділу. Зверніть увагу, що, взагалі кажучи, для конкретної мережі більш високі коливання потужності викличуть більш високі коливання напруги і, отже, більш високі викиди мерехтіння.

Коливання потужності будуть кількісно оцінені шляхом обчислення відношення стандартного відхилення до середнього значення відгуку потужності в розглянутих випадках. Результати наведені в таблиці III. З цих результатів ясно, що стратегія управління режимом крутного моменту краще, ніж стратегія управління швидкісним режимом, оскільки вона призводить до більш низьких коливань потужності. Крім того, чим вище пропускну здатність контролера, тим вище коливання потужності.

Таблиця 1.3. Вихід енергії і коливання потужності

	Середня вихідна потужність	стандартне відхилення / середня вихідна потужність
Випадок 1	256,2 кВт	0,8975
Випадок 2	286,1 кВт	0.6396
Випадок 3а	295.1 кВт	1.0302
Випадок 3б	298.6 кВт	1.1217

Висновок

Вітрові турбіни зі змінною швидкістю відрізняються більш високою продуктивністю енергії і меншими коливаннями потужності, ніж вітряні турбіни з фіксованою швидкістю. Остання особливість особливо важлива, оскільки мерехтіння може стати обмеженням для вітрогенерації в енергосистемах. Крім того, вітряні турбіни зі змінною швидкістю створюють більш низькі навантаження на механічні деталі, ніж вітряні турбіни з фіксованою швидкістю, але цей аналіз в даній статті не проводився.

Порівнюючи стратегії керування режимом крутного моменту та керування режимом швидкості, результати моделювання показують, що стратегія керування режимом швидкості слідує за швидкістю вітру, щоб точніше досягти максимального коефіцієнта потужності, тобто вона більш адекватна для швидкого відстеження максимальної потужності, і чим вище пропускна здатність контуру керування швидкістю, тим краще відстеження. Проте, як наслідок, він виробляє більше коливань потужності, так як швидкість жорстко прив'язана до турбіни. Таким чином, з точки зору якості електроенергії стратегія управління режимом крутного моменту забезпечує кращу поведінку, оскільки швидкість не нав'язується турбіні безпосередньо, і ця стратегія управління дозволяє вітротурбін вільно змінювати швидкість обертання під час перехідного процесу.

Аналіз змінної швидкості в малих турбінах:

Невеликі вітрові турбіни зі змінною швидкістю використовувалися в автономних і підключених до мережі додатках. Така турбінами зазвичай вважаються турбіни в діапазоні розмірів 50 кВт і нижче. В автономних додатках вони можуть виробляти електроенергію або можуть безпосередньо використовувати механічну енергію для виконання таких робіт, як перекачування води. У режимі вироблення електроенергії вони можуть використовуватися для зарядки акумуляторів, перекачування води, запуску обладнання для виробництва льоду, електропостачання, обігріву будівель і

будь-яких інших незліченних цілей, для яких може бути використано електрику.

Турбіна зі змінною швидкістю з генератором постійного струму (DC) може використовуватися для зарядки акумуляторів або, як це робилося на протязом більшої частини 1920-х і 1930-х років на фермах по всій Америці до електрифікації сільських районів Адміністрування для безпосереднього живлення обладнання постійного струму. Ці машини постійного струму в основному залежали від комутованих генератор змінного струму. Невеликий ротор турбіни, однак, може включати генератор змінного струму, який виробляє змінна напруга змінного струму і частоти (дикий змінний струм), і, використовуючи сучасну силову електроніку і контролери, Перетворить змінний струм в постійний і назад в змінний з надійною і постійною частотою. У цьому режимі вони можуть бути безпосередньо підключені до електричних мереж для подачі електроенергії в окремий сучасний будинок або ранчо і повернення надлишкової потужності в електрична мережа. В якості альтернативи вони можуть бути розташовані безпосередньо в електричній мережі в кінці віддалених розподільних ліній, щоб зменшити необхідність в модернізації старих або дрібних розподільних систем.

Аналіз змінної швидкості у великих турбінах:

Змінна швидкість у великих турбінах зазвичай реалізується одним з двох способів: перетворювачі частоти змінного струму в змінний, такі як циклоконвертери, або за допомогою постійного струму (перетворювачі змінного струму-постійного струму-змінного струму), які перетворюють різні напруги і частоти зі змінною швидкістю генератора напруги постійного струму, а потім, використовуючи деякі форми силової електроніки конвертувати напруга постійного струму назад в напругу змінного струму з фіксованою частотою для необхідних додатків (як правило, підключення до електромереж).

Використовуваний генератор може бути підключений до ротора турбіни або безпосередньо, або через коробку передач. Коробка передач використовувалися на більшості великих турбін для збільшення швидкості. Великі ротори вітрових турбін зазвичай працюють зі швидкістю від 10 до 60 об/хв, залежно від розміру. Готові генератори зазвичай розраховані на роботу в діапазоні від 1200 до 1800 оборотів в хвилину. Збільшення швидкості необхідно для перетворення низьких швидкостей обертання ротора у більш високі швидкості, необхідні для приводу генераторів.

Пряме механічне з'єднання може бути виконано з генератором, який розрахований на роботу при дуже низьких оборотах в хвилину. Такі генератори зазвичай складаються з безлічі полюсів і дуже великі (великий діаметр для розміщення великої кількості полюсів) в порівнянні з генераторами, прикріпленими до коробок передач. Enercon E-40, який являє собою машину з регульованою швидкістю з прямим приводом, має діаметр ротора турбіни 40 м. (131 фут) і призначений для роботи зі швидкістю від 15 до 37 об/хв. Генератор з прямим приводом цієї конструкції має діаметр більше 4 метрів (13 футів) і має 84 намотаних полюса. Вихідна частота лінійна зі швидкістю більше 26 Гц при вітрі 16,7 м / с (37 миль на годину). Ця змінна напруга і частота випрямляються до постійного струму і передаються на звичайний електронний інвертор для отримання потужності 50 Гц для європейської мережі.

1.3. Силова електроніка в малих системах вітрових турбін

1.3.1. Невелика система вітрових турбін

Невелика вітряна турбіна зазвичай складається з наступних компонентів: ротора зі змінною кількістю лопатей для перетворення енергії вітру в механічну, електрогенератора, механізмів керування та захисту та силових електронних компонентів для подачі електроенергії в акумуляторну

батарею, загальнодоступну мережу або, іноді, в пряме застосування, наприклад, водяний насос.

Генератор є основною частиною невеликої вітрової турбіни. Генератор перетворює механічну енергію в електричну. Двома поширеними типами електричних машин, які використовуються в невеликих вітрових турбінах, є індукційні генератори з самозбудженням (SEIG) і синхронні генератори з постійними магнітами (PMSG). У цих випадках звичайним способом перетворення низькошвидкісної механічної потужності в електричну є використання коробки передач і SEIG зі стандартною швидкістю. Коробка передач адаптує низьку швидкість ротора турбіни до високої швидкості генераторів, хоча коробка передач може не бути необхідною для багатополюсних генераторних систем. В індукційних генераторах з самозбудженням реактивна потужність, необхідна для живлення магнітних ланцюгів, повинна подаватись від паралельної батареї конденсаторів на терміналі машини. У цьому випадку напруга на клеммах або реактивна потужність можуть не контролюватися безпосередньо, і асинхронні генератори можуть страждати від проблеми нестабільності напруги. Значний інтерес викликає застосування багатополюсних синхронних генераторів з постійними магнітами (ПСГ), що приводяться в дію валом вітрогенератора без коробки передач. Як описано вище, електричні генератори сучасних малих вітрових турбін, як правило, призначені для використання постійних магнітів і прямого з'єднання між ротором і генератором. Можна зустріти такі поширені топології:

- Генератори з повітряним сердечником з осьовим потоком
- Осьові генератори потоку з тороїдальним залізним сердечником
- Осьові генератори потоку із залізними сердечниками та пазами
- Генератори радіального потоку із залізними сердечниками та пазами
- Генератори поперечного потоку з щілинним залізним сердечником

У топологіях вище тип потоку відноситься до напрямку магнітних ліній потоку, що перетинають магнітний зазор між полюсами по відношенню до обертового валу генератора.

Важливо вміти контролювати та обмежувати перетворену механічну потужність під час більших швидкостей вітру. Обмеження потужності під час вищої швидкості вітру в невеликих вітрових турбінах може здійснюватися за допомогою керування згортанням або керуванням м'яким зривом. Згортання - це пасивний механізм, який використовується для обмеження частоти обертання та вихідної потужності маломасштабної вітрової турбіни при сильному вітрі. У той час як інші механізми, такі як пасивне нахилення лопаті або повністю електронне керування, засноване на зриві під навантаженням, іноді можуть зустрічатися, згортання є найбільш часто використовуваним механізмом. Багато невеликих вітряних турбін використовують конфігурацію противітряного ротора з хвостовою лопаткою для пасивного контролю повороту. Як правило, хвостова лопатка є шарнірною, що дозволяє ротору згортатися (повертати) при сильному вітрі, забезпечуючи як регулювання потужності, так і захист від перевищення швидкості. При більших швидкостях вітру вироблена потужність вітрової турбіни може перевищувати межу генератора або конструкції вітрової турбіни. Коли це відбувається, малі вітрові турбіни використовують механічне керування або згортання, щоб повернути ротор від вітру, що призводить до втрати аеродинамічної потужності або різкого падіння кривої потужності. Основний принцип роботи системи закручування показаний на рисунку 1.12.

Часто маленькі ротори турбін різко згортаються при швидкості вітру, лише трохи вище їх номінальної, що призводить до дуже «пікової» кривої потужності та поганого захоплення енергії при більших швидкостях вітру. Ця втрата енергії посилюється гістерезисом згортання, при якому швидкість

вітру повинна впасти значно нижче номінальної, перш ніж ротор розгорнеться і відновить ефективну роботу. Одним із способів покращити продуктивність вітрових турбін, що згортаються, є конструкція ротора так, щоб він поступово згортався, завдяки чому вихідна потужність залишатиметься на рівні або близької до номінальної потужності, коли швидкість вітру перевищує номінальне значення. Цей підхід має два недоліки: ротори вітряних турбін, що працюють під великими кутами нахилу, мають тенденцію бути дуже шумними і відчують високі навантаження на закрилки. Зверніть увагу, що виготовлені вітряні турбіни використовують демпфер для зменшення гістерезису петлі згортання. Амортизація необхідна, щоб вітряна турбіна не крутилася або не тріскалася при згортанні та виході з нього. Демпфування плюс гіроскопічний ефект обертання лопатей вітрогенератора додають непродуктивний час входження та виходу з згортання, створюючи гістерезис під час переходу. Усі ці затримки зменшують виробництво енергії вітрогенераторами.

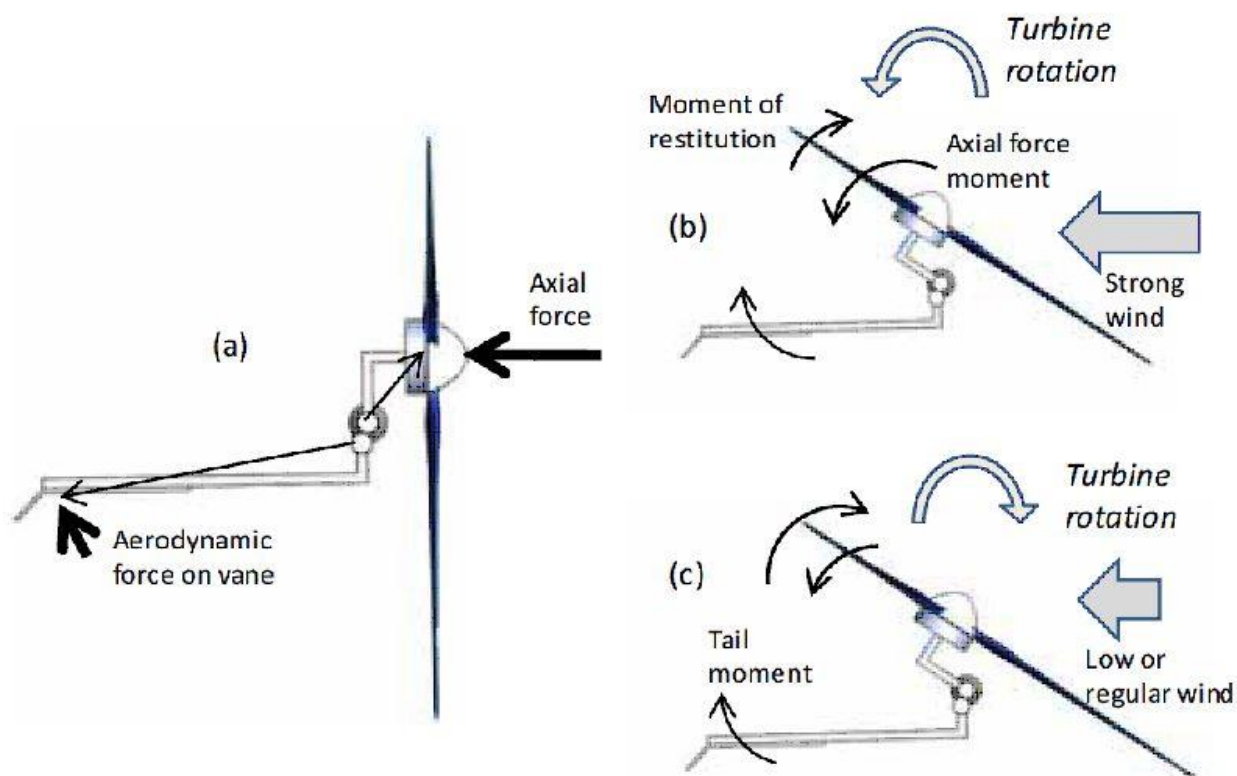


Рисунок 1.12. Огляд принципів роботи системи згортання.

Де:

- a) Аеродинамічні сили.
- b) Рух закручування при сильному вітрі.
- c) Відновлення нормальної (вирівняної) роботи при зменшенні швидкості вітру.

Концепція м'якого зупинки полягає в контролі обертів генератора в хвилину (об/хв) і досягнення оптимальної роботи в широкому діапазоні обертів ротора. Щоб керувати обертами генератора, концепція м'якого зупинки регулює режим зупинки вітрової турбіни, таким чином, згортання може бути відкладено під час нормальної роботи. Згортання все ще використовується в концепції м'якого стойла під час дуже сильного вітру та надзвичайних умов. Потенційні переваги м'якого контролю перераховані нижче:

- Затримує згортання якомога довше, що збільшує вироблення енергії
- Контролює швидкість обертання вітрогенератора для досягнення максимального коефіцієнта потужності
- Управляє вітряною турбіною з низьким співвідношенням швидкостей наконечника під час високої швидкості вітру, щоб зменшити шумові та тягові навантаження.

Єдина відмінність між згортанням і плавним керуванням - це додавання DC-DC перетворювача, який дозволяє керувати потужністю. За допомогою DC-DC перетворювача між випрямлячем і навантаженням можна керувати потужністю, що передається на навантаження, відповідно до встановленого графіка потужності/оборотів в хвилину.

Конфігурація вітрової турбіни зі змінною швидкістю з перетворенням силової електроніки відповідає повній вітряній турбіні з регульованою швидкістю, з генератором, підключеним до навантаження або до мережі через перетворювач енергії, як показано на рисунку 1.13.

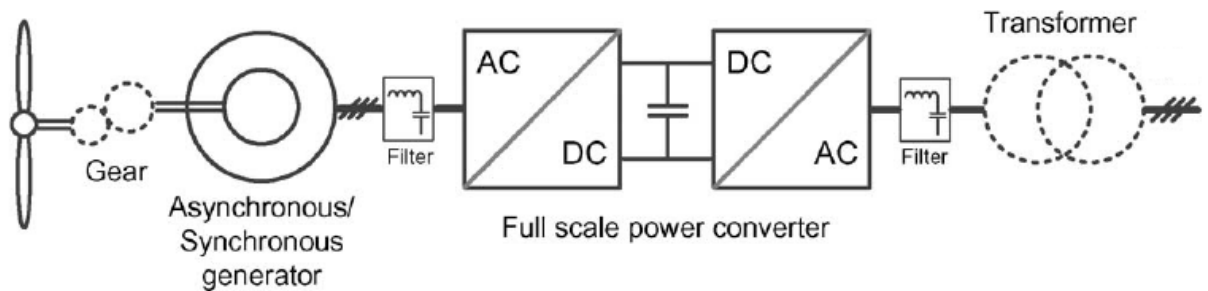


Рисунок 1.13. Електронний інтерфейс живлення змінного/постійного / змінного струму (AC / DC / AC) для вітрогенератора.

Інвертори, підключені до мережі, будуть подавати активну потужність в мережу з мінімальними сумарними гармонійними спотвореннями (THD) вихідного струму і напруги. Мережева напруга і вихідна напруга інвертора будуть синхронізовані за допомогою схеми перетину нуля. Генератор може бути асинхронним генератором з самозбудженням (SEIG) або синхронним генератором з постійними магнітами (PMSG). Обмотки статора підключаються до навантаження або до мережі через повномасштабний перетворювач потужності. Деякі вітротурбіни зі змінною швидкістю є безредукторними. У цих випадках використовується багатополісний генератор з прямим приводом.

1.3.2. Силкові електронні перетворювачі для вітротурбінної системи

Генератор з постійними магнітами не має Управління збудженням, а вихідна напруга пропорційно частоті обертання ротора. Тому при управлінні вітряною турбіною частота обертання ротора визначається за допомогою вимірювання вихідної напруги. Найбільш рання і все ще найбільш широко використовувана силова електронна схема для цього додатка використовує

технологію AC / DC / AC, в якій змінна частота, змінна напруга від генератора спочатку випрямляється до постійного струму, а потім перетворюється в змінний струм і подається в мережу або навантаження. Безперервна зміна швидкості вітру призведе до неконтрольованого зміни напруги на лінії постійного струму. Щоб забезпечити роботу зі змінною швидкістю і стабільну напругу на шині постійного струму, в канал постійного струму може бути вставлений підвищуючий перетворювач постійного струму. Оскільки активна потужність надходить однонаправлено від PMSG до лінії постійного струму через перетворювач потужності, для отримання економічного рішення до перетворювача на стороні генератора може бути застосований тільки простий діодний випрямляч.

1.3.3. Перетворювачі змінного/постійного / змінного струму для силового електронного інтерфейсу

1. Трифазний мостовий випрямляч

Трифазний мостовий випрямляч зазвичай використовується в вітроенергетиці. Це двухполуперіодний випрямляч, який видає шестімпульсні коливання вихідної напруги. Кожен з шести діодів проводить струм на 120° . Пара діодів, які підключені між цією парою ліній живлення, що мають найбільшу миттєву напругу між лініями, буде проводити. Трифазний Мостовий випрямляч показаний на рисунку 1.14.

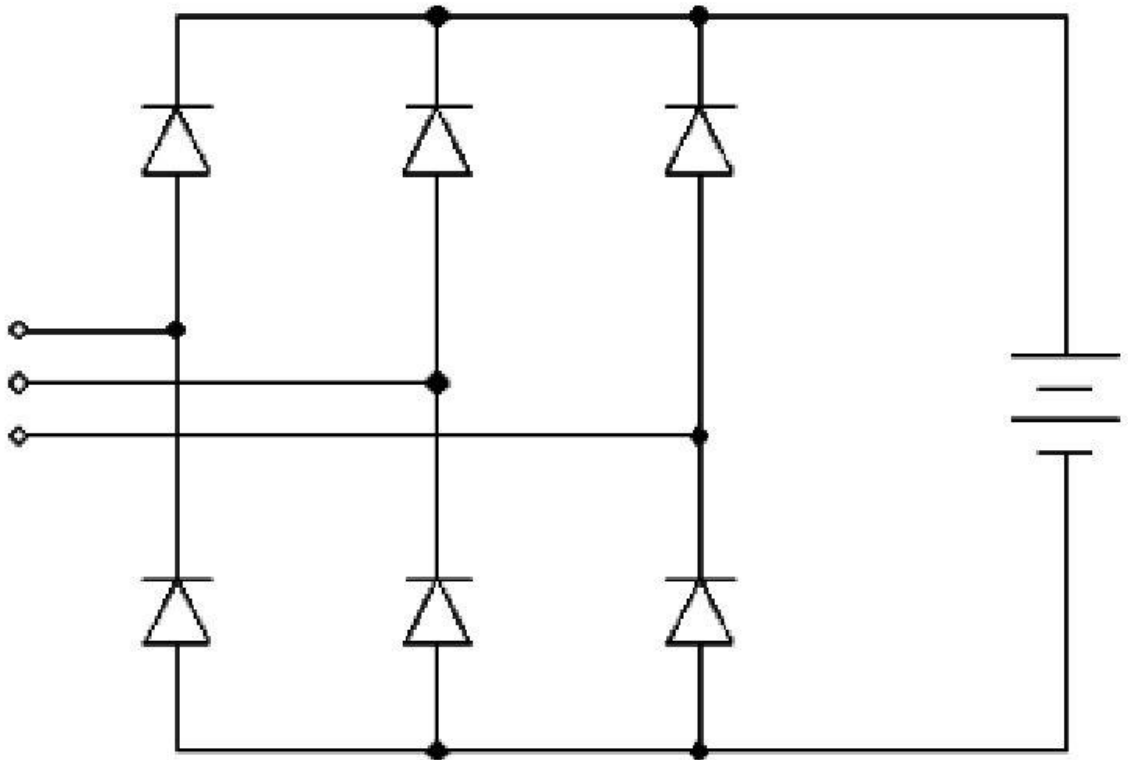


Рисунок 1.14. Трифазний Мостовий випрямляч.

2. Перетворювачі постійного / постійного струму

Перетворювачі постійного струму можуть використовуватися в якості регуляторів перемикання режимів для перетворення постійної напруги, зазвичай нерегульованого, в регульоване вихідна напруга постійного струму. Регулювання зазвичай досягається за допомогою ШІМ на фіксованій частоті, а перемикаючим пристроєм зазвичай є IGBT або MOSFET. Наступний ряд перетворювачів постійного струму в постійний, в яких вхід і вихід мають загальну зворотну лінію, часто називають "триполіусними перемикаючими регуляторами".

Перемикаючі регулятори часто заміняють лінійні регулятори, коли потрібна більш висока ефективність. Вони характеризуються використанням дроселя, а не трансформатора між вхідною і вихідною лініями. Перемикаючий регулятор відрізняється від свого лінійного аналога тим, що

для регулювання використовуються перемикаючі, а не лінійні методи, що призводить до більш високої ефективності і більш широким діапазоном напруг. Крім того, на відміну від лінійного регулятора, в якому вихідна напруга завжди має бути менше живить. Перемикаючий регулятор може забезпечувати виходи, які рівні, нижче, вище або мають зворотну полярність по відношенню до входу. Існує чотири основні топології перемикаючих регуляторів:

Понижуючі регулятори: у понижуючих регуляторах вихідна напруга буде тієї ж полярності, але завжди нижче вхідної напруги. Одна лінія живлення повинна бути загальною як для входу, так і для виходу. Це може бути як позитивна, так і негативна лінія, в залежності від конструкції регулятора.

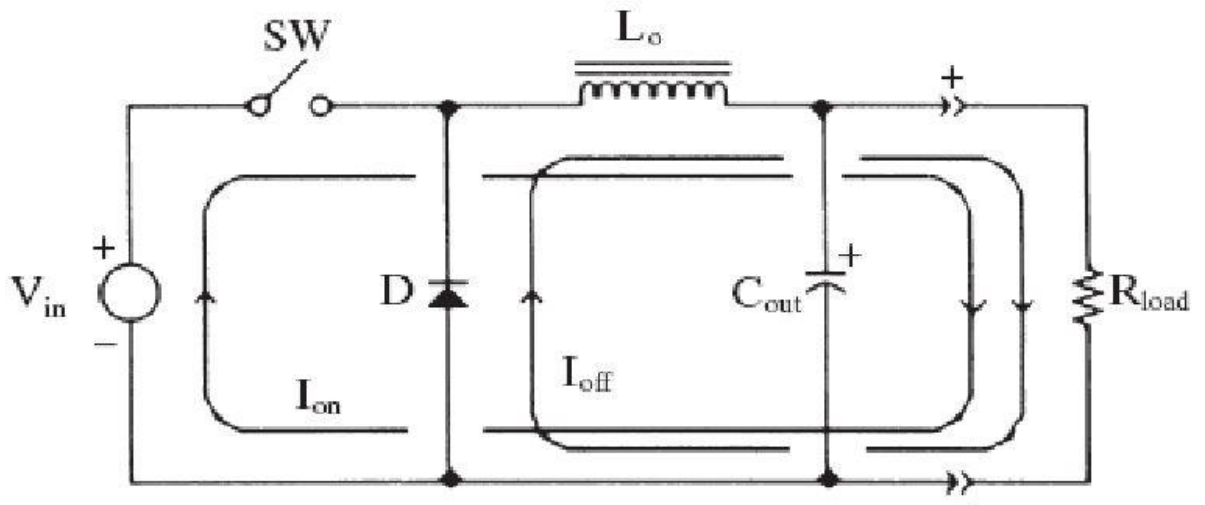


Рисунок 1.15. Базова схема регулятора перемикання понижувальної напруги

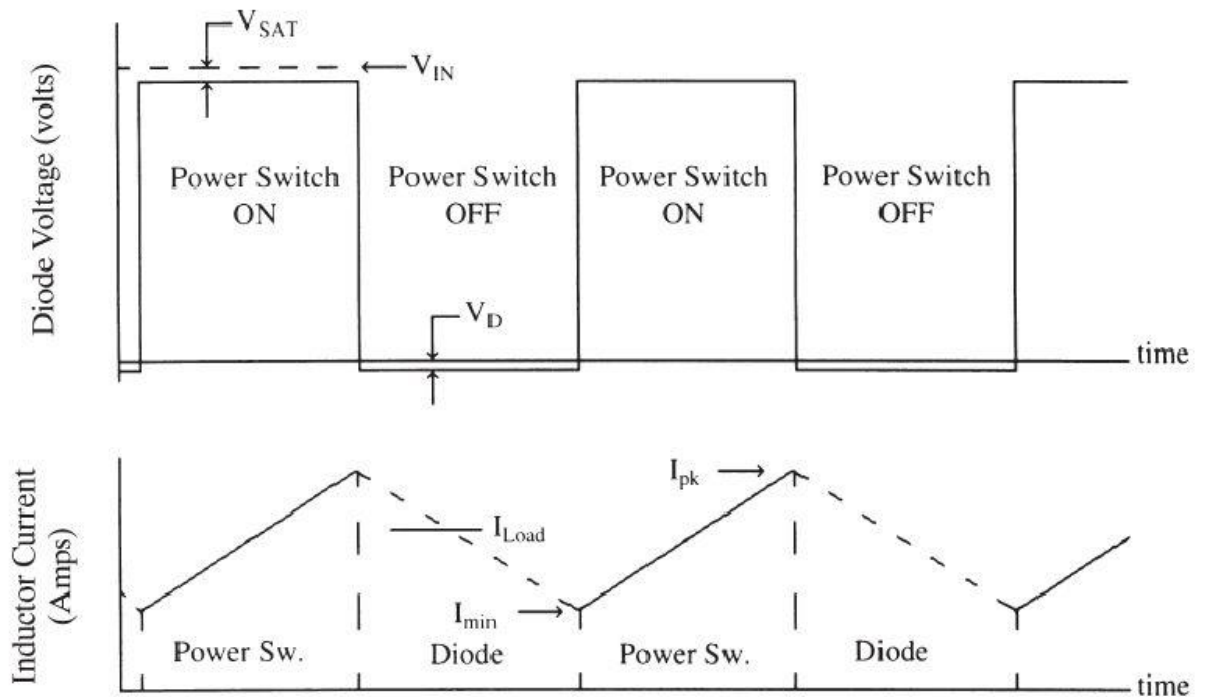


Рисунок 1.16 Форми сигналів напруги і струму для понижуючого перетворювача

Регулятори підвищення: у регуляторі підвищення вихідна напруга буде тієї ж полярності, але завжди вище вхідної напруги. Одна лінія живлення повинна бути загальною як для входу, так і для виходу. Це може бути як позитивна, так і негативна лінія, в залежності від конструкції. Регулятор наддуву має нуль у правій напівплощині в передавальній функції.

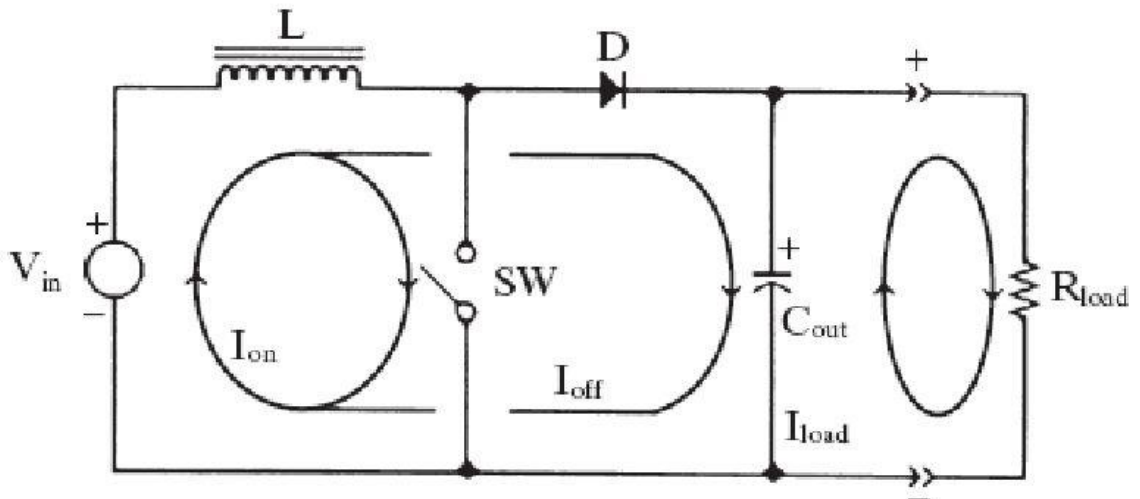


Рисунок 1.17. Базова схема регулятора перемикування наддуву

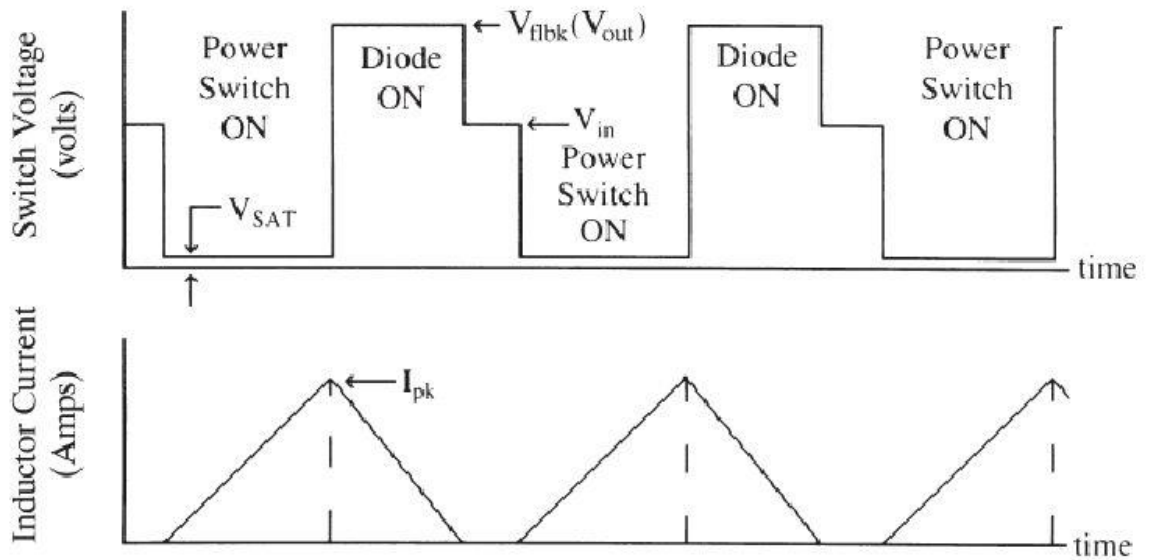


Рисунок 1.18. Форми сигналів для підвищувального перетворювача з переривчастим режимом.

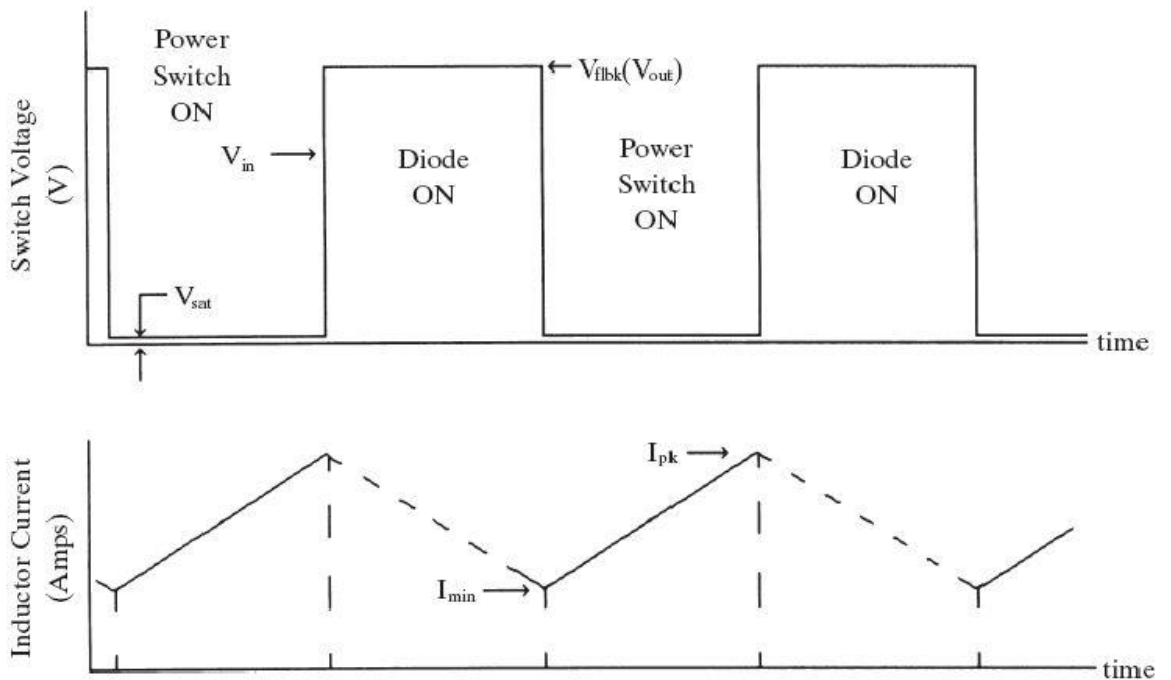


Рисунок 1.19. Форми сигналів для підвищувального перетворювача безперервного режиму.

Регулятори понижуючого типу: через комбінацію регуляторів пониження і підвищення цей тип відомий як регулятор "понижуючого тиску". У цьому типі вихідна напруга має полярність, протилежну вхідній, але його значення може бути вище, дорівнює або нижче вхідного. Одна лінія живлення повинна бути загальною як для входу, так і для виходу, і по конструкції можлива будь-яка полярність. Інвертуючий регулятор передає нуль правої напівплощини регулятора наддуву в його передавальну функцію.

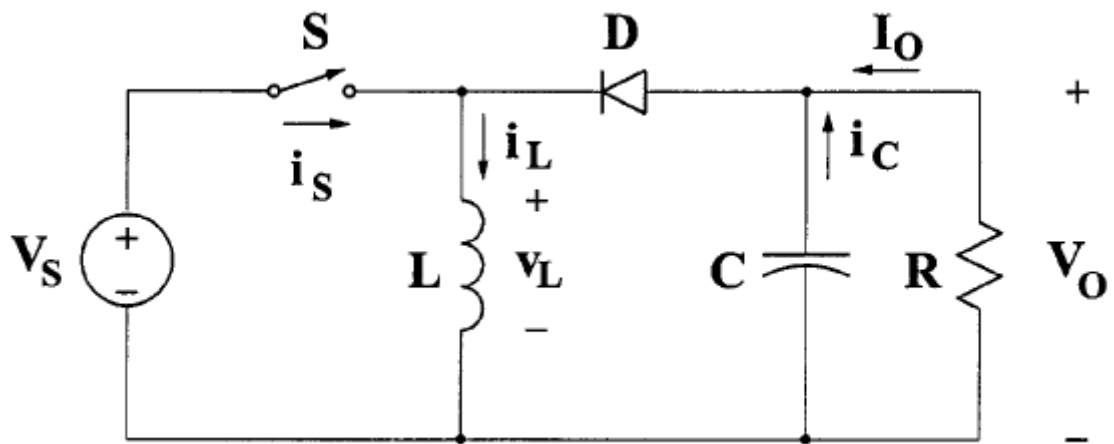


Рисунок 1.20. Базова схема перемикає регулятора зі знижувальним коефіцієнтом посилення

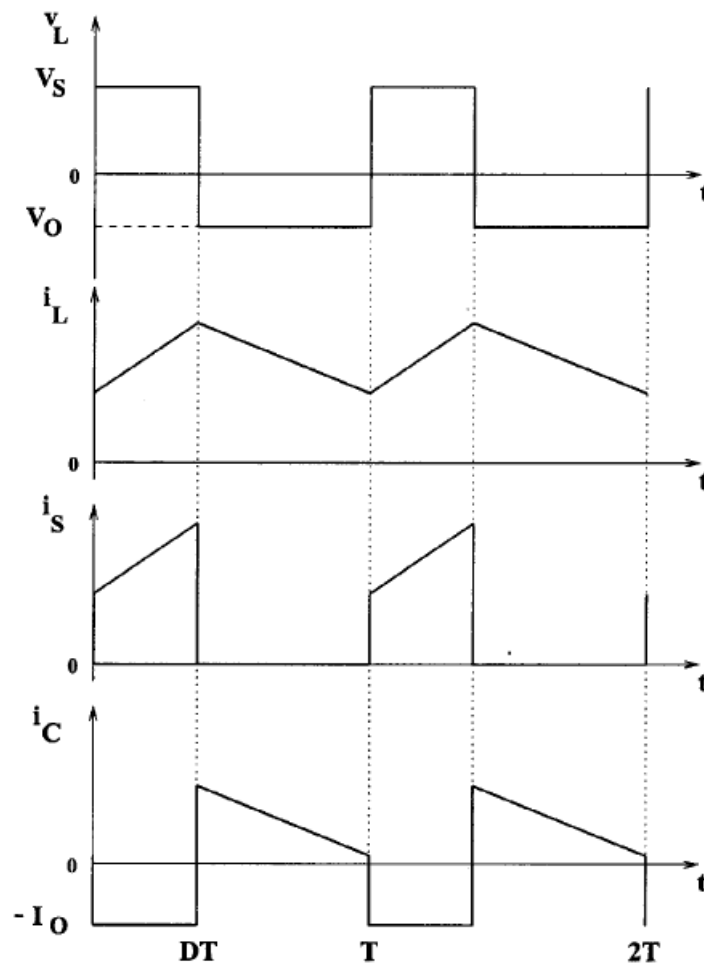


Рисунок 1.21. Форми сигналів напруги і струму для понижуючого перетворювача

Регулятори Сук: це відносно новий клас регуляторів з підвищенням напруги, в яких вихідна напруга буде зворотним, але може бути рівним, вище або нижче вхідного. Знову ж таки, одна лінія живлення повинна бути загальною як для входу, так і для виходу, і будь-яка полярність може бути передбачена конструкцією. Цей регулятор, отриманий з комбінації регуляторів підвищення і зниження, також переносить нуль правої напівплощини в свою передавальну функцію.

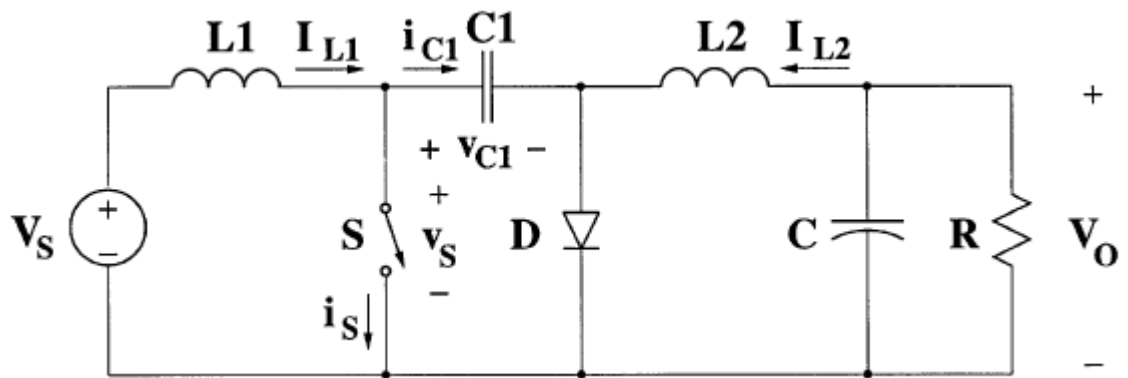


Рисунок 1.22. Базова схема перемикаючого регулятора сик

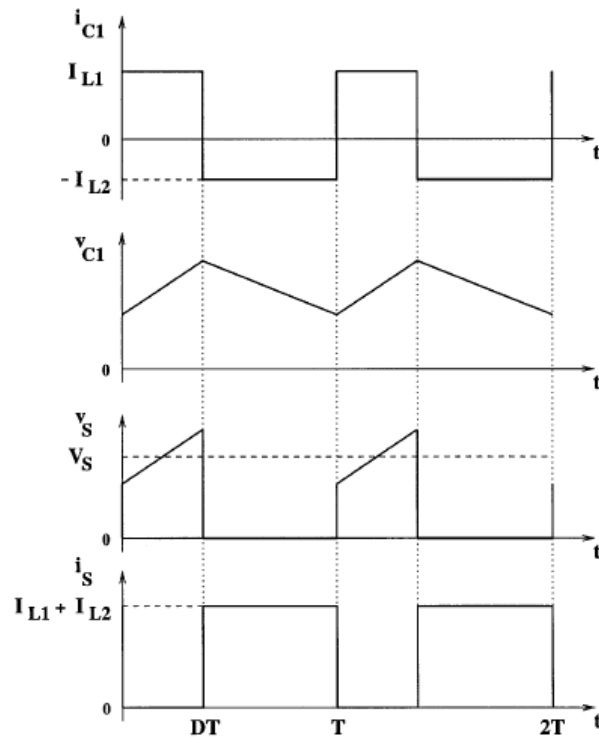


Рисунок 1.23. Форми сигналів напруги та струму для перетворювача сик

3. Інвертори

Перетворювачі постійного струму в змінний відомі як Інвертори. Функція інвертора полягає в зміні входної напруги постійного струму на симетричне вихідна напруга змінного струму необхідної величини і частоти. Вихідна напруга може бути фіксованою або змінною з фіксованою або змінною частотою. Змінна вихідна напруга може бути отримана шляхом

зміни вхідної постійної напруги і підтримки постійного коефіцієнта посилення інвертора. Форма вихідної напруги ідеальних інверторів повинна бути синусоїдальною. Однак форми сигналів практичних інверторів не є синусоїдальними і містять певні гармоніки.

Для синусоїдальних виходів змінного струму величина, частота і фаза повинні бути керованими. Інвертори зазвичай використовують керуючі сигнали PWM для створення вихідної напруги змінного струму. Залежно від типу вихідного сигналу змінного струму ці топології можна розглядати як Інвертори джерела напруги (VSI), де незалежно керований вихідний сигнал змінного струму являє собою сигнал напруги. Ці конструкції найбільш широко використовуються в невеликих вітроенергетичних установках. Аналогічно, ці топології можна знайти у вигляді інверторів джерела струму (CSI), де незалежно керований вихід змінного струму являє собою форму хвилі струму. Ці конструкції не знаходять широкого застосування в невеликих вітроенергетичних установках.

Інвертори в широкому сенсі можна розділити на два типи: однофазні інвертори і трифазні Інвертори.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ІЗ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ

Електромеханічна система ВЕУ зі змінною швидкістю обертання представлена рисунку 2.1

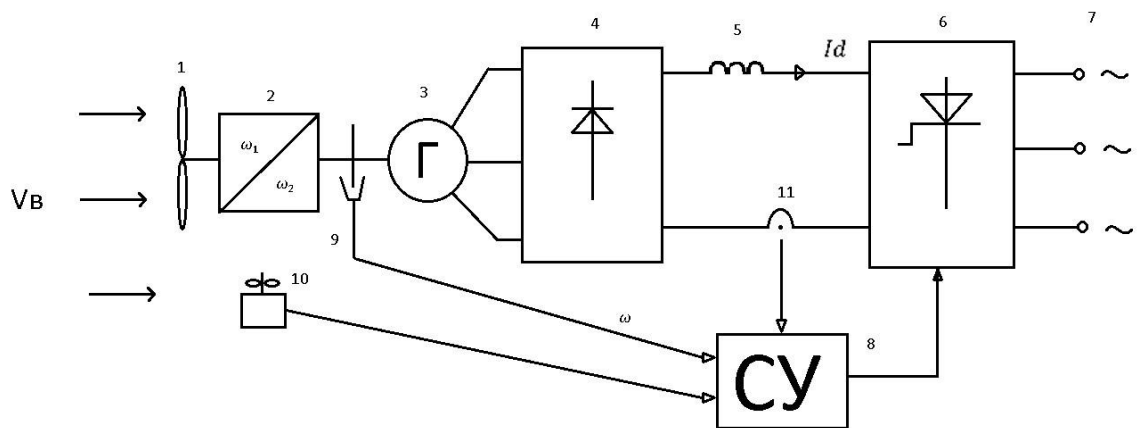


Рисунок 2.1. Електромеханічна система вітроенергетичної установки зі змінною швидкістю обертання

Де:

- 1 – віротурбіна;
- 2 – мультиплікатор;
- 3 – генератор;
- 4 – випрямляч;
- 5-індуктивний фільтр;
- 6 – ведений мережею інвертор;
- 7 – мережа (енергосистема);

8 – система управління;

9 – датчик швидкості обертання;

10 – датчик швидкості вітру V_B ;

11 – датчик струму у ланці постійного струму.

Механічна (аеро-механічна) підсистема ВЕУ може бути представлена у вигляді еквівалентної математичної схеми (рисунок 2.2)

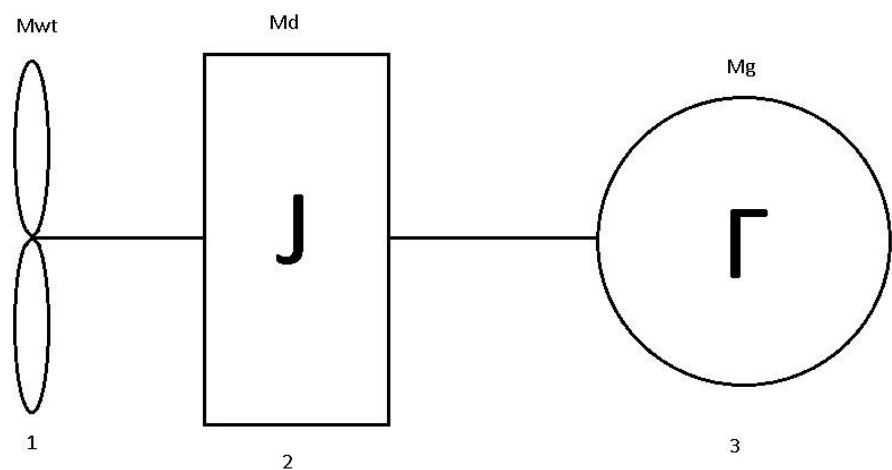


Рисунок 2.2. еквівалентна математична схема

Де:

1 - вітротурбіна (джерело механічної потужності), вона створює крутний момент M_{wt} ;

2 – сумарний момент інерції мас, що обертаються (включаючи вітротурбіну, ротор генератора, вал генератора та мультиплікатор. Причому

вся система приведена до ваги вітротурбіни, яка обертається зі швидкістю ω [рад/с];

3 – Генератор.

Ця система описується головним рівнянням руху електромеханічної системи :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{wt} - M_g \quad (2.1)$$

Де:

J – момент інерції сумарних мас, що обертаються;

ω - швидкість обертання вітротурбіни (ВТ);

M_{wt} - момент, створюваний вітротурбіною;

M_g - момент, що створюється генератором.

Вітротурбіна обертає генератор через мультиплікатор, так як, у загальному випадку, швидкість обертання вітротурбіни значно менша за швидкість обертання генератора (Γ).

Так як вітротурбіна і генератор можуть обертатися з різними швидкостями, залежно від режиму роботи вітроенергетичної установки, між генератором і мережею повинен бути встановлений перетворювач частоти.

Він складається з некерованого випрямляча, інвертора веденого мережею та індуктивного фільтра.

Завдання (управління) режиму роботи електромеханічної системи ВЕУ

(ЕМСВЕУ) здійснюється за допомогою зміни кута випередження інвертора β , який формує система управління (СУ) на основі показань датчиків: вітру, швидкості обертання ВТ, та струму у ланці постійного струму.

Датчик струму необхідний непрямого визначення електромагнітного моменту генератора, оскільки $M_g \sim I_d$

Механічна характеристика ВТ має вигляд зображений рисунку 2.3

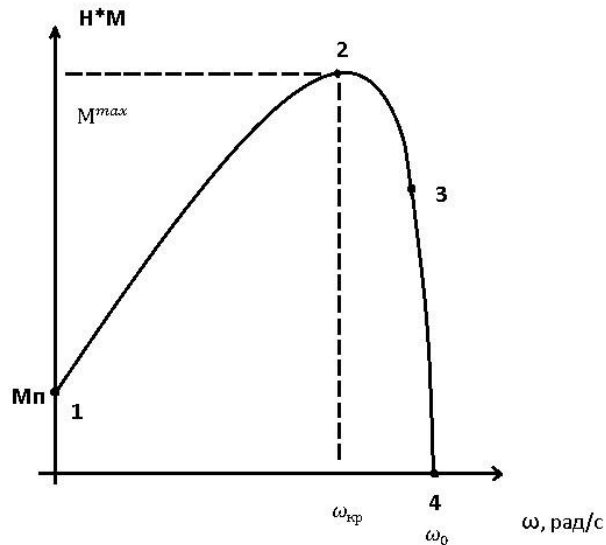


Рисунок 2.3. Механічна характеристика ВТ

Вона має характерні точки:

- 1 – пусковий момент ВТ;
- 2 – точка максимального моменту;
- 3 – точка максимального відбору потужності;
- 4 – точка холостого ходу ВТ.

При незмінній аеродинамічній характеристиці ВТ і зміні швидкості вітрового потоку V_w , механічна характеристика ВТ має вигляд сімейства (рисунок 2.4).

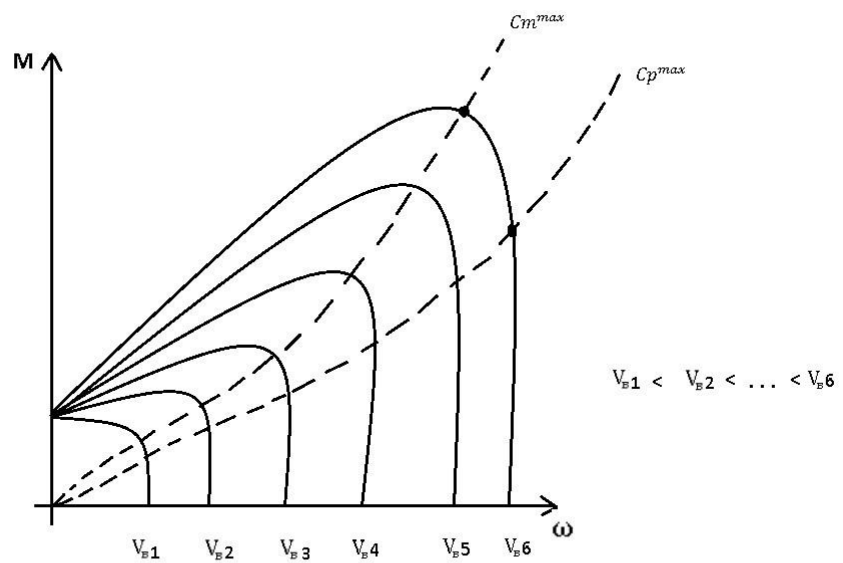


Рисунок 2.4. механічна характеристика ВТ , при незмінній аеродинамічній характеристиці ВТ і зміні швидкості вітрового потоку

Причому точки 2 та 3 (рисунок 2.3) вибудовуються в лінію C_p^{max} та C_t^{max} при зміні V в часі.

У завдання СУ входить підтримка такої швидкості обертання ВТ, яка при різних значеннях швидкості вітру V_B встановлювала таку швидкість, щоб система знаходилася завжди в режимі C_p^{max} .

Система управління будується за принципом регулювання заданої швидкості з допомогою ланцюга зворотний зв'язок.

Блок схема СУ представлена рисунку 2.5

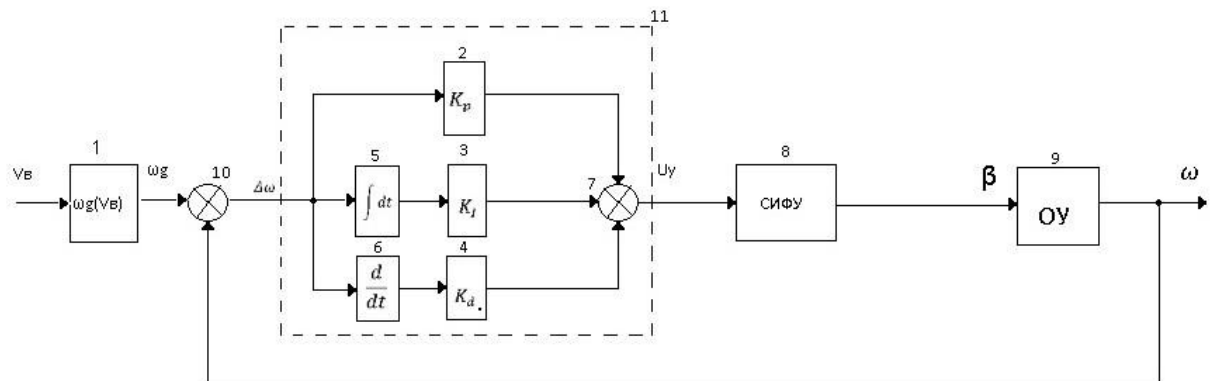


Рисунок 2.5. Блок схема системи управління

Блок 1 здійснює розрахунок оптимальної швидкості обертання вітрогенератора

ω_{opt}

$$\omega_{opt}(V_B) = \omega_z \quad (2.2)$$

Як функція швидкості вітрового потоку.

Як відомо з теорії вітрогенератора оптимальна швидкість обертання, що забезпечує максимальний відбір потужності, має пряму функціональну

залежність від швидкості вітрового потоку V_B . Дійсно, за визначенням швидкохідності:

$$Z = \frac{\omega * R_{WT}}{V_B} \quad (2.3)$$

Де:

Z – швидкохідність ВТ;

ω – кутова швидкість ВТ;

V_B – швидкість вітрового потоку;

R_{WT} – радіус вітротурбіни.

Оптимальний відбір потужності здійснюється за оптимальної швидкохідності Z_{opt} . Причому Z_{opt} є константою (2.4):

$$Z_{opt} = \text{const} \quad (2.4)$$

Для вітротурбіни з постійною аеродинамікою.

Тоді:

$$Z_{opt} = \frac{\omega_{opt} * R_{WT}}{V_B} \quad (2.5)$$

З формули (5) може бути отримано коефіцієнт пропорційності залежності $\omega_{opt} = f(V_B)$.

$$\omega_{opt} = \frac{Z_{opt} * V_B}{R_{WT}} = K_{opt} * V_B \quad (2.6)$$

Де:

$$K_{opt} = \frac{Z_{opt}}{R_{WT}} \quad (2.7)$$

Вичитувач 10 (на рис. 2.5) здійснює порівняння заданого значення швидкості обертання ω_z з фактичним значенням швидкості обертання ВТ - ω ,

що визначається за допомогою датчика кутової швидкості (див. рис. 2.1). Воно визначається виході об'єкта управління (9 на рис. 2.5).

В результаті цей блок розраховує величину помилки за кутовою швидкістю – $\Delta\omega$.

Виникає проблема визначення положення віднімача 10 (рис. 2.5) стосовно входів ω_z і ω . Для визначення знака входу ω використовуємо діаграму ланцюжка взаємодії всередині каналу зворотного зв'язку (рис. 2.6)

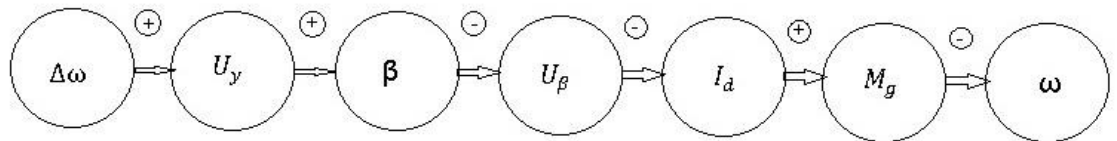


Рисунок 2.6. Діаграма причин-наслідків усередині каналу зворотного зв'язку з кутової швидкості.

На діаграмі позначено:

$\Delta\omega$ – помилка по кутовій швидкості;

U_y – сигнал управління ПІД-регулятора;

β – кут випередження інвертора веденого мережею;

U_β – напруга на вході інвертора;

I_d – струм у ланці постійного струму;

M_g – момент генератора;

ω – фактична кутова швидкість ВТ.

Знаки на стрілах діаграми (рис. 2.6) показують характер залежності двох величин (причини та наслідки). Знак + означає, що залежність має зростаючий характер, знак - що спадний.

Момент генератора є гальмівним моментом. Тому збільшення моменту генератора призводить до зменшення кутової швидкості. Тому у залежності $\omega = f(M_g)$ є спадна функція.

З теорії електричних машин, струм генератора пропорційний моменту генератора. Струм I_d – це випрямлений у некерованому випрямлячі струм генератора. Тому функція $M_g = f(I_d)$ – зростаюча.

Вхідна напруга інвертора веденого мережею з боку ланки постійного струму є проти - ЕРС контуру ланки постійного струму, так як воно є навантаженням у цьому локальному ланцюзі. Його напрямок є вітряним. Тому функція $I_d = f(U_\beta)$ є спадною.

Характеристика управління інвертора веденого мережею є косінусоїдальною функцією в діапазоні кутів $\beta = 0 - 90$ є спадною. Таким чином, залежність $U_\beta = f(\beta)$ також є спадною.

Вертикальна система формування імпульсів управління тиристорами інвертора веденого мережею передбачає пряму залежність сигналу управління та кута випередження інвертора.

ПІД регулятор містить паралельні канали, що мають позитивний характер залежності входу і виходу.

Таким чином вихідна діаграма (рис. 2.6) тракту зворотного зв'язку є інвертуючим, оскільки в тракті присутня непарна кількість ланок, що інвертують.

Для забезпечення негативного зворотного зв'язку загальна кількість інверсій у тракті зворотного зв'язку має бути непарною.

Тому вузол порівняння (10 на рис. 2.1) має реалізовувати функцію:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_3 \quad (8)$$

І мати вигляд (рис. 2.7)

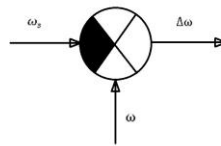


Рисунок 2.7. Вузол порівняння

Вузол (11 на рис.2.5) є ПІД-регулятор з коефіцієнтами K_p , K_I , K_d .

Вузол (8 на рис.2.5) є системою імпульсно-фазового управління моментом включення веденого мережею інвертора.

Проектований блок управління реалізує функцію, наведену на рисунку 2.5

Визначення частотних показників об'єкта управління.

Блок-схема моделі об'єкта управління представлена рисунку 2.8

При лінеаризації цієї моделі отримуємо блок-схему (рисунок 2.9)

Система диференціальних рівнянь системи ОУ має вигляд:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = M_{WT} - M_g \\ L_d \frac{dI_d}{dt} = U_\alpha - U_\beta - U_R \end{cases}$$

$$M_{WT} = K_{WT} * \omega$$

$$M_g = C_m * I_d$$

$$U_\alpha = C_E * \omega$$

$$U_R = R * I_d$$

$$U_\beta = K_{cos} * \beta$$

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = K_{WT} * \omega - C_m * I_d \\ L_d \frac{dI_d}{dt} = C_E * \omega - K_{cos} * \beta - R * I_d \end{cases} \quad (2.9)$$

Рівняння (9) може бути представлене у матричній формі рівнянь стану:

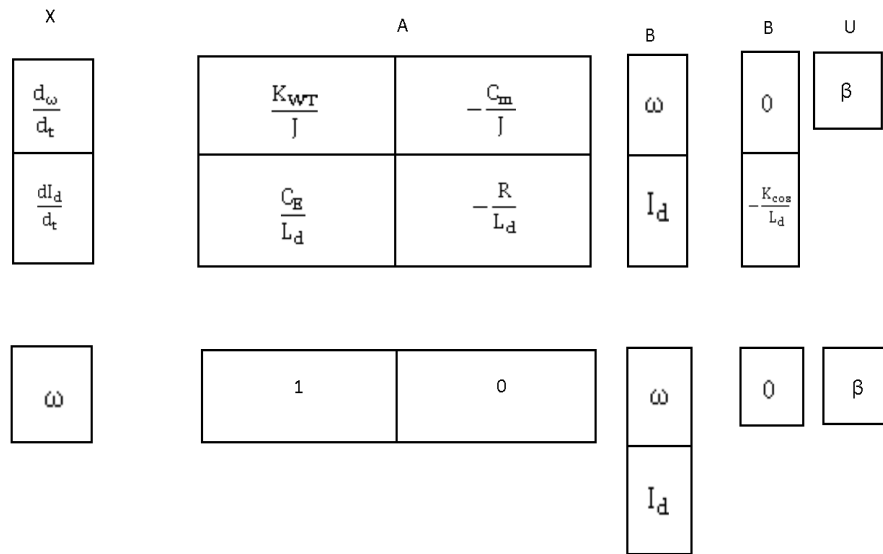
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (2.10)$$

Змінних станів тут 2 :

I_d та ω .

Тоді рівняння в змінних станах:

Матриця 3.1.



Передатна функція ланки визначається з матричного виразу:

$$W(p) = (A - pI)B \quad (2.11)$$

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ

3.1. Реалізація математичної моделі ВЕУ

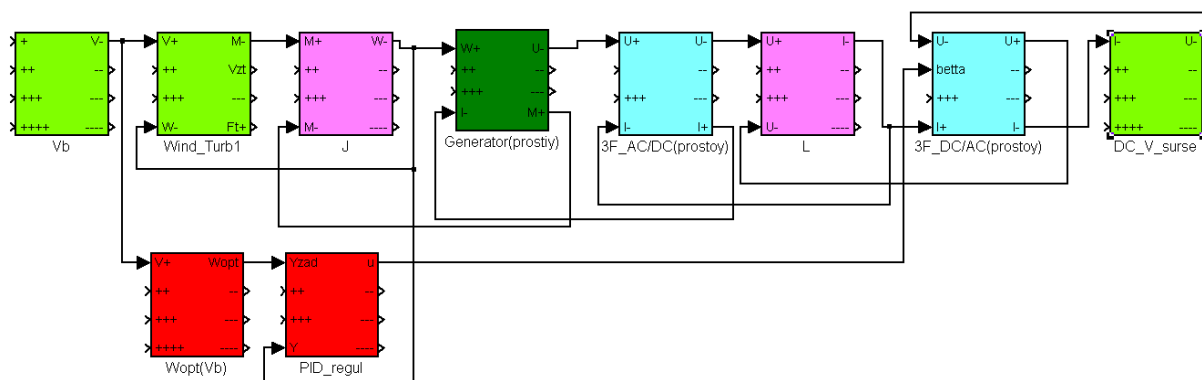


Рисунок 3.1. Загальна модель ВЕУ

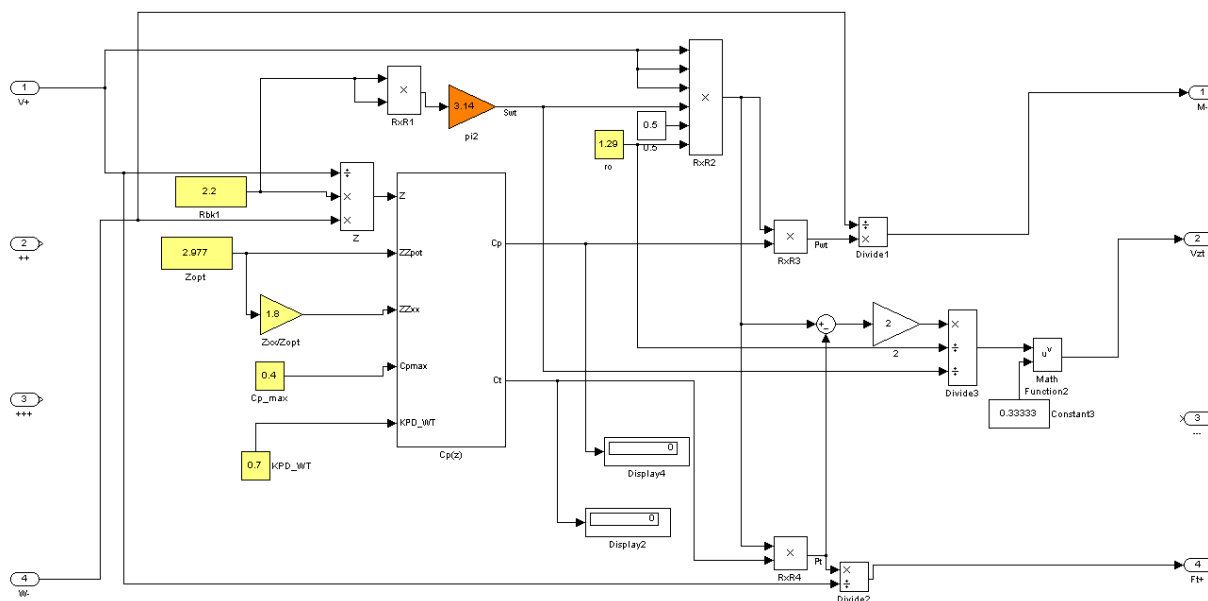


Рисунок 3.2. Підмодель вітротурбіни

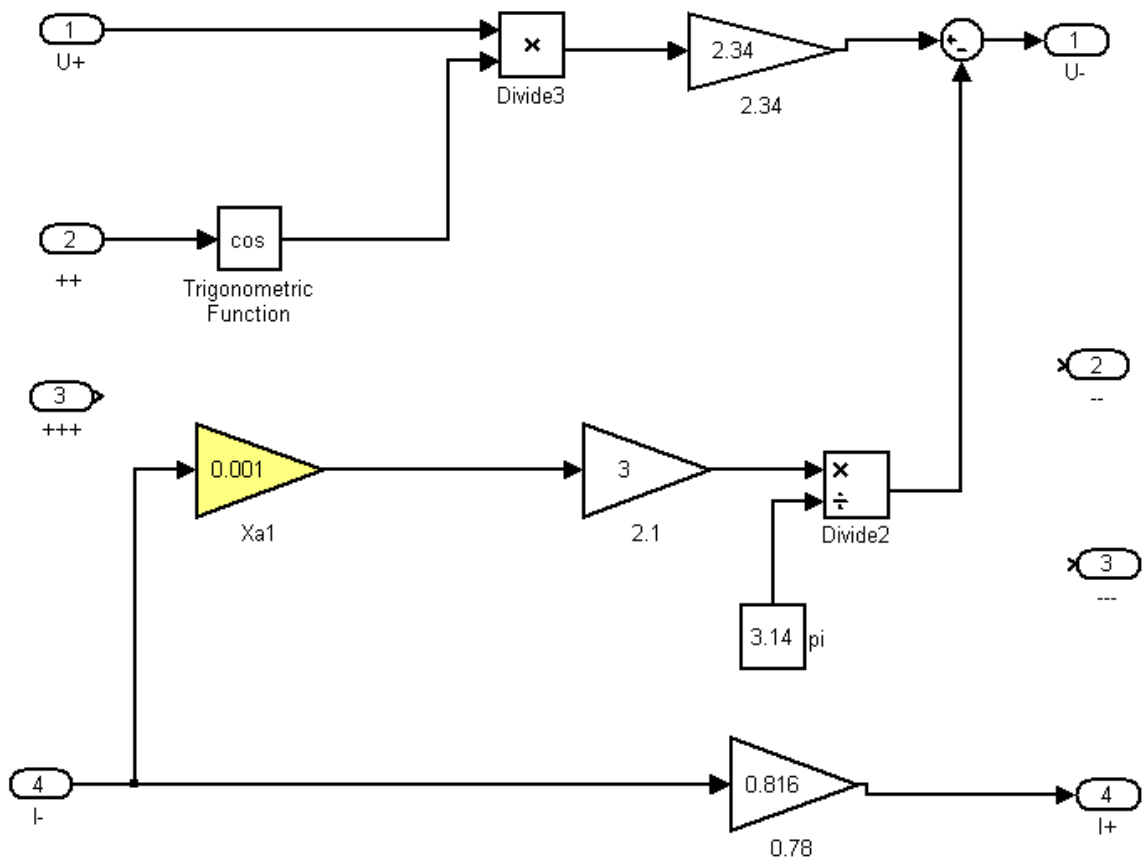


Рисунок 3.3. Підмодель некерованого випрямляча

3.2. Результати моделювання

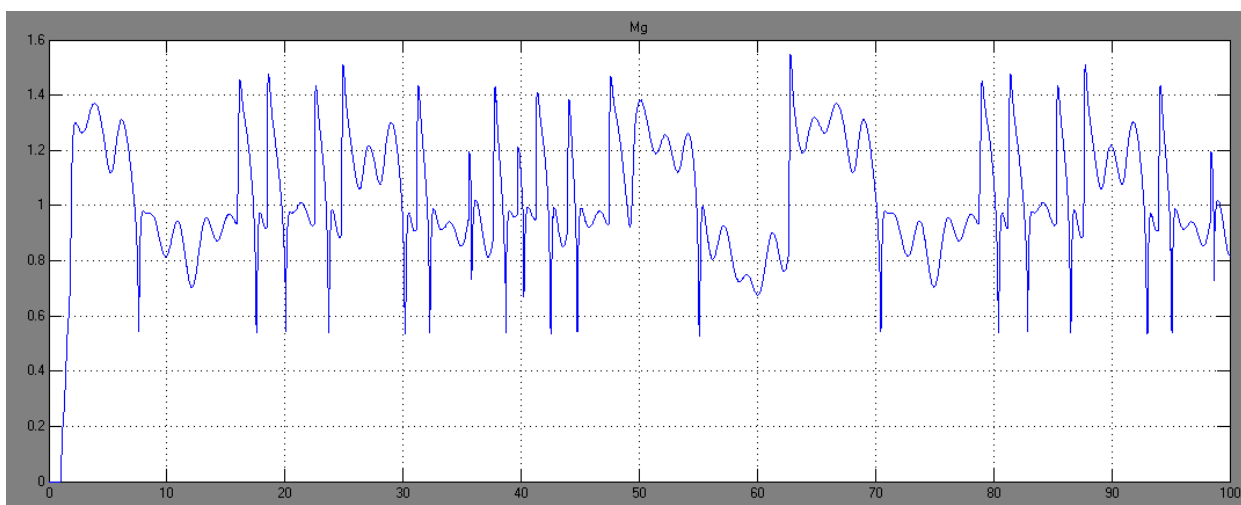


Рисунок 3.4. Результати моделювання – момент генератора

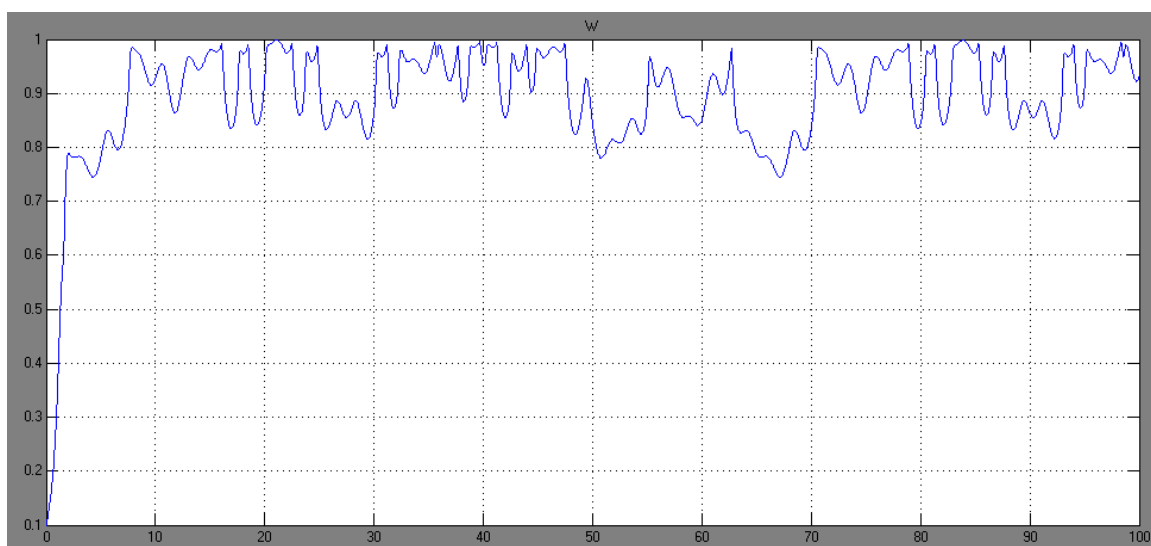


Рисунок 3.5. Результати моделювання – кутова швидкість генератора

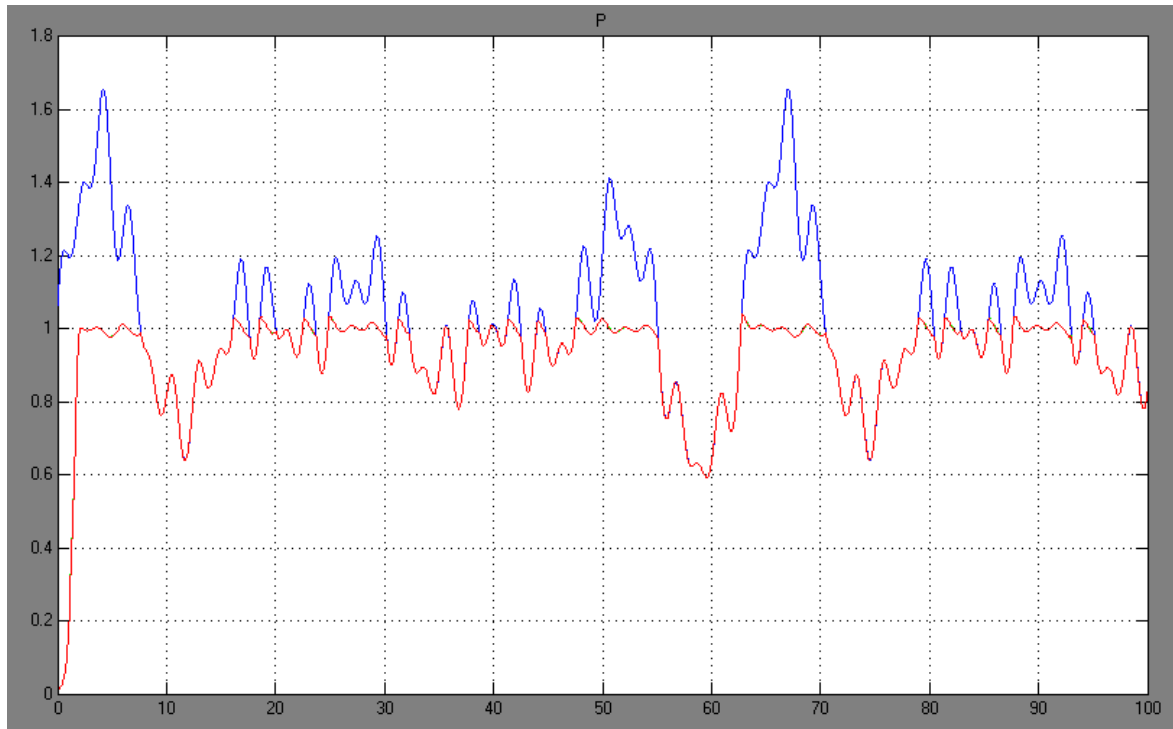


Рисунок 3.6. Потужність на виході системи у відносних одиницях.

Синя – оптимальна потужність без обмеження потужності.

Червона – з обмеженням потужності генератора аеродинамічним шляхом.

У режимі раціонального відбору потужності графіки збігаються, тобто. здійснюється оптимізація.

4 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

Модель управління проекту

1. Формуляр проекту

Формуляр проекту	
Завдання	№ проекту <u> 1 </u> Дата замовлення <u> 23.07.2020 </u> Назва проекту <u> Побудова ВЕУ підприємства "Вітропром" </u> _____ Замовник ПП <u> Савін Микола Володимирович </u> Адреса <u> м. Запоріжжя, пр. Добролюбова 38 </u> Контактна особа ПП <u> Савін Микола Володимирович </u> Тел. і факс <u> 123-432-66 </u>
Договірна ціна	Усього <u> 250000 </u> грн. План оплати <u> попередня оплата - 50% </u> Додаткові умови <u> - </u>
Строки	Початок <u> 25.07.2020 </u> кінець <u> 07.12.2020 </u> Проміжні строки <u> - - </u> _____
Партнери	Кооперація <u> _____ </u> _____ Субпідрядники <u> фірма "Wind energetics" </u>

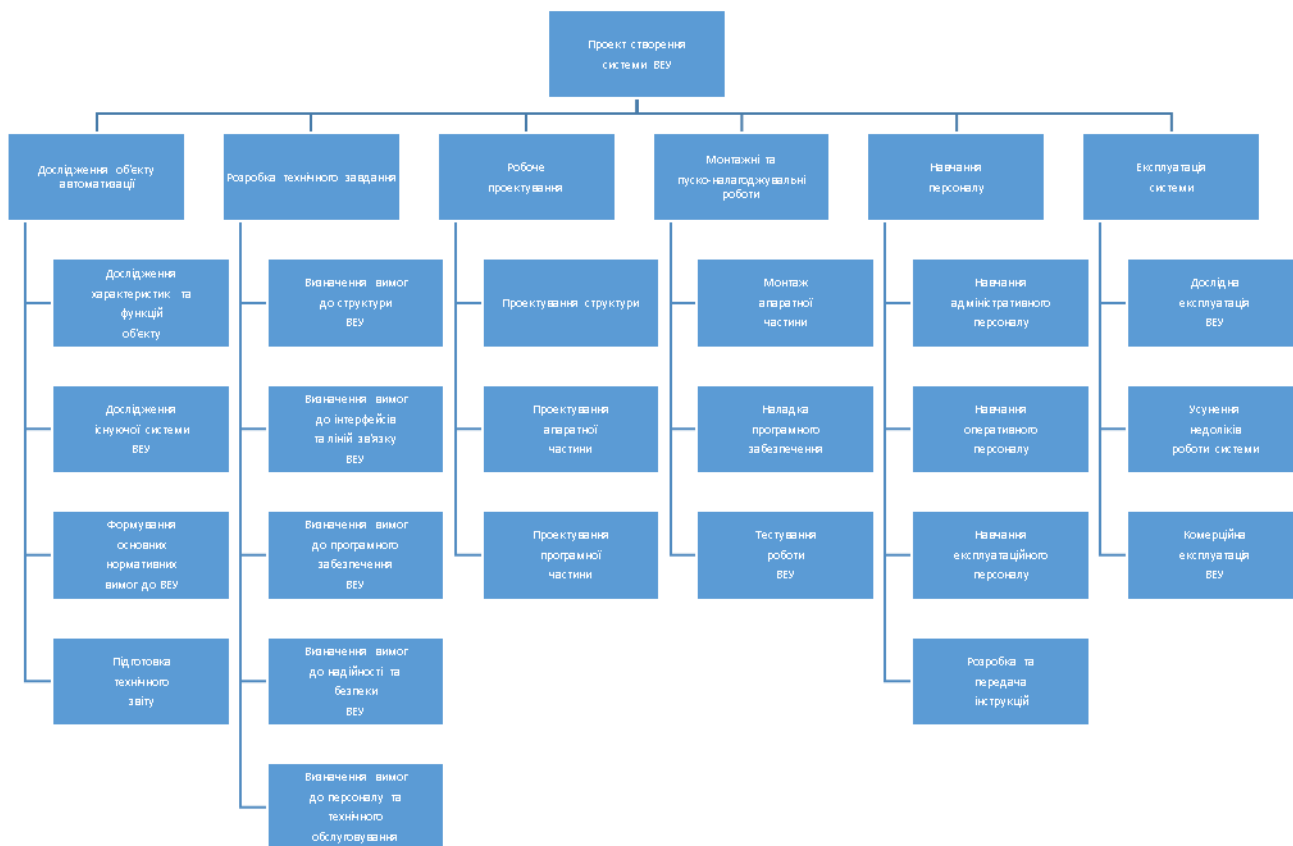
	Завдання <u>Розробка програмного забезпечення</u>
Персона л	Керівник <u>Шевченко Т.Г.</u> Заступник <u>Пупко І.В.</u> Співробітники <u>Костилов А.О.</u> <u>Павлов В.І.</u>
Проект	Скорочена назва <u>"Торнадо"</u> Цілі <u>Побудова ВЕУ</u> Критичні строки 1. <u>25.10.2020</u> (завершення дослідної експлуатації) ВЕУ) _____ 2. <u>07.12.2020</u> (завершення проекту) _____ 3. _____ Особливості та проблеми <u>Проблеми адаптації персоналу до нової ВЕУ</u>

2. Таблиця 4.1 - характеристика робіт за проектом

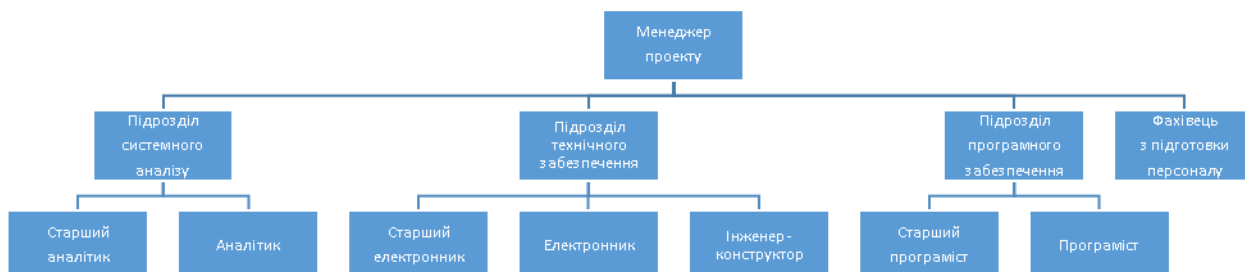
Характеристика робіт за проектом			
Код роботи	Назва чи зміст роботи	Безпосередньо попередня робота	Тривалість, діб
1.1.1	Дослідження характеристик та функцій об'єкту	-	8
1.1.2	Дослідження існуючої системи ВЕУ	-	4
1.1.3	Формування основних нормативних вимог до ВЕУ	-	4
1.1.4	Підготовка технічного звіту	1.1.1, 1.1.2, 1.1.3	3
1.2.1	Визначення вимог до структури ВЕУ	1.1.4	5
1.2.2	Визначення вимог до інтерфейсів та ліній зв'язку ВЕУ	1.1.4	4
1.2.3	Визначення вимог до програмного забезпечення ВЕУ	1.1.4	5
1.2.4	Визначення вимог до надійності та безпеки ВЕУ	1.1.4	3
1.2.5	Визначення вимог до персоналу та технічного обслуговування	1.1.4	3
1.3.1	Проектування структури	1.2.1, 1.2.4, 1.2.5	7

1.3.2	Проектування апаратної частини	1.2.2, 1.3.1, 1.2.3	15
1.3.3	Проектування програмної частини	1.2.3, 1.3.1	20
1.4.1	Монтаж апаратної частини	1.3.2, 1.3.3	10
1.4.2	Наладка програмного забезпечення	1.4.1	10
1.4.3	Тестування роботи ВЕУ	1.4.2	5
1.5.1	Навчання адміністративного персоналу	1.4.3	10
1.5.2	Навчання оперативного персоналу	1.4.3	25
1.5.3	Навчання експлуатаційного персоналу	1.4.3	15
1.5.4	Розробка та передача інструкцій	1.5.1, 1.5.2, 1.5.3	15
1.6.1	Дослідна експлуатація ВЕУ	1.5.4	10
1.6.2	Усунення недоліків роботи системи	1.6.1	10
1.6.3	Комерційна експлуатація ВЕУ	1.6.2	10

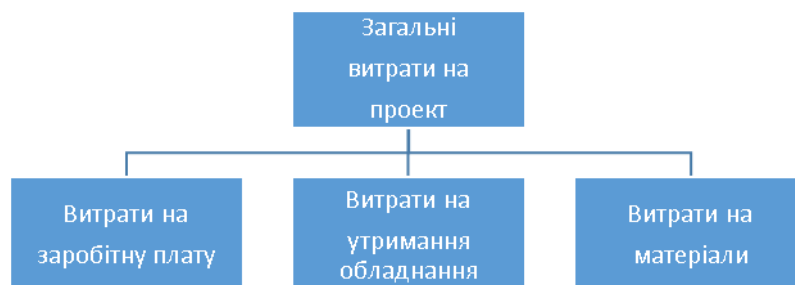
3. робоча структура проекту – WBS



4. Організаційна структура проекту - OBS



5. Структура затрат проекту - CBS

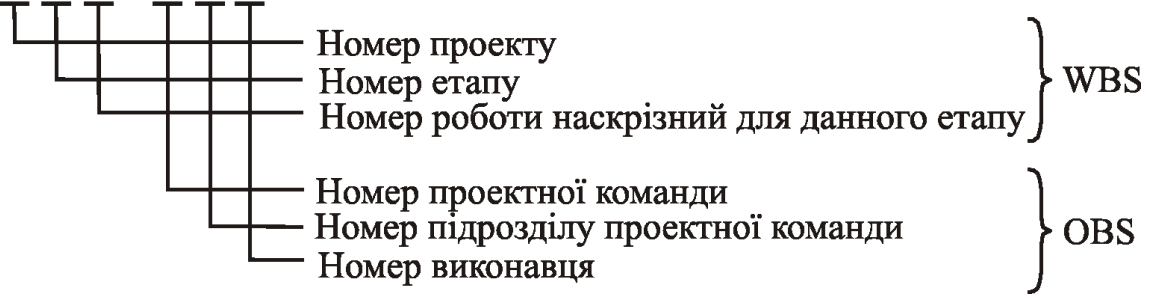


6. Матриця відповідальності

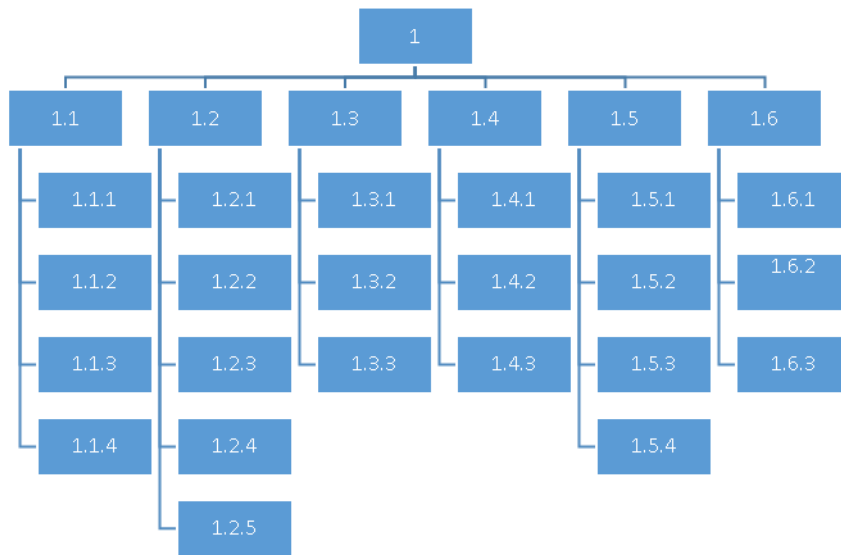
Виконавці		Матриця відповідальності																							
		Роботи																							
		Дослідження характеристик та	Дослідження існуючої системи ВЕУ	Формування основних нормативних	Підготовка технічного звіту	Визначення вимог до структури	Визначення вимог до інтерфейсів та	Визначення вимог до програмного	Визначення вимог до налійності та	Визначення вимог до персоналу та	Проектування структури	Проектування апаратної частини	Проектування програмної частини	Монтаж апаратної частини	Налалка програмного забезпечення	Тестування роботи ВЕУ	Навчання адміністративного	Навчання оперативного персоналу	Навчання експлуатаційного	Розробка та передача інструкцій	Дослідна експлуатація ВЕУ	Усунення недоліків роботи системи	Комерційна експлуатація ВЕУ		
Менеджер проекту				р						р	р						р	р	р	р	р			р	
Старший аналітик		р	р	р	s	р					р														
Аналітик		+	+	+	+	+	р																		
Старший електр						+	р					р	р								s	р			

7. Система кодування проекту

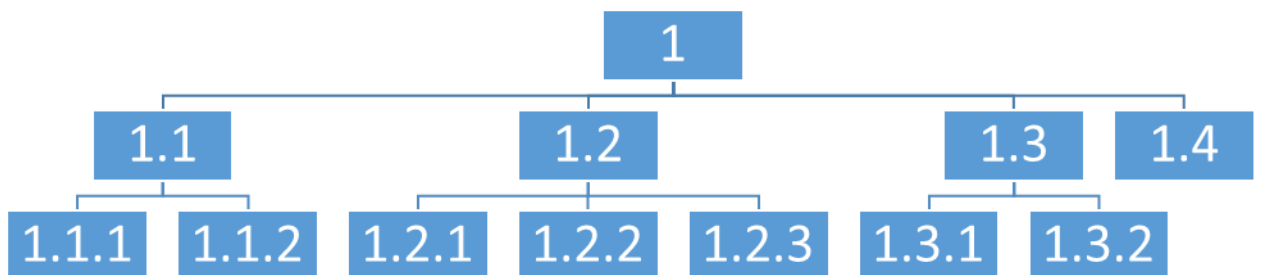
X.X.X - X.X.X



WBS



OBS



8. Таблиця 4.2. CTR - каталог

Но мер	Код роботи	Зміст роботи	Затрат и, грн	Триваліс ть, дні	Необхідні ресурси
1	1.1.1-1.1.2	Дослідження характеристик та функцій об'єкту	7000	8	Аналітики 2 особи
2	1.1.2-1.1.2	Дослідження існуючої системи ВЕУ	3000	4	Аналітики 2 особи
3	1.1.3-1.1.2	Формування основних нормативних вимог до ВЕУ	2500	4	Аналітики 2 особи
4	1.1.4-1.1.2	Підготовка технічного звіту	2500	3	Аналітики 2 особи
5	1.2.1-1.1.2	Визначення вимог до структури ВЕУ	2500	5	Аналітики 2 особи
6	1.2.2-1.2.3.1	Визначення вимог до інтерфейсів та ліній зв'язку ВЕУ	2500	4	Аналітик 1 особа Електронік 1 особа
7	1.2.3-1.3.1	Визначення вимог до програмного забезпечення ВЕУ	3000	5	Аналітик 1 особа Програміст 1 особа

8	1.2.4-1.3.1	Визначення вимог до надійності та безпеки ВЕУ	1500	3	Аналітик 1 особа Програміст 1 особа
9	1.2.5-1.4.0	Визначення вимог до персоналу та технічного обслуговування	2000	3	Фахівець з підготовки персоналу 1 особа
10	1.3.1-1.2.3	Проектування структури	6000	7	Інженер-конструктор 1 особа
11	1.3.2-1.2.3	Проектування апаратної частини	10000	15	Інженер-конструктор 1 особа
12	1.3.3-1.3.2	Проектування програмної частини	15000	20	Програмісти 2 особи ПК 2 шт
13	1.4.1-- 1.2.2	Монтаж апаратної частини	10000	10	Електроніки 2 особи Прилади та інструменти
14	1.4.2-1.3.2	Наладка програмного забезпечення	8000	10	Програмісти 2 особи ПК 2 шт
15	1.4.3-1.3.2	Тестування роботи ВЕУ	3000	5	Програмісти 2 особи ПК 2 шт

16	1.5.1-1.4.0	Навчання адміністративного персоналу	10000	10	Фахівець з підготовки персоналу 1 особа
17	1.5.2-1.4.0	Навчання оперативного персоналу	20000	25	Фахівець з підготовки персоналу 1 особа
18	1.5.3-1.4.0	Навчання експлуатаційного персоналу	10000	15	Фахівець з підготовки персоналу 1 особа
19	1.5.4-1.4.0	Розробка та передача інструкцій	10000	15	Фахівець з підготовки персоналу 1 особа
20	1.6.1-1.3.2	Дослідна експлуатація ВЕУ	5000	10	Програміст 1 особа
21	1.6.2-1.3.2	Усунення недоліків роботи системи	10000	10	Програміст 1 особа
22	1.6.3-1.3.2	Комерційна	5000	10	Програміст 1 особа

		експлуатація ВЕУ			
--	--	------------------	--	--	--

9. Сітковий план

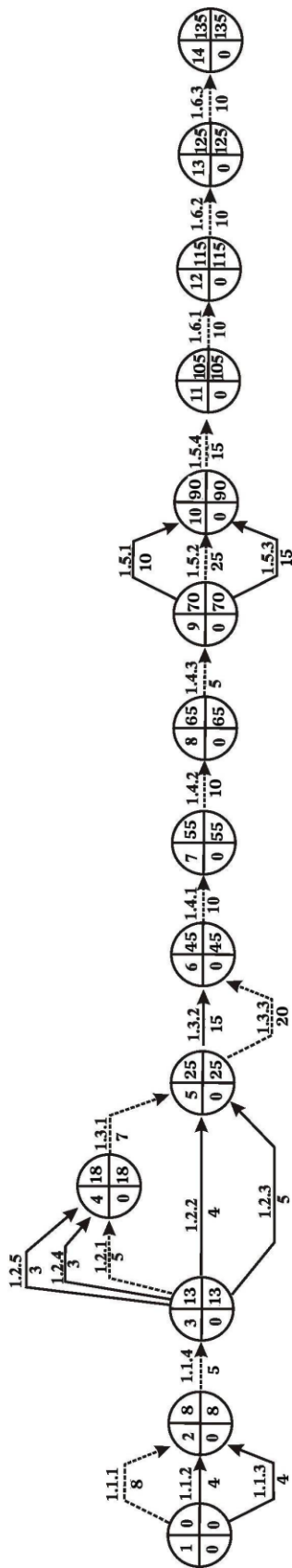


Рисунок 4.1. Сітковий план

10. Таблиця 4.3. Розрахунок тривалості проекту з урахуванням запасів часу

Код роботи	a_i	m_i	b_i	σ_i^2	t_i
111	5	8	10	0,69	7,8
114	3	5	8	0,69	5,2
121	2	3	6	0,44	3,3
131	5	7	10	0,69	7,2
133	17	20	25	1,78	20,3
141	8	10	12	0,44	10,0
142	8	10	12	0,44	10,0
143	3	5	8	0,69	5,2
152	22	25	30	1,78	25,3
154	12	15	18	1,00	15,0
161	8	10	12	0,44	10,0
162	8	10	12	0,44	10,0
163	8	10	12	0,44	10,0
				σ	t
				3,19	139

$$\varphi = F - 0.5 = 0.9 - 0.5 = 0.4 \quad (4.1)$$

По таблиці (Додаток 1) визначаємо $z = 1.29$.

Термін проекту $T = z \cdot \sigma + t = 1.29 \cdot 3.19 + 139 = 143$ діб

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1. Техніка безпеки

1) Загальні правила безпеки при монтажі вітроенергетичної установки

«Процес експлуатації вітроенергетичної установки вимагає уважного і відповідального ставлення. Пристрої, що входять до її складу можуть представляти при неправильній експлуатації або у важких погодних умовах джерело підвищеної небезпеки »:

Регулярно проводите технічне обслуговування обладнання.

Не намагайтеся виконувати ремонт або обслуговування вітроенергетичної установки самостійно. Дані роботи повинен виконувати професійний персонал.

Перевірте стан основних вузлів устаткування при його отриманні.

Не допускайте до експлуатації вітроенергетичної установки осіб, які не одержали необхідні інструкції.

Не допускайте дітей до компонентів вітроенергетичної установки, незалежно від стану системи.

Перед початком експлуатації необхідно ретельно оглянути вітрогенератор, переконатися в надійності кріплення лопатей, щогли, і всіх фланцевих з'єднань.

Перевірити, чи немає пошкоджень ізоляція проводів;

Під час роботи вітрогенератора не допускається торкатися до проводів, і робочої турбіни.

Запуск вітрогенератора повинен проводитися без підключеного навантаження.

Потужність передбачуваного навантаження не повинна перевищувати потужність підключеного до системи інвертора.

2) Електрична безпека

«Вітрогенератор обладнаний складними електронними пристроями, при розробці яких забезпечувався захист від електричних джерел небезпеки, пов'язаних з високими струмами. При підключенні цих та будь-яких інших електротехнічних пристроїв потрібно пам'ятати, що існують ризики, що створюються для людей протіканням електричного струму. Виділення тепла в електротехнічних системах часто є результатом протіканням надмірного струму по проводах з недостатнім перетином або через погані контакти. Акумулятори можуть викидати струми небезпечної величини. У разі короткого замикання в проводах, що йдуть від акумулятора, може виникнути пожежа. Щоб усунути цей ризик, необхідно встановити в ланцюгах, що підключаються до акумулятора, плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі відповідного номіналу »:

Не доторкатися до оголених електричних проводів і під'єднаних роз'ємів.

Не торкатися компонентів ВЕУ, вологими руками.

Не допускати попадання на компоненти ВЕУ (за винятком вітрогенератора і щогли) рідини і не ставити їх на вологу поверхню.

Стежити за тим, щоб електричні проводи і роз'єми були в справному стані.

Не використовуйте обладнання що перебуває в несправному стані: це може привести до аварії і ураження електричним струмом.

Не використовуйте ВЕУ до інших джерелом електричного живлення, наприклад, до місцевої електромережі. У тих випадках, коли передбачено

резервне підключення іншого джерела, воно повинно виконуватися кваліфікованим персоналом з урахуванням особливостей роботи обладнання.

Підключення до розподільних мереж об'єкта має проводитися при монтажі вітроенергетичної установки кваліфікованим персоналом в суворій відповідності з нормами і правилами улаштування електроустановок.

Тримати будь легкозаймисті та вибухонебезпечне речовина (бензин, масло, ганчір'я тощо) далеко від компонентів ВЕУ

Забороняється експлуатувати компоненти ВЕУ у вибухонебезпечному середовищі, так як в її електричних частинах можливе іскріння.

3) Механічна безпека

Обертання лопатей має велику небезпеку. Лопаті ротора вітрогенератора виготовлені з дуже міцного матеріалу.

Швидкість руху лопатей по зовнішньому діаметру обертання може перевершувати. При такій швидкості лопаті можуть нанести серйозну травму. Ні в якому разі не слід встановлювати турбіну в таких місцях, де можливий контакт людини з рухомими лопатями ротора.

Не можна встановлювати турбіну таким чином, що б хто-небудь міг опинитися на шляху руху лопатей.

Забороняється зупиняти вітроколесо при роботі віротурбіни, це дуже небезпечно.

Необхідно проводити всі роботи по обслуговуванню вітрогенератора тільки при повній зупинці вітроколеса і в безвітряну погоду.

5.2. Охорона праці

В вітрогенераторі передбачено грозовий захист. На гондолі вітрогенератора встановлений спеціальний загострений

штирблискавковідвід, а також влаштовано відповідне стандартам і нормативам заземлення. Необхідно стежити за станом заземлення. При порушеному заземленні удари блискавок можуть призвести до пожежі

В електротехнічних установках за правилами повинні використовуватися: ізоляція струмоведучих частин, елементи для здійснення захисного заземлення металевих неструмоведучих частин установки, які можуть опинитися під напругою (при порушенні ізоляції, режиму роботи устаткування і т.п.), елементи, що відключають установку від мережі, коли доступні для дотику частини установки виявляються під напругою, в тому числі і грозових розрядів, оболонки для запобігання можливості випадкового дотику до струмоведучих, рухомих, нагріваних частин установки. При необхідності установки повинні бути обладнані оглядовими вікнами, люками і засобами місцевого освітлення

До додаткових електрозахисних засобів в електроустановках до 1000 В відносяться:

- діелектричні калоші;
- діелектричні килими;
- ізолюючі підставки і накладки;
- ізолюючі ковпаки;

Працівники, які виконують роботи в електроустановках, повинні мати професійну підготовку, що відповідає характеру роботи.

Перевірка стану здоров'я працівника проводиться до прийому його на роботу, а також періодично, в порядку, передбаченому законодавством.

Електротехнічний персонал до допуску до самостійної роботи повинен бути навчений прийомам звільнення потерпілого від дії електричного струму, надання першої допомоги при нещасних випадках.

Якщо потерпілий торкається струмоведучих частин, необхідно, перш за все, звільнити його від дії електричного струму. При цьому слід мати на увазі, що торкатися до людини, що знаходиться під струмом, без застосування належних запобіжних заходів небезпечно для життя, який надає допомогу. Тому першою дією надаючого допомогу має бути швидке відключення тієї частини електроустановки, до якої торкається потерпілий.

5.2.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Пожежа завдає величезної матеріальної шкоди. Всі працюючі повинні проходити спеціальну протипожежну підготовку:

- протипожежний інструктаж (первинний і вторинний);
- заняття з пожежно-технічного мінімуму за спеціальною програмою.

Причинами пожежі в електроустановках є:

- - іскріння в електричних машинах і апаратах;
- струми короткого замикання і перевантаження, що приводять до займання ізоляції;
- іскріння від електростатичних розрядів і ударів блискавки;
- погані контакти в з'єднаннях проводів;
- електродуги між контактами комутаційних апаратів;
- електродуги під час зварювальних робіт;
- перевантаження або замикання в обмотках трансформатора при несправності релейного захисту;
- аварії з багатооб'ємними масляними вимикачами, що супроводжуються викидом продуктів розкладання масла і сумішей їх з повітрям

Причинами пожеж неелектричного характеру можуть бути:

- необережне поводження з вогнем при газозварювальних роботах або роботах з паяльною лампою;
- несправності печей і опалювальних приладів;
- несправності виробничого обладнання (нагрів підшипників, механічне іскріння);
- самозаймання деяких матеріалів.

Якщо палаюча електроустановка не відключена і знаходиться під напругою, то гасіння її становить небезпеку ураження електричним струмом. Як правило, гасити ручними засобами пожежу електроустаткування слід при знятій з нього напрузі. Якщо зняти напругу неможливо, то допускається гасіння установки, що знаходиться під напругою, але з дотримання особливих заходів.

Порошковий вогнегасник типу ОПС-10 наповнений в якості вогнегасного засобу сухим порошком (кальцинована або двовуглекисла сода, поташ та ін.). Вогнегасник складається з балона місткістю 10 л, заповненого вогнегасним порошком. До корпусу прикріплений балон з інертним газом (азот), що знаходяться під тиском близько 15 МПа. При відкритті вентиля порошок з балона напором газу виштовхується в шланг, а потім через розтруб подається до вогнища загоряння.

Усі працюючі проходять спеціальну протипожежну підготовку:

- протипожежний інструктаж (первинний і вторинний);
- заняття з пожежно-технічного мінімуму за спеціальною програмою.

На підприємствах для працюючих навколишнім середовищем є повітря робочих зон і прилеглих до них територій. Дуже важливу роль відіграє мікроклімат виробничих приміщень, який характеризується діючим на організм людини поєднанням температури, вологості, швидкості руху

повітря, а також тепловим і електромагнітними випромінюванням, вмістом в повітрі шкідливих речовин і наявністю певного рівня шуму і вібрацій.

Найважливішою складовою частиною повітря є кисень, необхідний для існування всієї живої природи. Основний виробник кисню рослинність. Тому для підтримки необхідної кількості кисню в атмосфері слід вживати заходів до збереження і розширення рослинного світу, в першу чергу лісів, необхідно збільшувати площі зелених насаджень в населених пунктах, а також на території захисних зон навколо виробничих будівель і промислових підприємств в цілому. З метою запобігання та обмеження негативного впливу вітроенергетичних установок необхідно проводити наступні заходи:

- враховувати характер ландшафту при розміщенні вітрогенераторів;
- при виборі місця розміщення вітрогенератора враховувати його вплив сприйняття під усіма відповідними кутами спостереження;
- підтримувати однаковий розмір і конструкцію вітрогенератора (наприклад, напрямок обертання, висоту);
- рівень шуму можна обмежити за рахунок використання турбін зі змінною швидкістю або лопастей із змінним кутом нахилу, що дозволяє знизити швидкість обертання.

5.2.3. Розрахунок заземлення

При пошкодженні ізоляції електроустановки її корпус та інші конструктивні елементи можуть опинитися під напругою. Якщо людина торкнеться такого пошкодженого обладнання, через нього пройде струм замикання на землю, який може бути небезпечним для життя.

Для захисту людини при дотику до металевих частин електроустановки, які випадково опинилися під напругою, застосовують захисне заземлення - навмисне з'єднання корпусу або інших металевих конструкцій установки із

землею. Призначення захисного заземлення – створення між корпусом електричного пристрою та землею електричного з'єднання з малим опором.

При дотику людини до заземленого обладнання, що опинилося під напругою, через його тіло пройде струм малої величини, безпечний для організму. Основний струм замикання на землю піде заземлюючим пристроєм. Заземлювальний пристрій - сукупність заземлювача та заземлюючих провідників. Заземлювач - металевий провідник, що у безпосередньому зіткненні із землею. Заземлювальні провідники з'єднують частини електроустановки, що заземлюються, із заземлювачем. Опір заземлювального пристрою в основному визначається опором розтікання струму із заземлювача в ґрунт.

Для заземлення використовують природні та штучні заземлювачі. Природні заземлювачі – арматура залізобетонних споруд, фундаменти будівель, трубопроводи та інші металеві конструкції, що мають надійний контакт із землею. Як штучні заземлювачі найчастіше використовують вертикально заглиблені сталеві труби, стрижні, куточки, з'єднані поверху сталевую горизонтальною смугою.

Опір заземлювального пристрою, до якого приєднані нейтралі трансформаторів або висновки джерел однофазного струму, у будь-який час рік повинен бути не більше 4 Ом відповідно при лінійній напрузі 380 джерела трифазного струму.

Опір розтіканню струму має перевищувати нормативної величини. Для електроустановок напругою до 1000 В нормативне значення становить 4 Ом, а якщо приєднана до мережі потужність не перевищує 100 кВА - 10 Ом.

Монтажна ділянка по складанню силового блоку приводу постійного струму знаходиться на першому поверсі двоповерхової цегляної будівлі, що окремо стоїть, розміром 20Ч10м. Потужність струму, що споживається

ділянкою, перевищує 100 кВА і тому нормативна величина опору заземлювача R_n не повинна перевищувати 4 Ом. Заземлювач передбачається виконати із сталевих вертикальних стрижневих електродів довжиною $l_v = 1,5$ м, діаметром $d = 0,02$ м, верхні кінці яких розташовані на глибині $t_0 = 0,8$ м. Вертикальні електроди з'єднані між собою за допомогою горизонтального електрода - сталеві смуги перетином 4x40 мм, покладеної землі на глибині $t_0 = 0,8$ м. Вертикальні електроди розташовані з відривом $a = 3$ м друг від друга. Тип заземлювача вибираємо контурний по периметру ділянки.

Вибираємо 3 кліматичну зону.

Визначаємо коефіцієнт сезонності φ для однорідної землі: $\varphi_v = 1,2$; $\varphi_g = 2$.

Питомий опір однорідного ґрунту (суглинок) $\rho_0 = 100$ Ом·м.

Розраховуємо питомий опір ґрунту для вертикального електрода:

$$\rho_g = \varphi_g \cdot \rho_0 = 1,2 \cdot 100 = 120 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (5.1)$$

Питомий опір ґрунту для горизонтального електрода:

$$\rho_z = \varphi_z \cdot \rho_0 = 2 \cdot 100 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (5.2)$$

Опір одиночного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_g &= \frac{\rho_g}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_g}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot (t_0 + 0,5 \cdot l_g) + l_g}{4 \cdot (t_0 + 0,5 \cdot l_g) - l_g} \right) = \\ &= \frac{120}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 1,5}{0,02} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot (0,8 + 0,75) + 1,5}{4 \cdot (0,8 + 0,75) - 1,5} \right) = 67 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Кількість вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R_g}{R_n} = \frac{67}{4} = 17. \quad (5.4)$$

Довжина горизонтальної смуги:

$$l_2 = n \cdot a = 17 \cdot 3 = 51 \text{ м.} \quad (5.5)$$

Опір горизонтального заземлювача:

$$R_2 = \frac{\rho_2}{2 \cdot \pi \cdot l_2} \ln \frac{2 \cdot l_2^2}{b \cdot t} = \frac{200}{2 \cdot 3,14 \cdot 51} \ln \frac{2 \cdot 51^2}{0,04 \cdot 0,8} = 7,5 \text{ Ом}; \quad (5.6)$$

де b - Ширина сталеві горизонтальної смуги.

Визначаємо опір групового заземлювача:

$$R_3 = \frac{R_6 \cdot R_2}{R_6 \cdot \eta_2 + R_2 \cdot \eta_6 \cdot n} = \frac{67 \cdot 7,5}{67 \cdot 0,344 + 7,5 \cdot 0,655 \cdot 17} = 4,72 \text{ Ом}; \quad (5.7)$$

де η_2 – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів;

η_6 – коефіцієнт використання горизонтальних заземлювачів.

За умовами безпеки заземлення має володіти малим опором ($R_n < 4 \text{ Ом}$), забезпечити який можна шляхом збільшення геометричних розмірів електродів або збільшивши їх кількість, з'єднаних у контур. Другий шлях набагато економічніший за витратами металу та іншими умовами. Крім того, при застосуванні кількох електродів можна вирівняти потенційну криву на території, де вони розміщені. Оскільки розрахункове $R_3 = 4,72 \text{ Ом} > R_n = 4 \text{ Ом}$, то збільшуємо кількість вертикальних електродів до $n = 24$.

Тоді довжина горизонтальної смуги:

$$l_2 = n \cdot a = 24 \cdot 3 = 72 \text{ м.} \quad (5.8)$$

Опір горизонтального заземлювача:

$$R_2 = \frac{\rho_2}{2 \cdot \pi \cdot l_2} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_2^2}{b \cdot t} = \frac{200}{2 \cdot 3,14 \cdot 72} \cdot \ln \frac{2 \cdot 72^2}{0,04 \cdot 0,8} = 5,6 \text{ Ом.} \quad (5.9)$$

Опір групового заземлювача:

$$R_3 = \frac{R_8 \cdot R_2}{R_8 \cdot \eta_2 + R_2 \cdot \eta_6 \cdot n} = \frac{67 \cdot 5,6}{67 \cdot 0,312 + 5,6 \cdot 0,624 \cdot 24} = 3,6 \text{ Ом}; \quad (5.10)$$

де $\eta_в = 0,624$; $\eta_г = 0,312$.

Оскільки $R_3 = 3,6 \text{ Ом} < R_n = 4 \text{ Ом}$, цей результат приймаємо як остаточний.

Таким чином, проєктований заземлювач контурний складається з 24 вертикальних стрижневих електродів довжиною 1,5 м, діаметром $d = 20\text{мм}$, заглиблених в землю на 0,8 м і з'єднаних сталеву горизонтальною смугою довжиною 75 м, перерізом 4x40 мм.

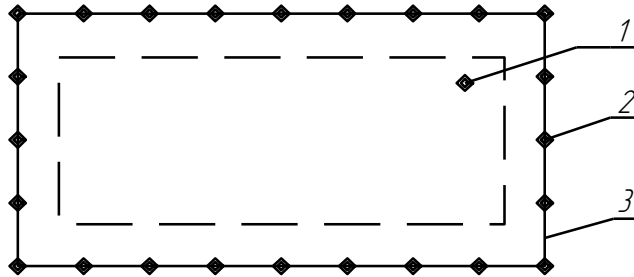


Рисунок 5.1 – Схема заземлення: 1 – монтажна ділянка, 2 – вертикальний заземлювач, 3 – горизонтальний заземлювач.

ВИСНОВОК

Для перевірки працездатності оптимального алгоритму керування такою електромеханічною системою вітроенергетичної установки було проведено низку завдань.

Було проведено аналіз систем, синтезування математичної моделі складних електромеханічних комплексів, проведено математичне моделювання та проведено необхідні розрахунки.

Проаналізувавши результати виконаної роботи були отримані результати, що підтверджують працездатність даного алгоритму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вітрогенератори: принцип дії, типи, застосування, ефективність роботи [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://alterair.ua/stati/vetrogeneratoryi/>
2. Вітряна електростанція [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D1%82%D1%80%D1%8F%D0%BD%D0%B0_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F
3. Вітроелектростанція (ВЕС), вітрогенератори та вітряки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mcl.kiev.ua/uk/vetrovye-elektrostantsii-ves-vetrogeneratory-i-vetryaki/>
4. Investigating Variable Speed Wind Turbine Transient Performance Considering Different Inverter Schemes and SDBR . Kenneth E. Okedu, Hind F. A. Barghash
5. Comparison of Variable Speed Wind Turbine Control Strategies. S. Arnaltes
6. The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology. P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi
7. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. ЦиПЛЕНКОВ
8. Jianzhong, Z. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines/ Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu: DRPT2008, 6–9 April, 2008.
9. Datta, R. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system/ R. Datta, V.T. Ranganathan // IEEE Transactions on Energy Conversion.– 2003. – № 18(1). – p. 163–168.
10. Филаретов, В. Ф. Система управления генератором ветроэнергетической установки // Сб. трудов Дальневосточного отделения Российской инженерной академии. Вып. 3. — Владивосток: ДВГТУ, 2000. С. 28-41.
11. Зубова, Н. В. Методы оптимального управления ветроэнергетической установкой по критерию энергетической эффективности / Н.В. Зубова, С. Н. Удалов, В. З. Манусов // Материалы 5 Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». – Томск: Изд-во ТПУ, 17–18 мая 2012 г., с.16–19.
12. Ветроэнергетика и ветроэнергетические установки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%92%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%8>

- [D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%B8_%D0%B2%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B8_\(%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F_%D0%B8_%D0%BC%D0%B8%D1%80\)](http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-1/section-2/2-2/2-2-1)
13. Ветроэнергетические установки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-1/section-2/2-2/2-2-1>
 14. Безруких П. П. Ветроэнергетика: справочное и методическое пособие. М.: ИД «Энергия». 2010. 320 с.
 15. Богатирев Н. И., Креймер А. С. Імітаційне моделювання вітроенергетичної установки. Київ: Основа, 2000. 416 с.
 16. Ветроэнергетика Украины. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.uwea.com.ua/ukraine_wind.php
 17. Денисенко О.Г., Козловский Г.А. Преобразование и использование ветровой энергии. К.: Техника, 1992. 176 с
 18. Деркачев С.В. Актуальність і проблеми розвитку вітроенергетики в Україні. К.: Урожай, 2006. 272 с
 19. Дзензерский В.А, Тарасов С.В., Костюков И.Ю. Ветроустановки малой мощности. К.: Наук. думка, 2011. 592 с.
 20. Вітроенергетика [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://esu.com.ua/search_articles.php?id=35020
 21. Power Electronics in Small Scale Wind Turbine Systems. Mostafa Abarzadeh, Hossein Madadi Kojabadi and Liuchen Chang
 22. Филаретов, В. Ф. Разработка системы автоматической стабилизации параметров выходного напряжения автономной ветроэнергетической установки // Электричество. 2001. — № 7.-С. 37-42.
 23. Jianzhong, Z. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines/ Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu: DRPT2008, 6–9 April, 2008.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця нормального розподілу

	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2517	0.2549
0.7	0.2580	0.2611	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3869	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706

1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
2.5	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
2.6	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
2.7	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
2.8	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
2.9	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
3.0	0.4987	0.4987	0.4987	0.4988	0.4988	0.4989	0.4989	0.4989	0.4990	0.4990

Декларація
академічної доброчесності
здобувача ступеня вищої освіти ЗНУ

Я, Савін Микола Володимирович, студент магістратури, денної форми навчання, Інженерного навчально-наукового інституту, спеціальності 171 «Електроніка» освітньої програми "Електроніка", адреса електронної пошти Toolateforthis1@gmail.com підтверджую, що написана мною кваліфікаційна робота на тему «Розробка вітроенергетичної установки зі змінною швидкістю обертання в умовах поривчастого вітру»

– відповідає вимогам академічної доброчесності та не містить порушень, що визначені у ст. 42 Закону України «Про освіту», зі змістом яких ознайомлений/ознайомлена;

– заявляю, що надана мною для перевірки електронна версія роботи є ідентичною її друкованій версії;

– згоден/згодна на перевірку моєї роботи на відповідність критеріям академічної доброчесності у будь-який спосіб, у тому числі за допомогою інтернет-системи а також на архівування моєї роботи в базі даних цієї системи.

Дата _____ Підпис _____ М.В. Савін (студент)

Дата _____ Підпис _____ Д. Г. Алексієвський (науковий керівник)

