

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

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

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Розробка та моделювання блоку керування лопатями вітряка середньої потужності.

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕЛКЗп-19
(шифр групи)

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

та електромеханіка»

Вадим ВОЙТАЛЮК	
(ім'я та прізвище)	
Керівник <u>доц. каф. «ЕлІн», к.т.н., В. КАЛИНИЧЕНКО</u>	(підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)
Рецензент _____	(підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	

Нормоконтроль:

О. ЛЮБИМЕНКО
(підпис)
(дата)

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

Студент _____
(підпис)
(дата)

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Вадиму ВОЙТАЛЮКУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка та моделювання блоку керування лопатями
вітряка середньої потужності.

керівник роботи Валерій КАЛИНИЧЕНКО, к.т.н, доц. каф. «ЕлІн»
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 6 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Вхідні параметри електромережі із
вітрогенератором, паспортні дані самого вітряка, інвертора, контролера та
навантаження.

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

1. Аналіз регулювання лопатями вітрогенератора.

2. Дослідження перехідних процесів системи електроприводу поворотного механізму.

3. Моделювання системи, що включає вітрогенератор, систему накопичення електроенергії, перетворювальну техніку та навантаження
дослідження при різних режимах роботи.

4. Розробка методичних комплексів та заходів з питань охорони праці.

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

Десять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1–4	В. КАЛИНИЧЕНКО, доц. каф.		
Охорона праці	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Нормоконтролер	О. ЛЮБИМЕНКО, доц. каф.		

7. Дата видачі завдання 27 квітня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	27.04–01.05.22	
2.	Розділ 2	02.05–10.05.22	
3.	Розділ 3	11.05–18.05.22	
4.	Розділ 4	18.05–25.05.22	
5.	Охорона праці	26.05–01.06.22	

Студент _____
(підпис)

Вадим ВОЙТАЛЮК
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Валерій КАЛИНИЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В. ВОЙТАЛЮК «Розробка та моделювання блоку керування лопатями вітряка середньої потужності.» / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2022.

У виконаній дипломній роботі розглянута системи керування лопатями вітрогенератора, яка включає в свій комплекс електродвигун.

В ході виконання дослідження було розглянуто питання управління електричним приводом, який керує лопатями вітряка, що має місце у даній ланці технологічного процесу.

Окрім розрахунку основних параметрів вітряка та усіх складових приладів системи (інвертора, контролера та ін..) також було приділено увагу таким важливим питанням, як:

- встановленню захисних приладів та забезпечення автономного резерву живлення у енергосистемі.

- розрахунку захисту від аварійних режимів у мережі.

При цьому було представлено графічні моделі вітряка із його основним обладнанням, а також схеми із габаритними розмірами.

Моделювання роботи вітрогенератора процесу виконувалося у програмі Matlab, та її застосунку Simulink.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВІТРЯК, ЛОПАТЬ, СЕРЕДНЯ ПОТУЖНІСТЬ, MATLAB, ІНВЕРТОР, ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА, КОНТРОЛЕР, SIMULINK, РЕЖИМИ РОБОТИ ВІТРОПАРКУ, ЕЛЕКТРОПОВІД.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1. СУЧАСНА ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, СТАН ПИТАННЯ, АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ТА ВИКЛИКИ.	11
1.1 Вітроенергетика. Основні компоненти вітрогенератора.	11
1.2 Вибір схеми електроживлення.	14
2. ВИБІР ОСНОВНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ.	16
2.1 Основні параметри, які характеризують роботи енергосистеми, яка включає вітрогенератор.	16
2.2 Умови для вибору вітрогенератора та його супровідного електрообладнання.	17
2.3 Виконання розрахунку параметрів вітрогенератора.	17
2.4 Обрання типу вітряка за розрахованими параметрами.	21
2.5 Встановлення захисних приладів та забезпечення автономного резерву живлення у системі.	28
2.6 Захист від аварійних режимів у мережі.	37
3. ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРУ. ВИКОРИСТАННЯ УМОВ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.	40
3.1 Керування лопатями вітрогенератора.	40
3.2 Додаткові методи отримання оптимальної потужності генерації вітряка.	46
4. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРУ.	48
ВИСНОВКИ.	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	57
ДОДАТОК А «Зауваження контролера з нормування»	59
ДОДАТОК Б «Охорона праці. Безпека експлуатації систем з	60

вітрогенератором».

ДОДАТОК В «Вхідні дані для роботи математичної моделі вітряка»

66

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЕП – асинхронний електропривод;

АС – акумуляторна станція;

ВГ – вітрогенератор (вітряк);

ДН – джерело напруги;

ЗС – змінний струм;

МРС – магніторушійна сила;

ПЕ – поворотний елемент;

ПП – перехідні процеси;

ПС – постійний струм.

ВСТУП

У представленій роботі об'єктом дослідження виступає вітрова установка середньої потужності та система контролю за кутом нахилу лопатей вітроколеса.

Метою роботи поставлено розробку технологічної моделі та послідує моделювання блоку керування лопатями вітрового генератора середньої потужності.

Класифікують асинхронні генератори в залежності від способу збудження, характеру частоти, способу стабілізації напруги, конструктивного виконання та числа фаз.

Сьогодні використовують переважно у вітроенергетичних установках автономні асинхронні генератори з ємнісним збудженням. Переваги вітроустановок на основі асинхронного генератора із подвійним живленням: – застосування напівпровідникового перетворювачів меншою потужності, яке дозволяє значно зменшити його габаритні об'єми, порівняно із приводами постійного струму та вартість установки.

Разом із синхронними генераторами та машинами постійного струму, як джерела електроенергії використовують й автономні асинхронні генератори. Поміж собою вони відрізняються як у способі збудження, так і у конструкції. Також вони є різними за кількістю фаз і за способом стабілізації напруги у них.

Асинхронні генератори, які розташовані у вітрогенераторах бувають із фазним, короткозамкненим та пологим ротором.

Розрізняють за способом збудження генератори із ємнісним та із інверторним збудженням. Недоліки ємнісного збудження генераторів асинхронних полягають в труднощах у регулюванні параметрів вихідної напруги.

Проте, генератори, котрі отримують збудження від конденсаторної батареї, які відрізняються простотою конструкції, відсутністю контактів та надійністю.

Генерація електричної енергії є основною метою використання технологій відновлюваних джерел енергії і визначає майбутнє у розвитку напрямку енергетики, який пов'язаний із відновлюваними джерелами енергії.

В Україні останнім часом намітилась тенденція у розвитку енергетики на основі відновлюваних чи нетрадиційних джерел енергії, або так звана «зелена енергетика». При цьому більша частка цієї енергетики може припадат на енергію вітру та сонячну енергію. Ці види ресурсів є найбільш доступними для використання на Землі.

Під час застосування тієї чи іншої вітроустановки необхідно звертати особливу увагу на конструктивне виконання лопатей та іншого обладнання. Особливо велике значення має вибір відповідного електрогенератора вітроустановки.

Переваги вітроустановки на основі асинхронного генератора подвійного живлення є використання напівпровідникового перетворювача меншої потужності (близько 25–30% від номінальної потужності вітряка), що допомагає знижувати значно втрати електрики та вартість самого вітропарку.

Завдяки чому під час доволі високих середніх значеннях швидкості вітру більше за 8–9 (м/с) вітряк на основі асинхронних генераторів подвійного живлення є ефективніші.

Практичне дослідження вітроустановки виконувалося за допомогою розробленого математичного опису системи керування електричним приводом вітрогенератора та створеної моделі систем розподіленої генерації, яка включає у свій комплекс вітряк.

Модель була створена завдяки пакету Matlab та його додатку Simulink, розділ SimPowerSystems.

Під час аналізу теоретичної частини було відмічено, що при використанні асинхронних генераторів у вітрових установках можливі різні його несправності.

Так зокрема, серед них виділені, до прикладу, різні короткі виткові замикання у обмотці статора. Тож, зважаючи на це у третьому розділі

дипломної роботи була приділена увага необхідності розробки відповідних захисних ланок у вітрогенераторі.

Структура та обсяг дипломного проекту. Випускна кваліфікаційна робота обсягом 67 машинописних сторінок, що складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, переліку використаних джерел, який складається з 10 найменувань та 3 додатків. Робота містить 4 таблиці та 30 рисунків.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНА ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, СТАН ПИТАННЯ, АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ТА ВИКЛИКИ.

1.1 Вітроенергетика. Основні компоненти вітрогенератора.

Вітроенергетика – галузь науки і техніки, яка розробляє теоретичні основи, методологію й засоби, щодо застосування енергії вітру для отримання механічної, а після цього й в електричну та теплову енергії. В останнє десятиліття в Україні вітроенергетика стала ваговою областю у загальній енергетиці, тому за масштабами вітроенергетику доцільного розглядати вітрові електростанції для забезпечення електроенергією основні галузі промисловості нашої країни.

У відповідності до вище зазначеного, використання енергії вітру тут здійснюється за допомогою спеціальних установок (ВЕУ).

Вітроенергетична установка є комплексом технічних пристроїв, які об'єднані метою перетворити кінетичну енергію вітрового потоку на будь-який інший вид енергії, зазвичай, механічну.

Вітродвигуном називають конструкцію (включаючи двигун), яка застосовує вітрову кінетичну енергію для генерації механічної енергії. Серед вітродвигунів розрізняють за конструкцією крильчасті (найбільш поширені) із коефіцієнтом використання вітрової енергії до 0.47-0.49; карусельні (або роторні) із коефіцієнтом використання, який лежить в діапазоні 0.14-0.175 та барабанні.

Від потужності вітрогенератора залежить величина часу, яку будуть заряджатися акумуляторні батареї (станція), тобто швидкість зарядження. В загальній системі генератор виконує роль вироблення змінного струму. Значення сили струму й напруги генератора залежить від швидкості та стабільності вітрового потоку.

До базових пристроїв системи, без яких неможлива робота вітрогенератора неможлива, слід віднести наступні елементи:

— лопаті, які приводять до руху вал генератора завдяки кінетичній вітровій енергії;

— щогла, де буде розміщуватися основне електрообладнання по перетворенню енергії (крім, звичайно акумуляторів та трансформаторів). Варто звертати увагу під час проектування, що чим вище розташовується щогла над поверхнею, тим сильніша та стабільніша сила вітрового потоку. Тому у вищих щогл, генератор буде більше виробляти енергії. Щогли можуть бути різної висоти та форми.

Далі варто навести й перелік додаткових компонентів, адже без них неможливо здійснювати стабільну роботу вітрогенератора базової комплектації (наведених вище):

— контролер, який керує багатьма параметрами та процесами вітроустановки, як наприклад, поворот лопатей, що й детально досліджується у роботі, заряд акумуляторної станції, захисні функції, сигналізаційні та інші. Також завдяки контролеру змінний струм, що виробляється генератором перетворюється у постійний, який потрібний для заряду акумуляторних батарей;

— акумуляторні батареї, що накопичують електроенергію для її використання у безвітряний час доби. Акумуляторні батареї або станції виконуються ще одну важливу функцію – вирівнюють та стабілізують напругу, яка виходить із генератора. Завдяки чому навантаження (споживачі) отримують стабільну напругу без перебоїв під час зміни поривів вітру та його напрямку. Живлення об'єкту відбувається від інвертора, входом якого й виступають акумуляторні батареї;

— датчик напрямку вітру й анемоскоп, які відповідають за збір інформації про швидкість та напрям вітру в установках середньої та великої потужності;

— АВР – автоматичне вмикання резерву в електричну мережу. Система виконує автоматичне перемикання поміж декількох джерел електроживлення за проміжок часу близький від 0.5 до 1 секунди при зникненні живлення від

основного джерела. Також подібна система дозволяє поєднати вітрову електростанцію, централізовану електромережу, дизель-генератор й інші джерела живлення у єдину автоматичну систему. При цьому, під час проектування мережі, слід пам'ятати про те, що в такій мережі неможлива робота об'єкта одночасно від декількох різних джерел живлення;

— інвертор – пристрій, який перетворює в системі постійний струм, який накопичується в акумуляторних батареях (станціях), у змінний, що потребує більшість електроприладів.

В той же час інвертори в електромережі бувають чотирьох типів:

1) із модифікованою синусоїдою: у цьому випадку інвертор перетворює струм на змінний із напругою значенням 220 (В) із модифікованою синусоїдою (або квадратною синусоїдою). Цей тип придатний у випадку, коли в системі є електрообладнання, що не чутливе до якості напруги, ним може бути обігрів, освітлення, заряд пристроїв та подібне;

2) із чистою синусоїдою: у цьому випадку відбувається перетворення струму на змінний із напругою значенням 220 (В) із чистою синусоїдою. Цей тип є придатним для будь-якого типу електричних приладів, до прикладу, електричних двигунів основних галузей господарства та ін;

3) трьохфазний інвертор, який перетворює струм на трифазний із значенням напруги 380 (В). Можливо застосовувати для трифазного електрообладнання;

4) мережевий інвертор дозволяє системі, на відміну від вище розглянутих типів, працювати й без акумуляторних батарей (станції), проте його можливо використовувати тільки для виведення електричної енергії у централізовану мережу.

Однак і вартість, як правило, таких приладів у декілька разів перевищує вартість мережевих інверторів, що також варто брати до уваги під час проектування.

1.2 Вибір схеми електроживлення.

Схема роботи системи із вітрогенератором та споживачем показана на рис 1.1. Тут наведено електропостачання від вітрогенератора (із акумуляторною станцією) до споживача або навантаження та його послідуною комутацію із електромережею.

На рис. 1.1 показана система, що складається із приладів:

- вітрогенератор;
- контролер;
- акумуляторні батареї (станція) ;
- комутаційні апарати та запобіжники;
- інвертор;
- АВР.

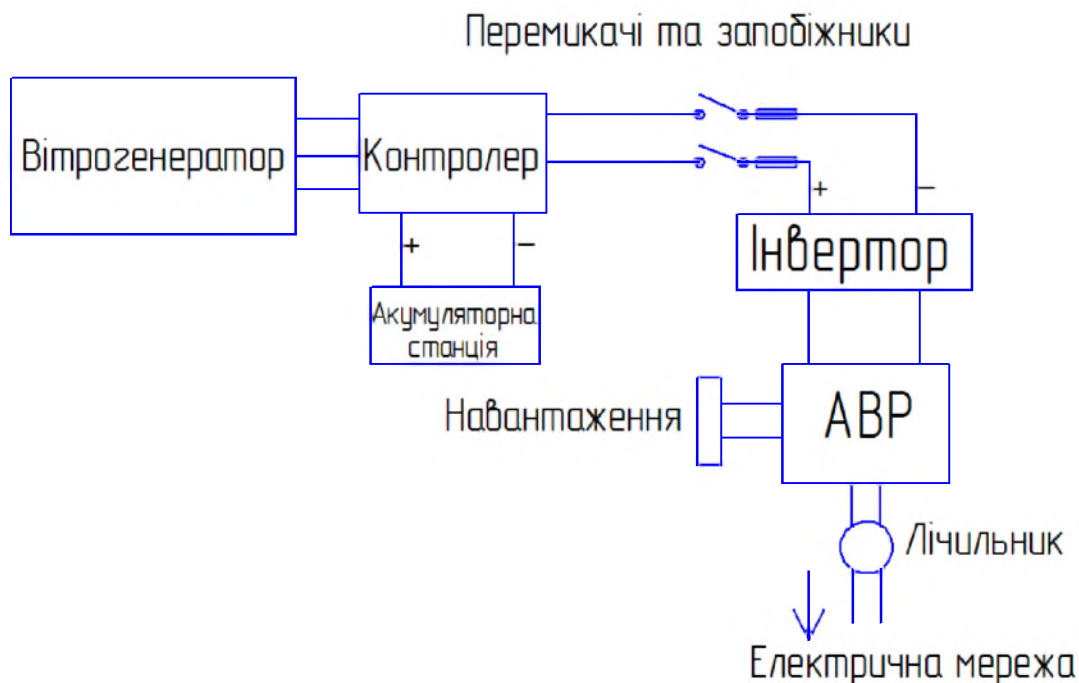


Рисунок 1.1– Вітрогенератор із акумуляторною станцією та її послідуною комутація із електричною мережею.

Така схема споживання передбачає безперебійне електропостачання споживача енергією під час перебоїв у централізованій системі постачання

електрики. У момент, коли відбувається відключення основного джерела живлення, у даному випадку, централізованої електромережі, автоматичне вмикання резерву перемикає живлення із основного джерела на резервний.

В такій енергосистемі резервним джерелом живлення виступає альтернативне джерело енергії - вітроустановка, що перетворює енергію вітру в електричну. Отримана енергія завдяки контролеру надходить на заряд до акумуляторних батарей. З акумуляторів напруга поступає на інвертор, де відбувається перетворення постійної напруги значенням 12 (В) на змінну 220 (В) із частотою 50 (Гц), і тим самим забезпечуючи споживача електричною енергією.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ОСНОВНОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ.

2.1 Основні параметри, які характеризують роботи енергосистеми, яка включає вітрогенератор.

Технологічний процес всього досліджуваного комплексу характеризують основні три величини це:

1) Вихідна потужність вітроустановки, що вимірюється у (кВт) та визначає лише потужністю інвертора і при цьому не залежить від вхідних параметрів зовнішньої середовища, як швидкість та напрям вітру, а також ємності акумуляторів. Цю величину також називають «піковим навантаженням». Даний параметр визначає максимальну кількість електричних приладів, що можуть бути приєднані одночасно до проєктованої енергосистеми. Стає зрозумілим, що споживати в системі електроенергії більше, ніж дає змогу потужність застосованого інвертора неможливо. Для збільшення вихідної потужності можливе одночасне підключення кількох інверторів.

2) Швидкість заряду акумуляторної станції, що вимірюється у (кВт/годину) залежить, в першу чергу від потужності самого вітрогенератора. Ще даний параметр залежить напряму від швидкості вітру і частково від висоти щогли над поверхнею землі та рельєфу місцевості. Коли у місці установки переважну кількість часу спостерігаються слабкі вітри або відбувається споживання електричної енергії постійно варто обирати більш потужний вітрогенератор. З метою збільшення швидкості заряду акумуляторної станції імовірно встановлення декількох вітрогенераторів одночасно та підключення їх до однієї акумуляторної станції.

3) Час роботи системи без перерви при відсутності слабкому або повній відсутності вітру та визначається значенням ємності акумуляторних батарей у станції (вимірюється у А*год або кВт) Залежить цей чинник від тривалості та потужності споживання.

2.2 Умови для вибору вітрогенератора та його супровідного електрообладнання.

1) Кількість електричної енергії, що потрібно для об'єкту споживання за місяць, яке вимірюється у (кВт*год). Даний параметр є важливим під час підбору вітрогенератора.

2) Бажаний час автономної роботи енергетичної системи у періоди, коли споживання електроенергії із акумуляторної станції буде перевищувати швидкість заряду акумуляторних батарей. Даний параметр визначає ємність та кількість акумуляторних батарей.

3) Максимальне навантаження на систему у пікові моменти, що вимірюється у (кВт). Параметр є необхідним для обрання інвертора змінного струму.

2.3 Виконання розрахунку параметрів вітрогенератора.

Для виконання розрахунку було розраховано, що споживач електричної енергії потребує 9000 (кВт*год) кожного місяця із піковим навантаженням 35 кВт. Передбачено, що у місці експлуатації є можливість підключатись у разі потреби до централізованої електричної мережі.

Перед усім необхідно виконати розрахунок середнього щогодинного споживання електричної енергії споживачами за (2.1).

$$W_{cp.g} = \frac{W_M}{N \cdot n} \quad (2.1)$$

де: – $W_{cp.g}$ – значення середнього щогодинного споживання електроенергії [кВт/год].

– W_M – значення середньомісячного споживання електричної енергії в

енергосистемі.

- N – кількість днів у календарному місяці.
- n – константа, яка визначає кількість годин протягом дня та дорівнює 24 годинам.

–

$$W_{cp.z} = \frac{9 \cdot 10^3}{30 \cdot 24} = 12.5 (\text{кВт} \cdot \text{год}) \quad (2.2)$$

–

Для того, аби забезпечити заряд акумуляторної станції вітрогенератором з швидкістю 16.67 (кВт*год), необхідно обрати вітрогенератор, у якого номінальна потужність буде із запасом як мінімум у 2.5-3 рази більша за потрібну, адже вітрогенератор буде працювати усього на 25-35% від номінальної потужності.

Тож для цього розрахунку скористаємось виразом (2.3)

$$P_{H.П} = \frac{W_{cp.z}}{k_e} \quad (2.3)$$

де: – $P_{H.П}$ – значення номінальної потужності обраного вітрогенератора [кВт].

- k_e – коефіцієнт використання номінальної потужності вітроенергетичної установки [%].

Тому приймачі мінімально можливий коефіцієнт ($k_e = 0.25$) у розглянутій системі, підставивши усі показники до (2.3) отримуємо вираз (2.4), який і покаже мінімальну потужність вітряка, що потрібно встановлювати в мережу.

$$P_{H.П} = \frac{12.5 \cdot 10^3}{0.25} = 50 (\text{кВт}) \quad (2.4)$$

Після цього можна обрати вітрогенератор, було вирішено обрати із запасом потужністю 60 кВт. Параметри реальної вітроустановки, яка застосовується у промисловості даної потужності представлена у табл. 2.1-2.2.

У таблиці 2.1 представлені габаритні розміри вітряки для подальшої побудову у програмному середовищі.

Таблиця 2.1. – Габаритні розміри вітрогенератору

<i>Назва показника</i>	<i>Значення</i>
Висота лопаті	8.5 (м)
Висота щогли	18 (м)
Діаметр вітроколеса	17.5 (м)
Кількість лопатей	3

У таблиці 2.2 представлені електричні та механічні показники вітрової установки для подальшого розрахунку та моделювання.

Таблиця 2.2. – Електричні та механічні показники вітрогенератору

<i>Назва параметру</i>	<i>Значення</i>
Номінальна кількість оборотів вітроколеса за хвилину	27-30
Максимальна можлива потужність	62.5 (кВт)
Номінальна потужність	60 (кВт)
Номінальна швидкість вітру для вітряка	9 (м/с)
Мінімальна швидкість вітру з якої починається генерація електричної енергії	2.2 (м/с)
Робоча швидкість вітру	2.2-22 (м/с)
Гранична швидкість вітру генератора	40 (м/с)
Показник використання енергії вітру (β)	0.43-0.47
Частота генератора вітряка	0-50 (Гц)

Ефективність системи перетворення (η_{Π})	від 0.85
Номінальний та максимальний струм	100 та 110 (А)

Передбачено також виконання у даному пристрої:

- автоматичне орієнтування на вітер, тобто поворот башти при зміні вітру
- захист від ураганних вітрів, тобто зупинення роботи вітроколесу при небезпечних значеннях швидкості вітру шляхом зміни кута атаки лопатей генератора.

Типом генератора досліджуваної вітроустановки є трифазним генератор на постійних магнітах.

Стосовно застосування разом із даною установкою акумуляторної станції подано наступні рекомендації:

- Ємність акумуляторних батарей повинна дорівнювати 200 (А*год).
- Кількість акумуляторних батарей дорівнює 40-45 (шт.).

При виборі акумуляторів важливо також виконати розрахунок середнього щогодинного споживання електроенергії споживачами у робочі часи. Тобто за знайденим середнім робочим споживанням можна буде шукати й потрібну кількість акумуляторних батарей у станції, це можна зробити за (2.5).

$$W'_{cp.z} = \frac{W'_M}{N_p \cdot n_p} \quad (2.5)$$

де: $W'_{cp.z}$ – значення середнього щогодинного споживання електричної енергії під час розрахунку робочих режимів [кВт/год].

- W'_M – значення середньомісячного споживання електричної енергії в енергосистемі.
- N_p – кількість робочих днів споживання електроенергії в календарному

місяці.

– n_p – показник, який показує кількість робочих годин споживання протягом, для розрахунку $n_p = 10$.

$$W_{ср.г} = \frac{9 \cdot 10^3}{24 \cdot 10} = 37.5 \text{ (кВт / год)} \quad (2.6)$$

2.4 Обрання типу вітряка за розрахованими параметрами.

На рис. 2.1 зображено основні вузли електромеханічної частини вітрогенератора.

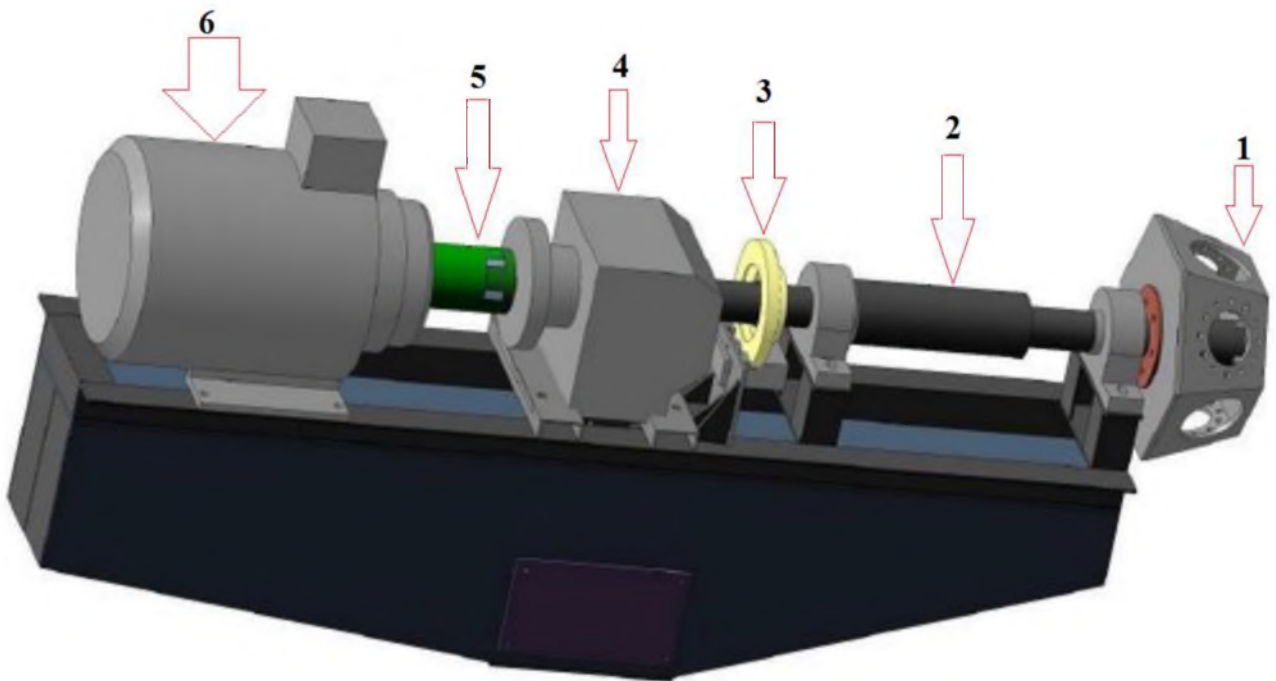


Рисунок 2.1 – Основні вузли вітрогенератора

Так цифрами позначені наступні пристрої:

1) Ротор, до якого прикріплюються лопаті.

2) Вал ротора, який передає механічну енергію від ротора до мультиплікатора.

3) Тормозна система, яка застосовується під час небезпечних швидкостей вітру або для планової зупинку.

4) Мультиплікатор поворотного механізму.

5) З'єднувальна муфта для валів (гнучкого типу).

6) Генератор, що перетворює механічну енергію вітру в електричну енергію.

Загальна структура вітрогенератору у збірці зображена на рис 2.2

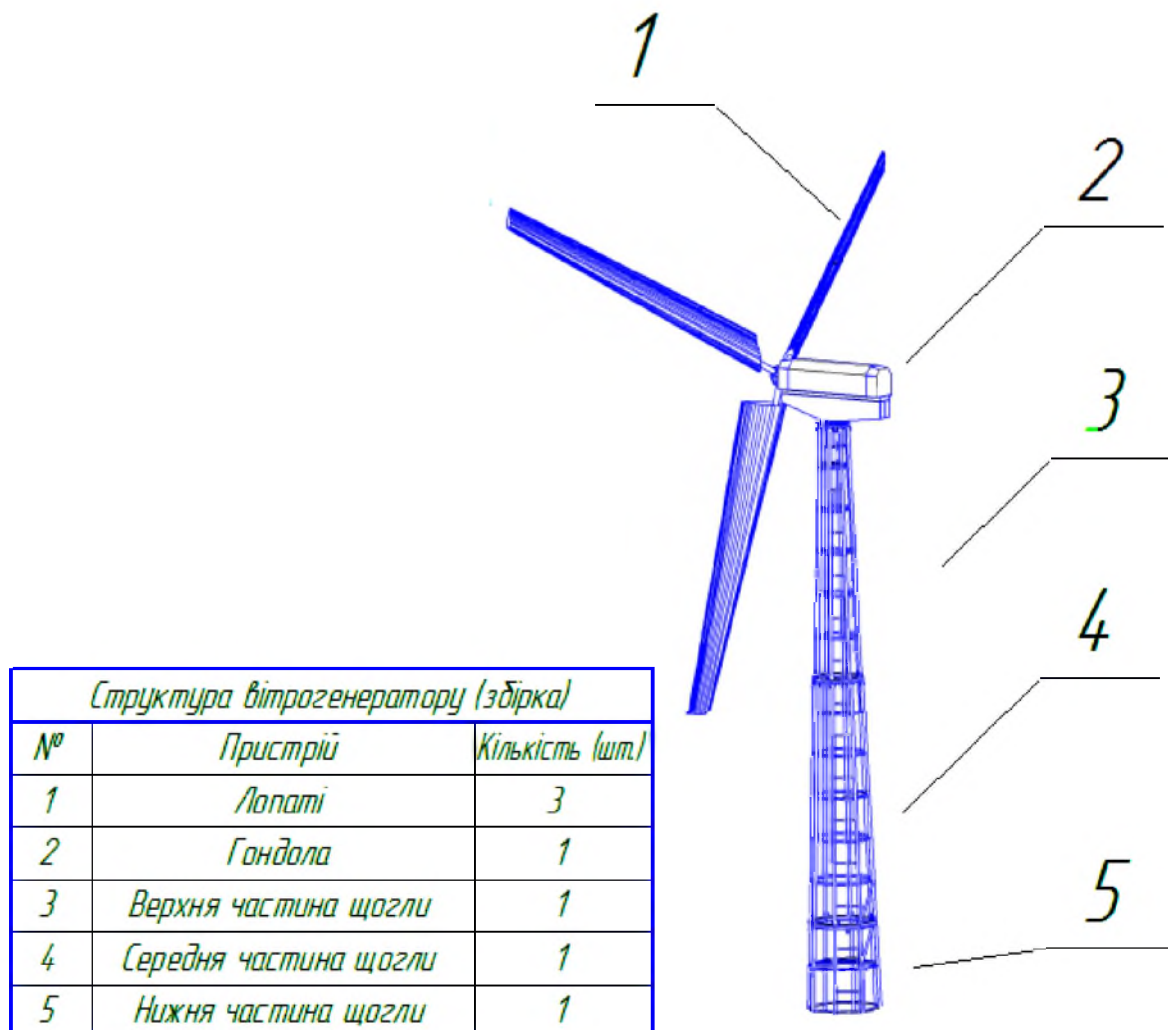


Рисунок 2.2 – Структура вітрогенератору у збірці

Більше детальну конструктивну схему із усіма основним габаритними розмірами наведено на рис. 2.3

Хотілось би зазначити наступні конструктивні особливості вітряка даного типу:

- Опорна вежа має конструктивне виконання – модульне трубчасте збірне, адже складається із трьох секцій, що наведено на рис. 2.2.

- Корпус гондоли був виготовлений із оцинкованої сталі високої якості, Гондола виконує функцію підтримки валу, генератору, додаткових механізмів, наприклад пристрої виміру швидкості та напрямку вітру, тощо. Також корпус має змогу обертатися завдяки наявності т.з. кільця системи повороту, яке виконує обертання навколо вертикальної осі. Воно прикріплене до основи рами і саме це дозволяє з'єднати гондолу із вежею.

- Матеріал із якого виготовлені лопаті у даному вітрогенераторі армований поліефір.

- Використовується без щітковий трифазний генератор напругою 380 (В) та частотою 50 (Гц). Слід зазначити, що даний тип генератор є стійким до високих навантажень, режимів короткого замикання КЗ та має незалежний контур генерації, тобто під час миттєвого підключення до мережі потужного навантаження відсутній зриву у генерації.

На рис. 2.3 зображено детальне розташування основних елементів у корпусі гондоли із їх габаритними розмірами.

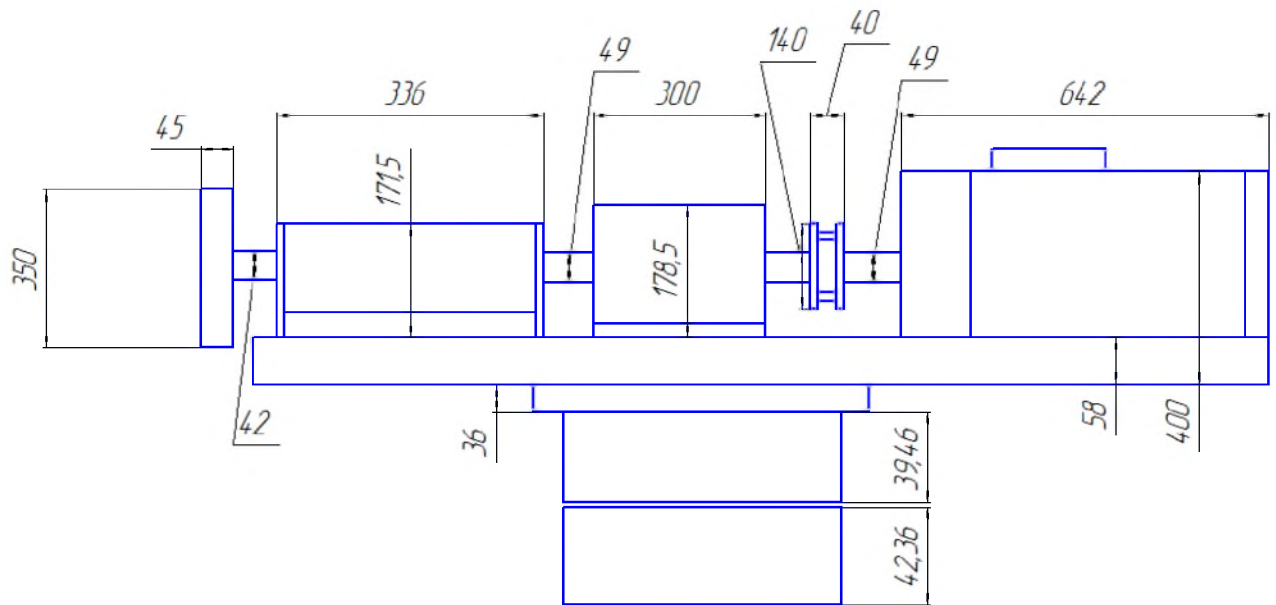


Рисунок 2.3 – Габаритні розміри вітрогенератору

Характеристика потужності досліджуваного вітрогенератора показана на рис. 2.4. На ній наочно видно швидкість вітру, котру необхідну мати для початку роботи вітроколеса та швидкість вітру при значенні якої вітрогенератор розпочинає роботу у номінальному режимі. Основні числові значення містить табл. 2.2.

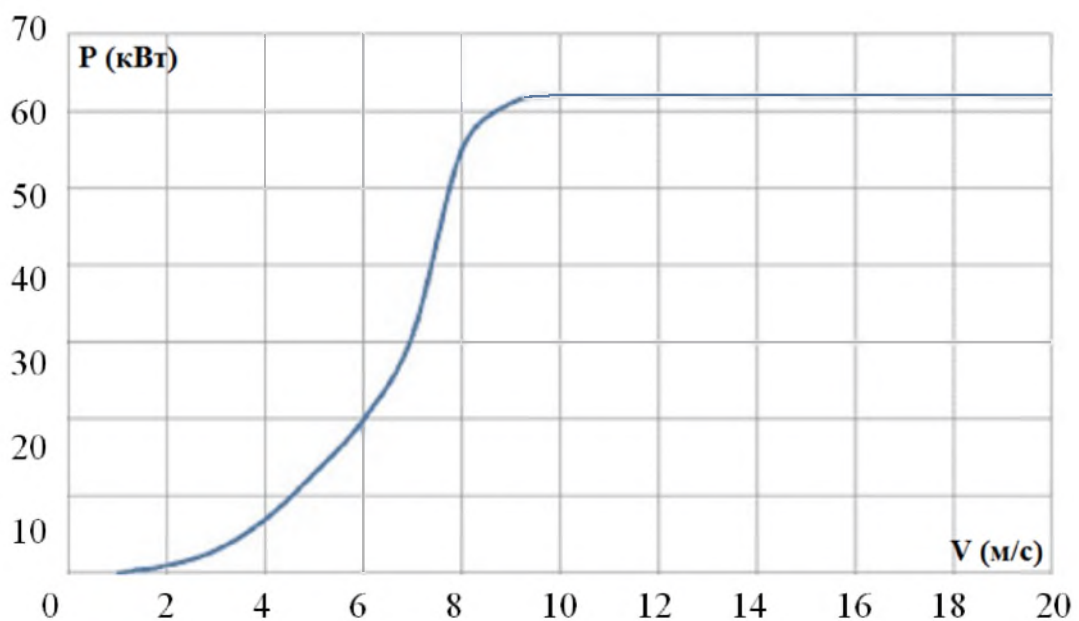


Рисунок 2.4 – Характеристика потужності вітрогенератора

На рис. 2.5.а представлено габаритні розміри вже самого вітряка – довжина лопатей, довжина башти, гондоли, поворотного пристрою. На рис. 2.5.б, на відміну від 2.3 продемонстровано кінематичну схема вітроелектричної установки, основі компоненти якої розташовані у корпусі гондоли (на рис. 2.5.а позначення «2»).

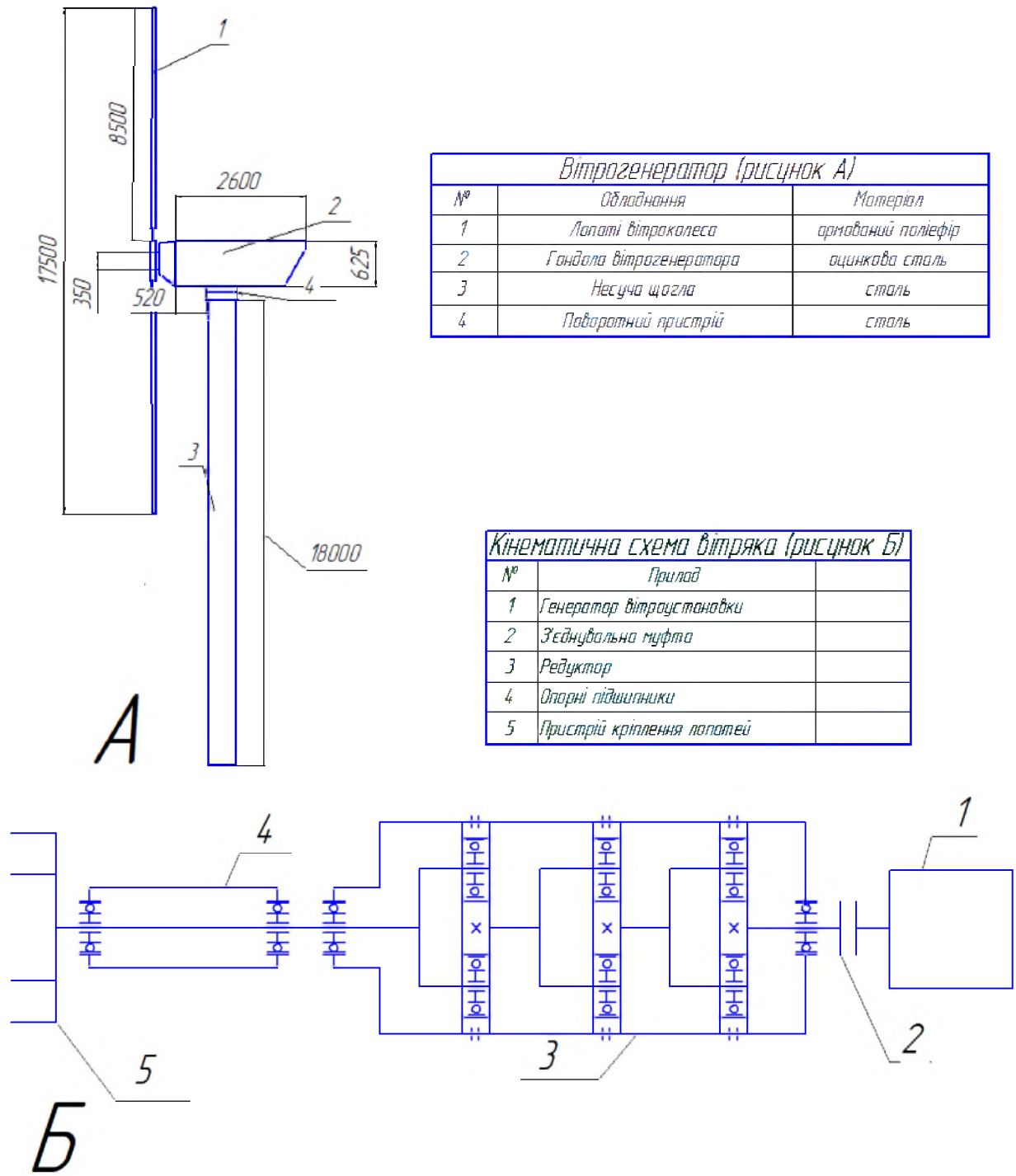


Рисунок 2.5 – Структурна схема (а) та кінематична схема вітроелектричної установки (б)

За завданням необхідно проаналізувати роботу вітрогенераторів встановлених у Покровському районі Донецької області. Проаналізувавши середньорічна швидкість вітру у цьому регіоні за картою розою вітрів, можна сказати, що по перше тут один із найкращих показників середньорічної швидкості вітру, кращий тільки в Одеській та Херсонській області, Криму та у Приазов'ї. Це обумовлено відкритим простором та відносно близьким розташуванням до так званих офшорних зон (Азовське море), тож підвищення об'єкта дозволить вітроустановці працювати щонайменше на 40-45% від номінальної потужності вітряка. Для точнішого розрахунку швидкості вітру за місцем встановлення варто провести безпосередні виміри.

Знаючи висоту встановлення вітроколеса із габаритних розмірів ($h=18$ м) можна скористатися виразом (2.7), який застосовується для вітроколес із висотою у діапазоні 10-50 (м).

$$V_h = \left(\frac{h}{10}\right)^b \cdot V_{10} \quad (2.7)$$

де: – V_h – середньорічна швидкість вітру на висоті встановлення вітрового колеса [м/с].

– $h=18$ – висота вітроколеса над поверхнею (м).

– V_{10} – середньорічна швидкість вітру на висоті 10м, значення можна знайти за картою для досліджуваного регіону [м/с].

– $b=0.145$ – емпіричний коефіцієнт.

$$V_h = \left(\frac{18}{10}\right)^{0.145} \cdot 4.95 = 5.39 \text{ (м / с)} \quad (2.8)$$

Коефіцієнт продуктивності вітрової турбіни, безпосередньо як функція відношення швидкостей матиме вигляд (2.9.)

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right)}{2} \quad (2.9)$$

При підстановці знайдених за (2.8) значень, отримуємо:

$$c_{p \max} = \frac{17}{32} = 0,532 \quad (2.10)$$

Умови протікання ідеалізований вітрогенератор із максимально можливим відведенням механічної потужності за виразом (2.11).

$$\begin{cases} v' = \frac{2 \cdot v_1}{3} \\ v_2 = \frac{v_1}{3} \end{cases} \quad (2.11)$$

Тоді потужність вітрогенератора для перевірки правильності обрання обладнання можна знайти за (2.12)

$$P_{\epsilon} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot A \cdot v_1^3}{2} \quad (2.12)$$

А значення швидкості вітрогенератора можна знайти за розрахунками виразу (2.13)

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_{\epsilon}}{v_1} = \frac{u_0}{v_1} = \quad (2.13)$$

2.5 Встановлення захисних приладів та забезпечення автономного резерву живлення у системі.

Електричні мережі із альтернативними джерелами, як правило, вимагають, через свою залежність у генерації від погодних умов та зовнішніх факторів, встановлення ділянки, яка б містила автоматичний ввід резерву (ABP) живлення у системі. Так проаналізувавши у [6-8] сучасні конструкції вітряних парків, було виконано наступну схему (рис. 2.6) із АВР для досліджуваної електромережі.

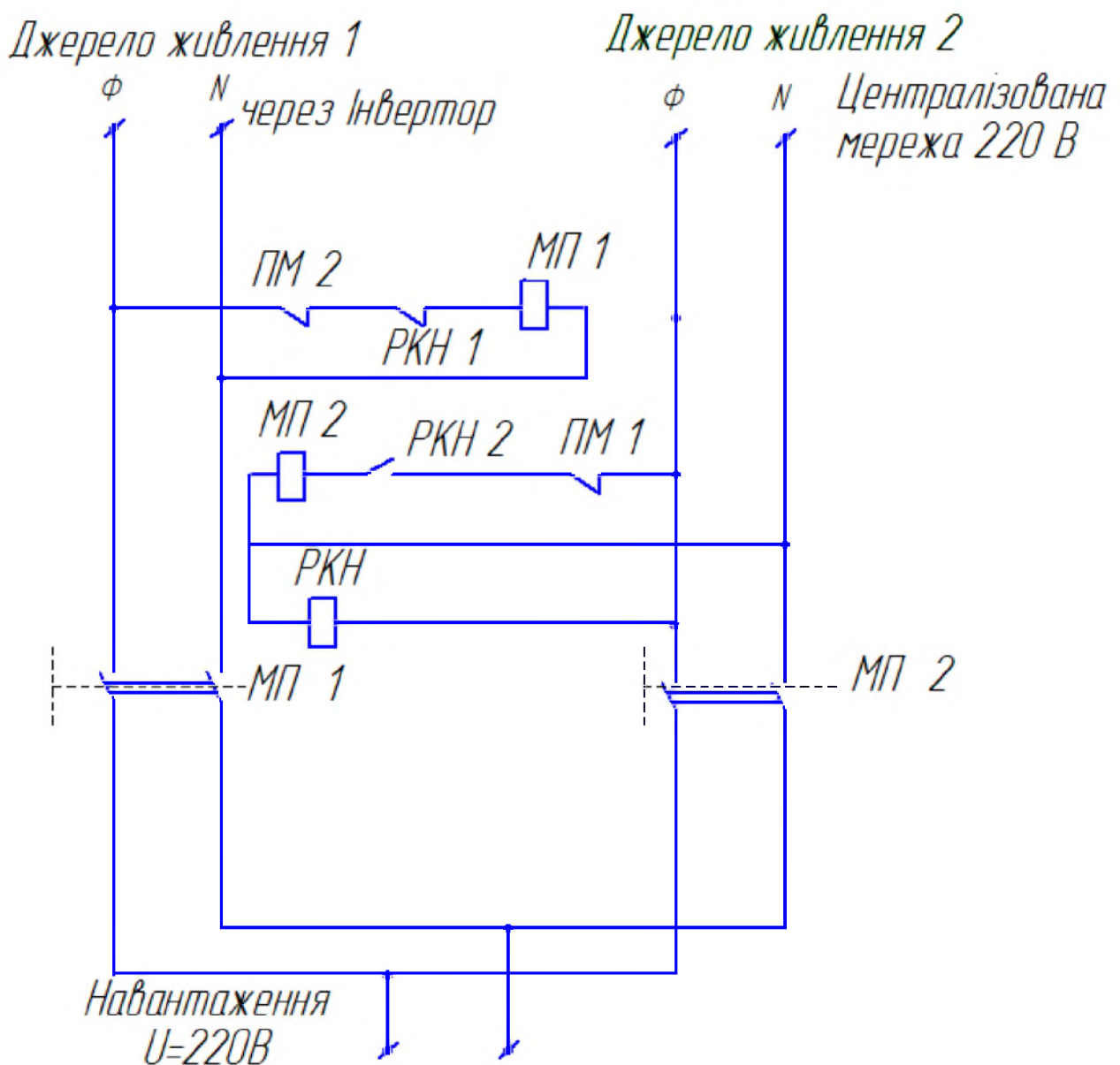


Рисунок 2.6 Структурна схема вводу резерву електроживлення

Не зайвим також буде навести і структурну схему (рис. 2.7) приладу, що забезпечує перемикання виводів від вітряка на АВР і все це до споживача чи навантаження.

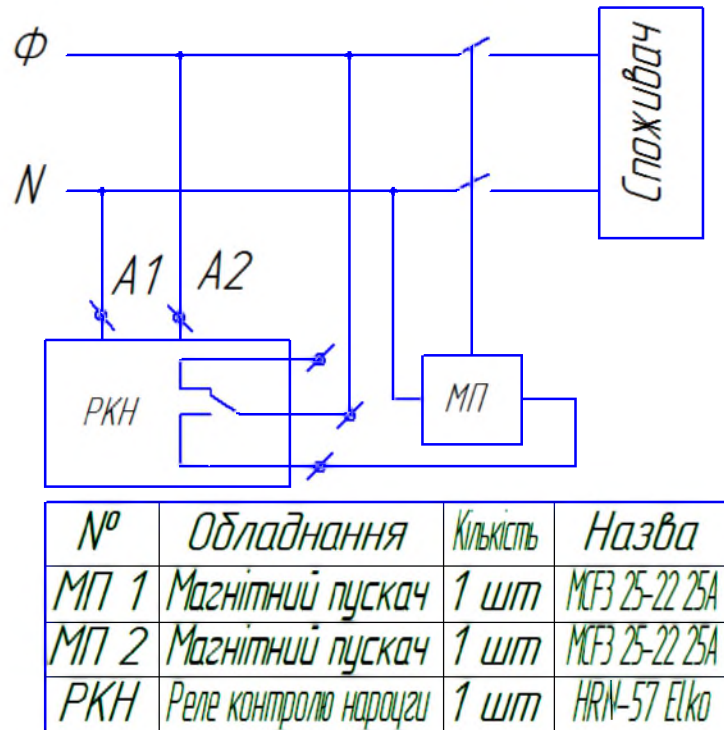


Рисунок 2.7 Прилад перемикачів навіантаження на АВР або вітряк

Основними параметрами захисного обладнання виступають наступні значення:

- Номінальна напруга – АС -230 (В), $f=50$ (Гц);
- Мінімально допустиме значення напруга живлення – $U_{\min}=155$ (В) ;
- Максимально допустиме значення напруга живлення – $U_{\max}=280$ (В) ;
- Точність виміру 2% від $U_{\text{ном}}$;
- Час реакції –0.05-1 (с);
- Комутувана потужність – 4000 (мВА);
- Максимальне значення струму, яке комутується, при активному навантаженні – 16 (А);

- Кількість та тип вихідних контактів – одна група пристроїв перемикання;
- Ступінь захисту – IP40;
- Точність встановлення порогів напруги - 5% від $U_{ном}$;
- Потужність, яка споживається від електричної мережі – не більше за 5 (ВА);
- Механічна та електрична зносостійкість обраного обладнання, становить не менше 10^7 та 10^5 циклів відповідно;
- Контроль за перенапругою та за зниженням напругою становить - 20%...+20% від $U_{ном}$.

Так варто відмітити, що представлений прилад має 2 магнітних пускача (МП) та одне реле контролю напруги (РКН). Габаритні розміри та зовнішній вигляд обраного магнітного пускача MCF3 25-22 наведено на рис. 2.8.

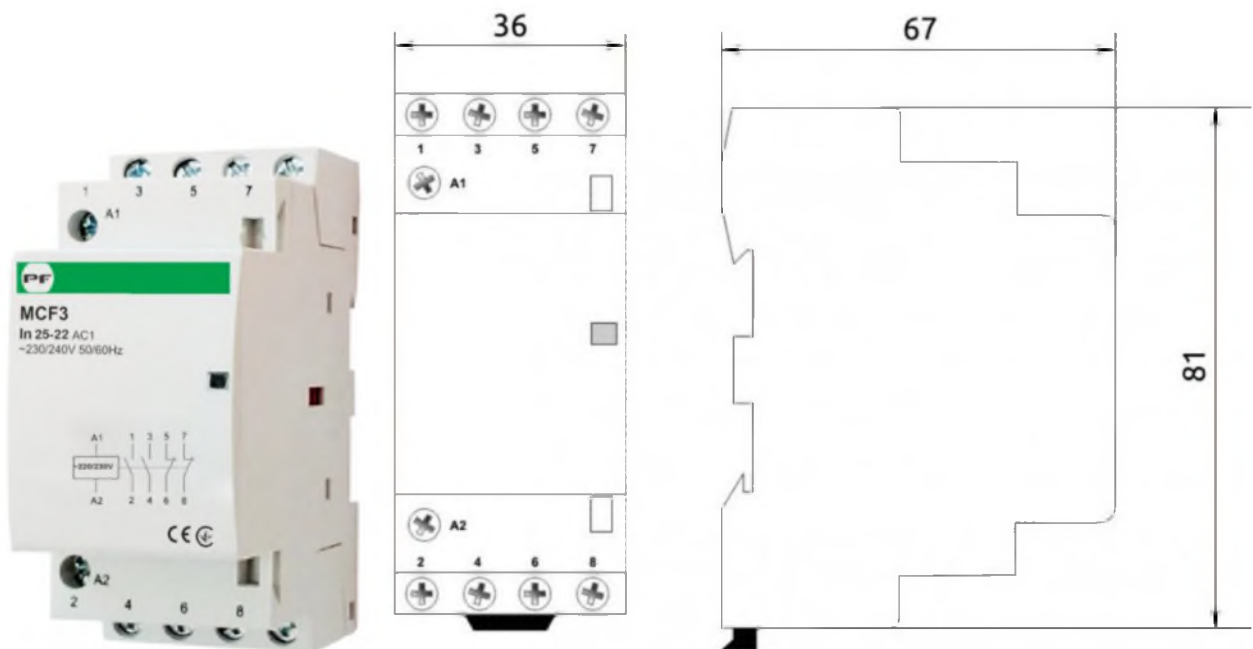


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд та габаритні розміри магнітного пускача (із назвою MCF3 25-22)

Основні елементи із яких складається реле контролю напруги HRN-57 представлено на рис. 2.9.

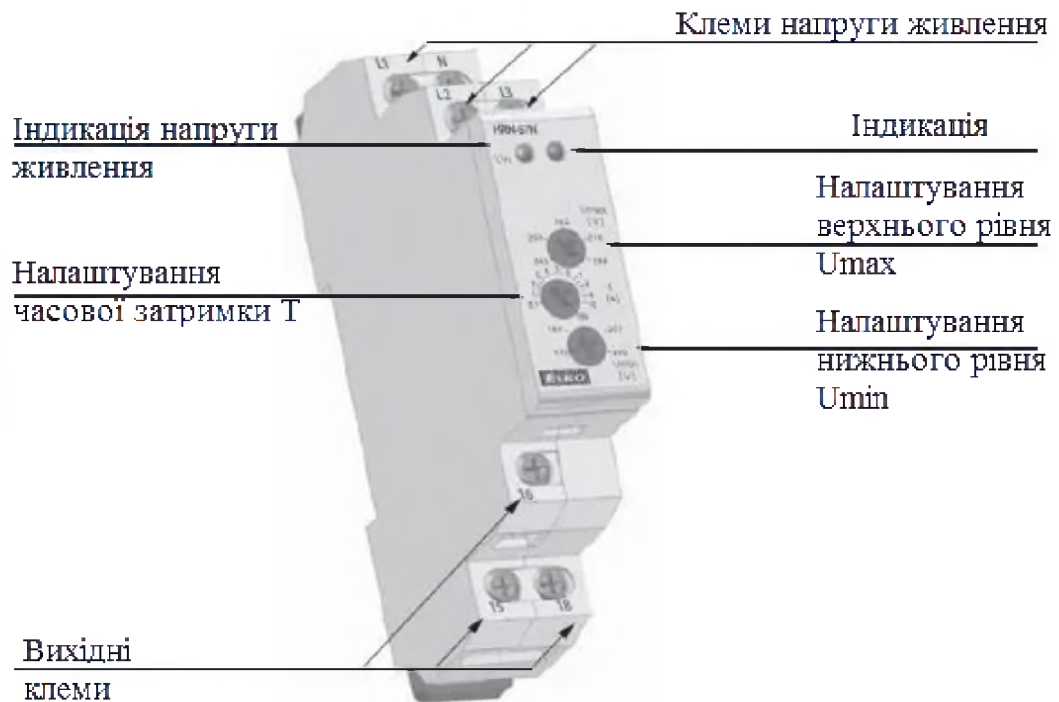


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд та основні елементи реле контролю напруги (із назвою HRN-57)

Вибір інвертора виконується на основі значень пікової потужності у споживанні енергії стандартної напруги $U=220\text{В}$ та частоти $f=50\text{Гц}$. Існує два головні режими роботи інвертора.

– Перший режим є тривалим режим роботи. Такий режим відповідає значенню номінальної потужності самого інвертора.

– Другий режим називається режимом навантаження. У такому режимі більшість типів інверторів протягом 10-20 хвилин, зазвичай до 30, здатні віддавати потужність на 50% більше за номінальну. На протязі декількох секунд більшість типів інверторів здатні віддавати потужність на 150–250% більшу за номінальну. Як правило, потужність самого інвертора близько дорівнює розрахунковій потужності вітрової енергоустановці.

Для максимального споживання електричної енергії під час пікових моментів до 300 (Вт) можливо встановити інвертор потужністю у 350 (ВА). Електроприлад здатен забезпечувати постійне навантаження до 350 (Вт) й

короткочасне навантаження аж до 400-450 (Вт). Інвертор призначений для надання живлення приладам, розрахованими на змінну напругу $U=220$ (В) та частотою $f=50$ (Гц) напругу від акумуляторної батареї із значенням напруги $U=12$ (В).

Основними технічними характеристиками обраного інвертора, структурна схема якого наведена на рисунку 2.9, виступають наступні параметри:

- Значення вхідної напруги ($U_{вх}$), робочий діапазон цього параметру від 12 до 15В.
- Значення вихідної напруги ($U_{вих}$), межі зміни цього параметру, під час зміни $U_{вх}$ й потужності навантаження ($S_{наб}$), становлять від 210 до 220 (В).
- Максимальна навантажувальна потужність ($S_{наб.маx}$), становить – 400-420 (Вт).

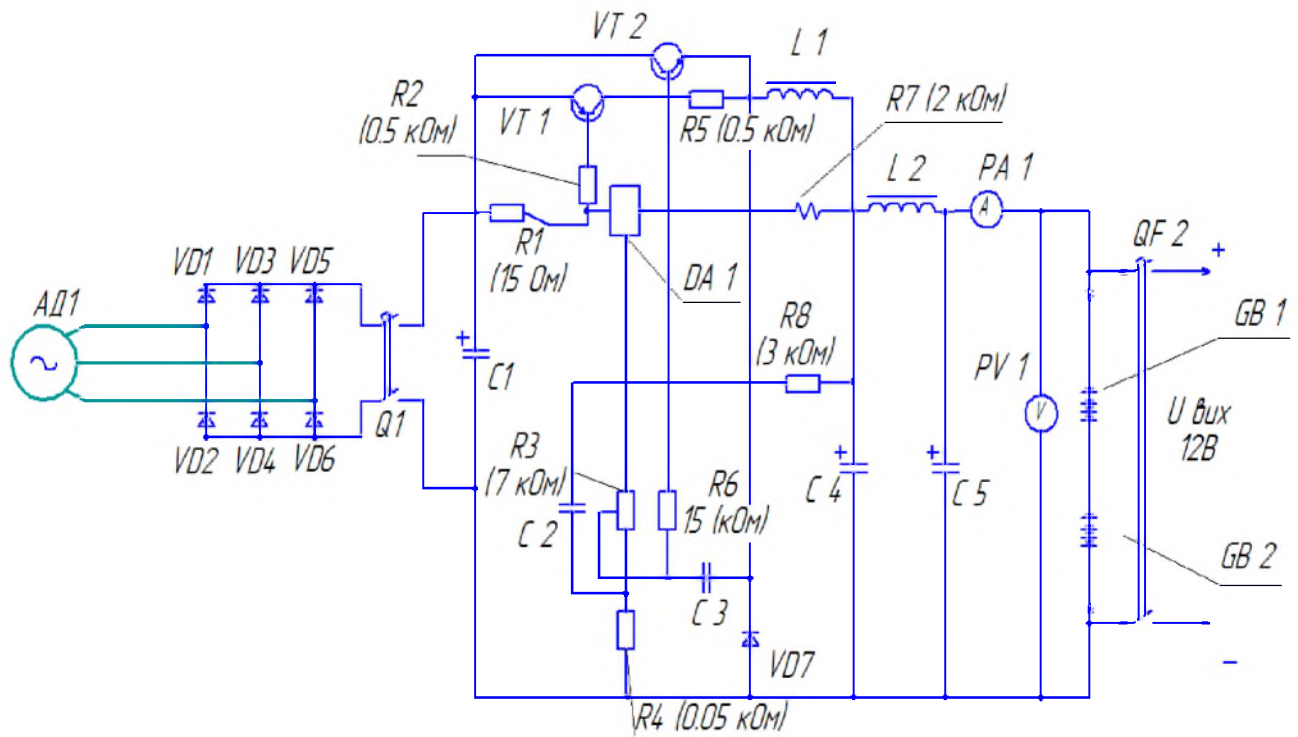


Рисунок 2.9 – Принципова схема інвертора із контролером

Представлені на рис. 2.9 позначення компонентів інвертора були наведені у табл. 2.3

Таблиця 2.3 – Основні елементи інвертора

Позначення	Обладнання	Назва (тип)
DA1	Генератор – давач імпульсів	МК-142Н5А
DA2	Стабілізатор напруги живлення пристрою DA1	TL431А
DA3	Стабілізатор значення вихідної напруги	LL34 3-24В
VT1, VT2, VT3, VT4	Розрядні польові транзистори	IRF630N
K1	Реле захисту струму	MF63
VT5, VT6	Потужні польові транзистори	Тір 35с
T ₁	Трансформатор	-
R ₁ , R ₂ , R ₄ –R ₈ ,	Резистори	15(Ом)-1(кОм)
R ₃	Підстроювальний опір	10 кОм
QF ₂	Автоматичний вимикач	ВА-103М, І _н =63(А)
QF ₁	Автоматичний вимикач	ВА-103М, І _н =50(А)
C ₁ –C ₅	Конденсатор	175
L ₁ , L ₂	Дросель	500 (мГн); 250 (мГн);
Vd ₁ –Vd ₆	Діод	КД-213А 9105
Vd ₇	Діод	КД-201
PV ₁	Вольтметр	DC 0-100V
PA ₁	Амперметр	E16-22FAD I-0-100А

Основний принцип представленої ланки із компонентів керування інвертором полягає у наступному, генератор (DA1) виробляє прямокутні імпульси із значенням частоти близьким до 50 (Гц) та з захисними паузами, які здатні виключати одночасні відкривання потужних транзисторів для комутації (VT5 й VT6).

Якщо на виході Q1 чи Q2 виникає низький рівень напруги, то відкриваються транзистори пари VT1 та VT3 або пари VT2 та VT4, що викликає швидкоплинну розрядку ємностей затвора, а разом із цим й форсоване закриття транзисторів VT5 та VT6.

Тоді власне інвертор, є складеним за двотактною схемою.

Детально вихідна частина інвертора представлена на рис. 2.10.

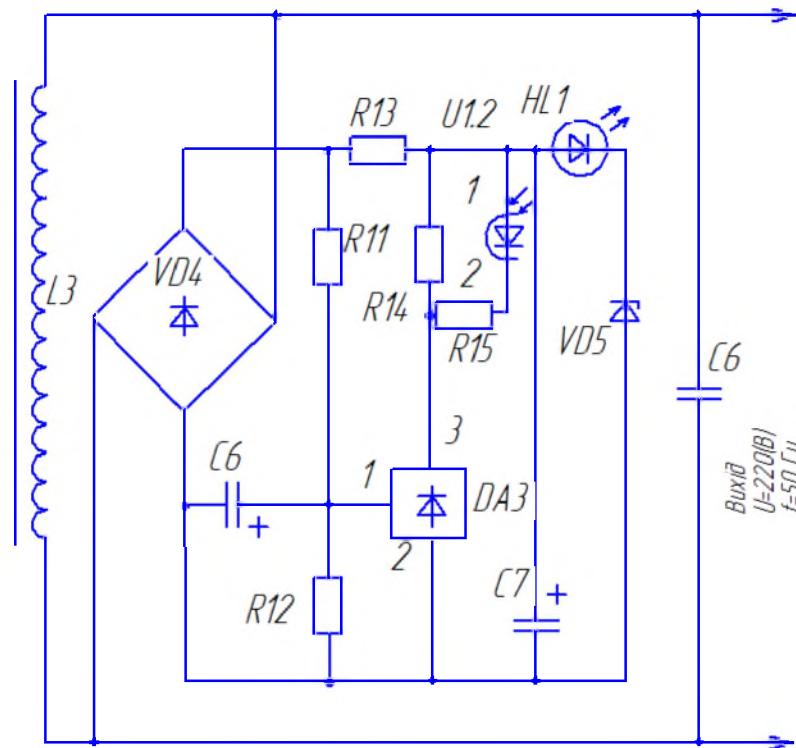


Рисунок 2.10 – Деталізована схема вихідної частина досліджувального інвертору

Тож можна розглянути докладніше роботу вузла стабілізації вихідної напруги. Коли вихідна напруга перетворювача із будь-якої причини буде перевищувати встановлене значення, тоді напруга на резисторі під назвою R_{1,2} перевищить у 2.5 значення струму, який проходить через стабілізатор (DA₃) при чому зросте воно різко. Тоді виходи Q1 та Q2 переключаться у стан низького рівня напруги, в транзистори VT6 і VT5 доволі швидко закриваються, а струм у обмотках L1 і L2 змінить стан із появою на виходах протифазних імпульсів.

Реле самого вузла струмового захисту є спеціальним, тобто не є серійним. Обмотка реле містить декілька витків, їх кількість обирають виходячи із потрібного значення струму спрацювання захисту власне ізольованого дроту, котрий розрахований на протікання струму від 25 до 30 (А).

У інверторі також наявний вузол захисту струму, який зібраний на реле назвою К1. Для виконання струмового захисту самого інвертора застосовується спеціальне реле, котре виготовлене на основі герметизованих магнітокерованих контактів (або скорочено «геркон»). Цей пристрій має наступні основні параметри:

- 1) Максимальна комутаційна потужність – 10 (Вт);
- 2) Максимальна напруга комутації - 190 (В);
- 3) Максимальний струм комутації – 0,3 (А);
- 4) Максимальний час відпускання – 0,35 (с);
- 5) Максимальний час спрацювання – 1,1 (с);
- 6) Мінімальний коефіцієнт повернення – 0.38 (в.о.);
- 7) Максимальний коефіцієнт повернення – 0,92 (в.о.).
- 8) Мінімальне значення спрацювання МРС– 12 (А).
- 9) Максимальне значення спрацювання МРС– 70 (А).

Тож знаючи паспортні дані основних приладів можна визначити й кількість витків реле обмотки (W). Якщо для забезпечення спрацювання потрібна МРС (магніторушійна сила) значення $F=70$ (А), то вважаючи струм спрацювання відомим та рівним $I_{cp} = 30$ А, кількість витків буде визначатися виразом (2.14).

$$W = \frac{F_{\max}}{I_{cp}} \quad (2.14)$$

де: – W – кількість витків (шт.);

– I_{cp} – струм спрацювання;

$F_{\max}$ – Максимальне значення спрацювання магніторушійної сили, яке дорівнює 70 (А).

При підставленні паспортних даних отримуємо:

$$W = \frac{70}{30} \approx 2.33 \text{ можна прийняти } W = 3 \text{ (шт)} \quad (2.15)$$

В основі розрахунку магнітного ланцюга пристрою лежить закон повного струму, що може бути виражений наступним чином:

$$F = \oint H dL \quad (2.16)$$

де: – d – шлях інтегрування;

H – вектор напруженості магнітного поля.

Якщо враховувати, що у розглянутому випадку обмотка намотується на сам корпус пристрою, то можливо прийняти, що L є довжиною балона, і тоді справедливим буде вираз:

$$H \cdot L = \oint H dL \quad (2.17)$$

Це відбувається у випадку, коли обмотка розташовується у такий спосіб, щоб контакти були на осевій лінії самої обмотки, тобто в її центрі. Якщо ж обмотка знаходиться на торці, тоді значення напруженості H зменшиться майже у два рази. Таким чином можна зробити висновок, що переміщуючи обмотку вздовж самого балона, можливо в певних діапазонах регулювати чутливість реле.

2.6 Захист від аварійних режимів у мережі.

Для захисту від короткого замикання системи (к.з.) вживають спеціальних заходів, які обмежують значення струму короткого замикання, ними можуть виступати:

- встановлення обмежувачів струму – електричні реактори;
- використання понижувальних трансформаторів із розщепленою обмоткою у низькій напрузі;
- застосування розщеплених паралельно електричних ланцюгів, що означає відключення секційних та з'єднувальних шини вимикачів;
- застосування пристрої релейного захисту з метою відключення пошкоджених або аварійних ділянок ланцюга;
- використання вимикаючого електрообладнання, а саме швидкодіючих комутаційних апаратів із функцією обмеження за струмом короткого замикання, це може бути плавкі запобіжники чи автоматичні вимикачі.

Отже визначимо струми короткого замикання. Розрахункові точки, де буде досліджуватися коротке замикання (КЗ) приведені на рис 2.11.

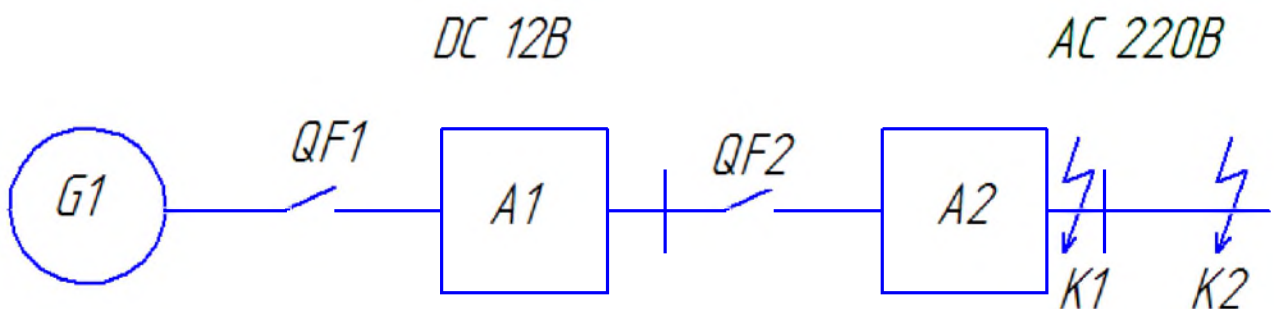


Рисунок 2.11 – Побудована структурна схема для визначення струмів короткого замикання

Так резервне живлення споживача здійснюється від вітрогенератора (на рис 2.11. - G1) через контролер (на рис 2.11. - A1) та інвертор (на рис 2.11. - A2). Тоді за повний опір приймемо $Z_{\Pi} = r_{\Pi} = 0.15$ (Ом). Тоді початкове значення

періодичної складової струму при однофазному КЗ від генератора G1 у точці K1, можна розрахувати за формулою:

$$I_{K1}^{(1)} = \frac{U_H}{Z_l + Z_p} \quad (2.18)$$

де: – U_H – номінальне значення напруги, яке дорівнює чисельно 220(В);

- Z_{II} – повний опір приладів – контролера та інвертору (Ом);
- Z_l – повний опір лінії (Ом);

$$Z_l = \sqrt{x_l^2 + (2r_l)^2} \quad (2.19)$$

де: – x_l – індуктивний опір лінії прямої послідовності розрахункової схеми (Ом);

- r_l – активний опір лінії прямої послідовності розрахункової схеми (Ом).

Тоді до точки КЗ (K1) обираємо провід марки АС30 та довжиною $l=15(\text{м})$ із питомим активним $r_0= 0.3545$ (Ом/км); та реактивним опором $x_l = 0.011$ (Ом/км).

$$r_l = r_0 \cdot l = 35.45 \text{ (мОм)} \quad (2.20)$$

$$x_l = x_0 \cdot l = 1.1 \text{ (мОм)}$$

Тоді вираз для Z_l матиме вигляд:

$$Z_l = \sqrt{1.1^2 + (2 \cdot 35.45)^2} = 73.5 \text{ (мОм)} \quad (2.21)$$

А для знаходження струму к.з. у точці K1:

$$Z_l + Z_p = 0.073 + 0.14 = 0.213 \text{ (Ом)}$$

(2.22)

$$I_{K1}^{(1)} = \frac{220}{0.213} = 1.032 \text{ (кА)}$$

Під час живлення від самої системи та КЗ у точці К2 значенням опором системи можна знехтувати і тоді вираз для розрахунку струму прийме вигляд (2.18)

$$I_{K2}^{(1)} = \frac{220}{0.073} = 3.013 \text{ (кА)} \quad (2.23)$$

РОЗДІЛ 3. ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРУ. ВИКОРИСТАННЯ УМОВ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

3.1 Керування лопатями вітрогенератора.

Використання умов оптимальної генерації дозволить виконати вилучення максимальної кількості енергії вітру із загального вітрового потоку. Це стає можливим завдяки оптимальному керуванню лопатями вітрогенератора. При цьому постає потреба у впровадженні контролерів за параметрами у математичну модель

Так підтримка значення оптимального коефіцієнта гальмування у повітряному потоці може бути виконана за (3.1)

$$\beta_{opt} = \frac{2 \cdot \arctan \left(\frac{1}{\lambda_d \frac{r}{R}} \right)}{3} \quad (3.1)$$

де: r – Радіус елемента крила турбіни вітряка (м);

λ_d – розраховане значення швидкохідності (у розділі 2);

В той же час важлива підтримка значення максимального коефіцієнта ковзання. Параметр цей, можливо знайти за (3.2)

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{\Delta W} \quad (3.2)$$

Із виразу (3.2) видно, що приймає максимальне значення коефіцієнт при оптимальному куті, тобто при α_{opt} .

А власне значення α_{opt} можна отримати із врахуванням складових виразу (3.3).

$$\begin{cases} \delta_{opt} = \beta_{opt} - \alpha_{opt} \\ \delta = \delta_{opt} + \alpha_{кут} \end{cases} \quad (3.3)$$

$\alpha_{кут}$ є значенням відхилення кута регулювання від оптимального значення.

Також варто дослідити сили, які діють на вітроколесо генератора під час різних режимів роботи (номінальному та критичному).

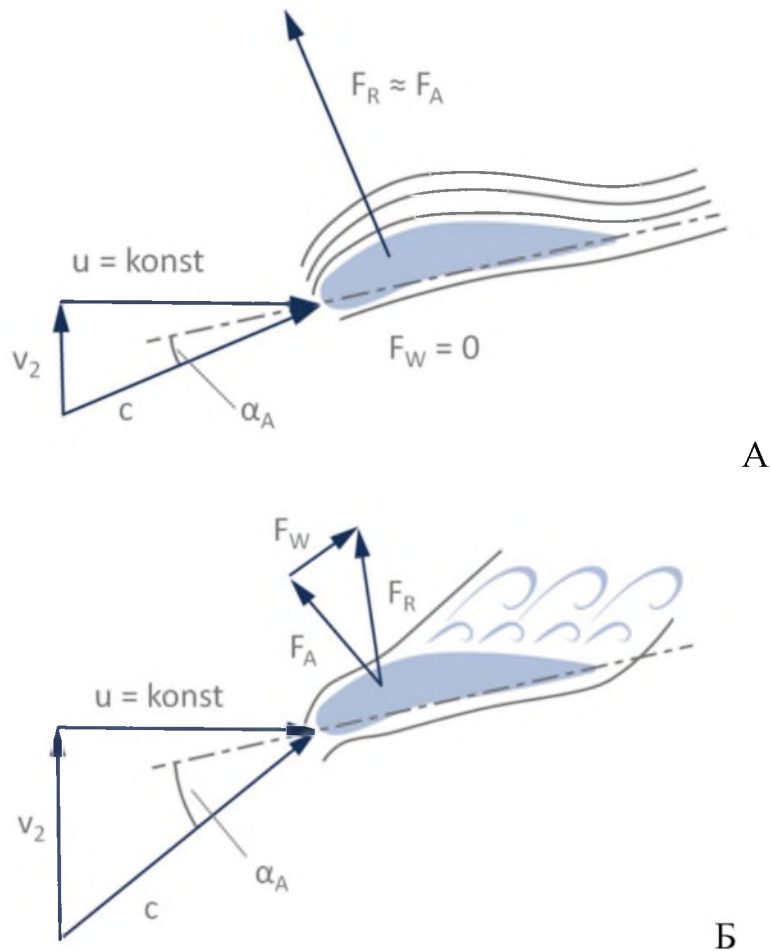


Рисунок 3.1.а – Схема напрямку вітру та реакції на нього вітрової турбіни при нормальній швидкості вітру; 3.1.б – Схема напрямку вітру та реакції на нього вітрової турбіни при максимальній швидкості вітру

На рис 3.1. приведені параметри, за допомогою яких можна якісно виконувати керування лопатями турбіни вітряка, аби отримувати максимальну потужність. Ці параметри також необхідно вимірювати й у підсистемі математичної моделі.

Так стійкість (F_w) можна визначити за (3.4)

$$F_w = \frac{v_p^2 \cdot \rho \cdot t_k \cdot r \cdot c_\theta(\alpha)}{2} \quad (3.4)$$

Плавність регулювання(F_A):

$$F_A = \frac{v_p^2 \cdot c_a(\alpha) \cdot r \cdot \rho \cdot t_\theta}{2} \quad (3.5)$$

Результуюча потужність (F_{AW}) для елемента профіля вітрового колеса може бути знайдена за (3.6)

$$F_{AW} = F_w + F_A \quad (3.6)$$

– Значення тангенціальної сили (F_t).

$$F_t = \frac{v_p^2 \cdot \rho \cdot t_\theta \cdot (c_a \cdot \sin \beta - c_w \cdot \cos \beta) \cdot r}{2} \quad (3.7)$$

Осьова сила (F_{ax}).

$$F_{ax} = \frac{v_p^2 \cdot t_\theta \cdot \rho \cdot r \cdot (c_a \cdot \sin \beta - c_w \cdot \cos \beta)}{2} \quad (3.8)$$

Як видно на представлених схемах (рис. 3.1) кут атаки α_A залежить від значення швидкості вітру (v). При високій швидкості вітру (над номінальний режим або критичний) кут атаки стає настільки великим, що повітряний потік більше не може відповідати геометрії профілю на стороні забору енергії вітру – верхня частина профілю. Це призводить до нижчого коефіцієнта продуктивності лопаті ротора та меншої кінетичної енергії, яка відповідає за перетворення механічної енергії обертання в електричну. Таким чином, система працює в діапазоні номінальної потужності.

Такий принцип обмеження потужності має певну інерційність і тому момент часу чи певну ситуацію на профільній ділянці неможливо точно вказати. Тож короткочасні пориви призводять до певних піків у генерації потужності вітряка. Однак, оскільки переважно швидкість є плавною величиною та може розглядатися за малий час як постійне значення, то такі коливання потужності перетворюються на більший крутий момент у трансмісії.

На рис. 3.2 показана залежність коефіцієнта потужності від значення швидкості та кута нахилу лопатей (δ). Ця характеристика була побудована на основі вище приведеному аналізу та математичної моделі, яка буде представлена у наступному розділі роботи.

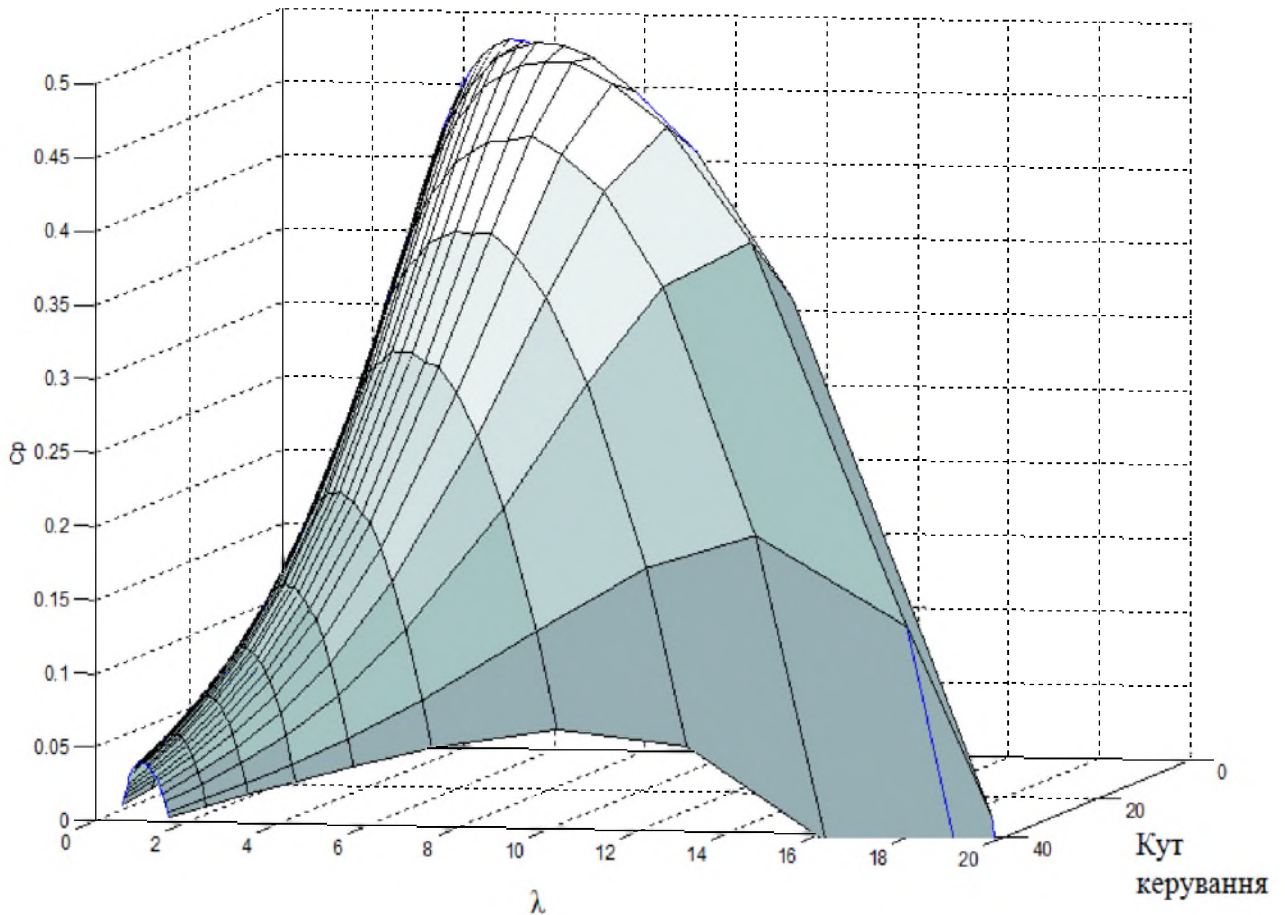


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнту потужності від кута нахилу лопатей та швидкості вітру $\lambda(c_p, \beta)$

За приведеним принципом потужність вітрогенератора коригується до швидкості вітру шляхом повороту лопатей (відбувається контроль значення кута атаки). При цьому робоче положення для найкращого застосування потужності це кут нахилу рівний нулю. Регулювання призводить до зниження значення вихідної потужності. Розглянемо різні режими роботи вітрового колеса:

1) Коли вітер є меншим за $V < 3$ (м/с). Тоді вітрогенератор не виробляє електрики, тому що вітер є занадто слабким, щоб привести в рух вал ротора. Лопаті обертаються в так званому положенні оперення, а значення кут нахилу становить близько 90° .

Вітроколесо стоїть на місці чи обертається дуже повільно, що називається «непомітним» обертанням.

2) Нормальне (робоче) значення вітру, $V=3-12$ (м/с). Вітрова турбіна обертається та виробляє при цьому енергію, проте вітер все є ще слабким, аби досягти номінальної потужності турбіни. При цьому кут нахилу 0° , лопаті колеса знаходяться у оптимальній робочій точці. Якомога більше енергії вітру, що надходить на колесо перетворюється у механічну. Із збільшенням швидкості вітру також збільшується швидкість валу генератора, режим «робота із змінною швидкістю». Такий режим необхідне, для того, аби підтримувати значення швидкості постійним й, таким чином, досягати оптимальне значення ефективності.

3) Під час сильного вітру $V=12-25$ (м/с). дійсне значення потужності вітру є занадто високим, тому вихідну потужність системи варто обмежити. Тому на цьому етапі система активно працює у режимі «нагнітання». Кут нахилу при цьому збільшується пропорційно із швидкістю вітру (δ від 0° до приблизно $25-30^\circ$), а підйомна сила в цей час впливає таким чином, що вихідна потужність турбіни вітряка залишається постійною при номінальній потужності.

4) Під час штормового вітру $V>25$ (м/с). вітер настільки сильний, що вітрогенератор доводиться вимикати, аби унеможливити пошкоджень колеса. Кут нахилу спри цьому становить майже 90° , а лопати знаходяться у положенні «на ребро».

Поворот лопатей реалізується системою кроковим рухом валу електричного приводу. Через те, що він розроблений, як незалежна та окрема система для кожної лопаті валу ротора, то й можна розглядати їх, як три основних гальма. Причому важливим є те, що налаштування лише однієї лопаті вітряка, котра переводиться у положення за напрямком вітру, достатньо для безпечного вимкнення системи із усіх активних станів.

3.2 Додаткові методи отримання оптимальної потужності генерації вітряка.

Іншим методом керування за потужністю потоку вітрогенераторів є поворот гондоли від вітру. Такий метод підходить для вітряків невеликої потужності, під час моделювання роботи вітрогенератора цей метод не застосовувався, однак про нього також слід пам'ятати під час проектування вітропарку.

Зазвичай це відбувається завдяки тязі на бічній лопатці (або вона ще має назву поперечної лопатки) чи на самому роторі колеса. На рис. 3.3 наведена схему основних елементів вітрогенератору під час контролю потужності за допомогою повороту гондоли



Рисунок 3.3 – Основні елементи вітрогенератору під час контролю потужності за допомогою повороту гондоли у нормальному режимі роботи

Також цим методом передбачений і режим штормового вітру, під час нього уся гондола повертаються у проти хід потоку, на рис. 3.4 схематично

продемонстровано положення гондоли вітряка під час штормового вітру та його різних напрямках.

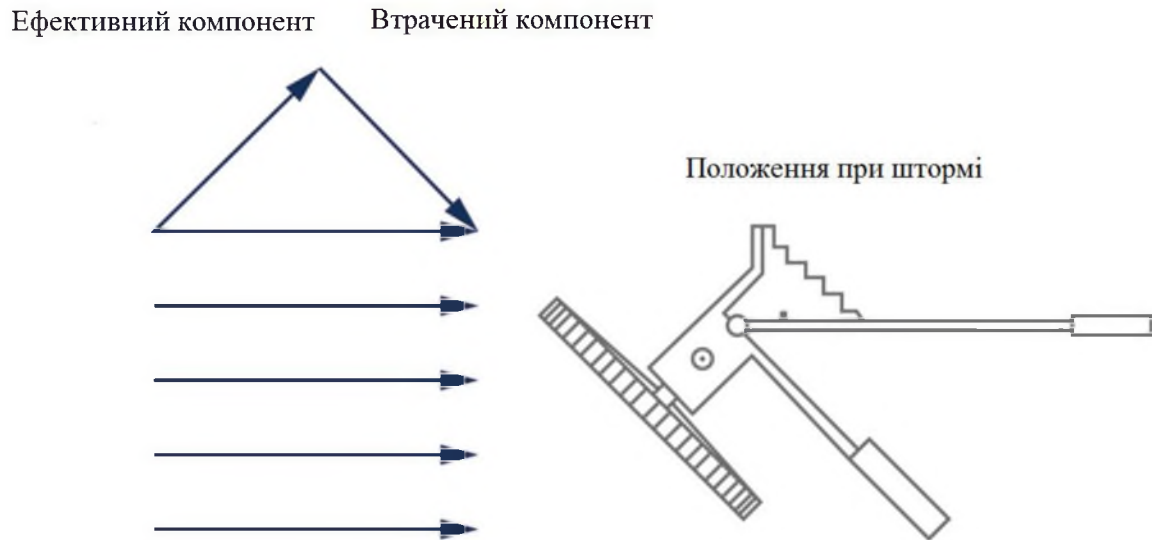


Рисунок 3.4 – Основні елементи вітрогенератору під час контролю потужності за допомогою повороту гондоли під час штормового вітру

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРУ

Для побудови математичної моделі досліджуваного вітряка та її послідуного аналізу, було обрано пакет Matlab та її прикладну бібліотеку Simulink.

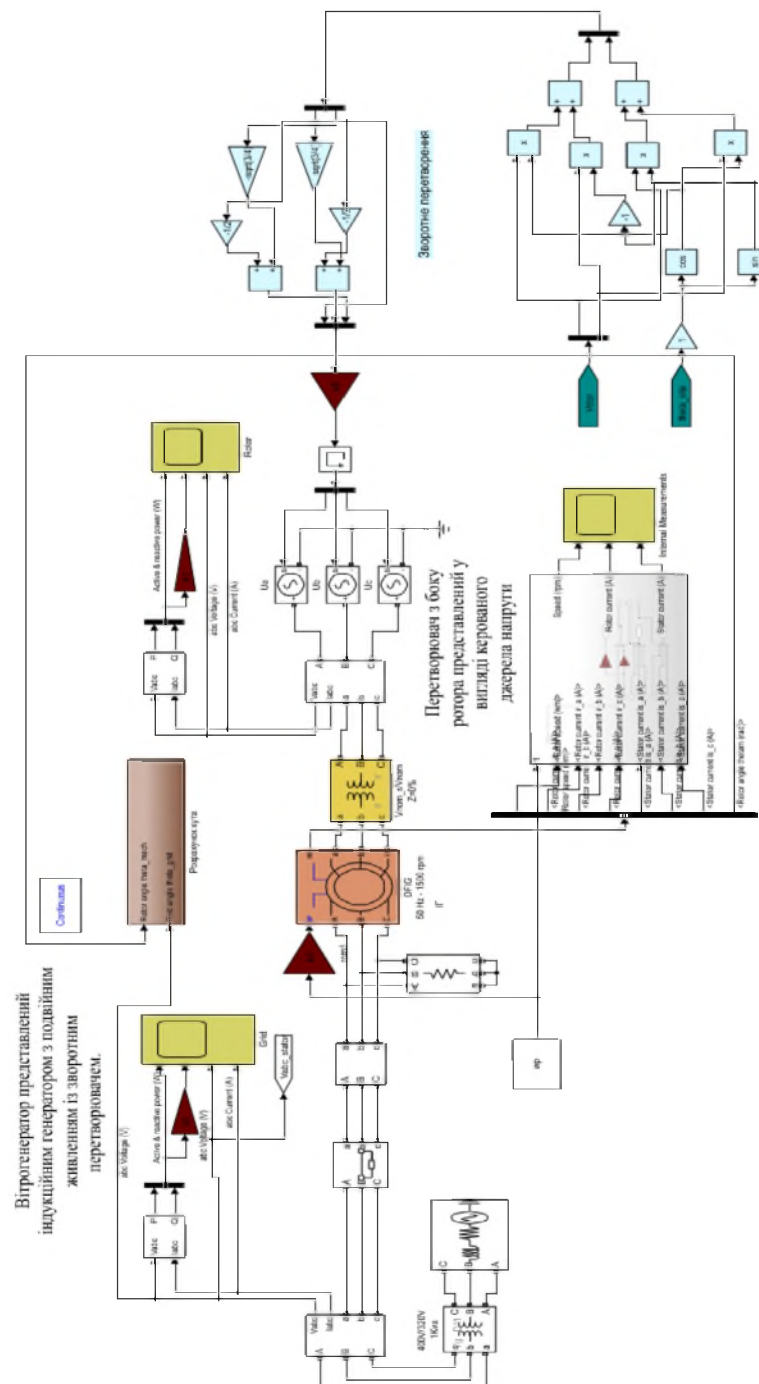


Рисунок 4.1 – Загальна електрична мережа із вітрогенератором

На рис. 3.1 представлена електрична мережа із вітряком, контролером, інвертором та навантаженням.

Окрім цього була побудована спрощена модель вітрогенератора, яка представлена на рис. 4.2. Зокрема тут можна дізнатися задане та реальне значення струму, швидкості, кута повороту лопатей вітрогенератора.

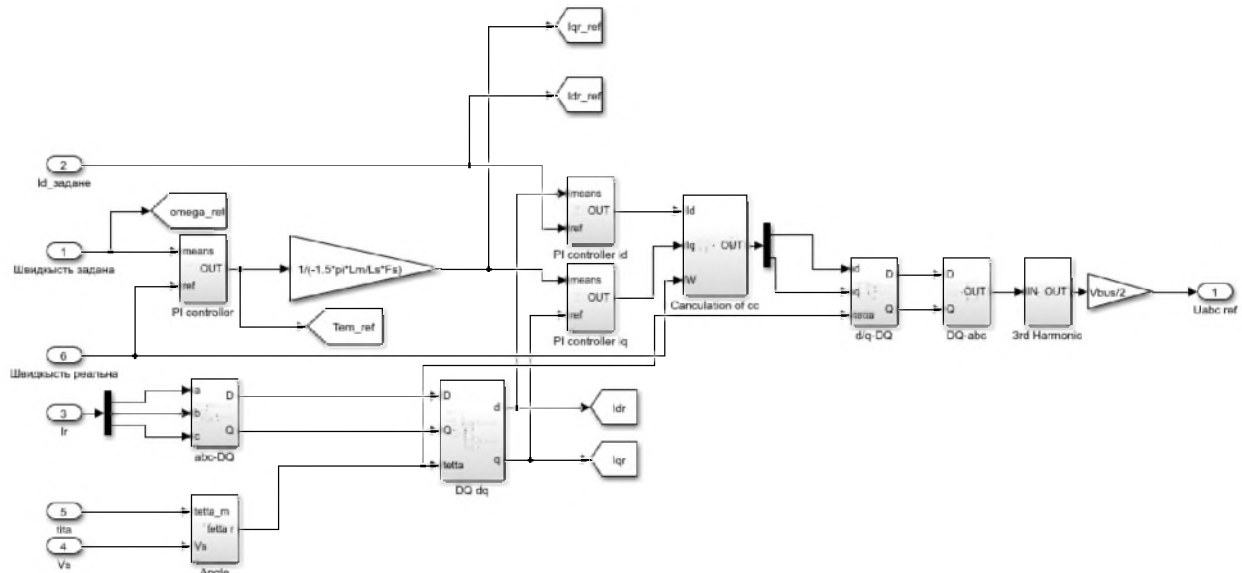


Рисунок 4.2 – Підсистема контролю за значенням напруги вітрогенератора

У структурній схемі вітрогенератора рис. 3.1 використовується асинхронний генератор у ЕП, приклад із параметрами такого використання на рис. 4.3.

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]: [290e3, 500, 50]

Stator resistance and inductance [Rs, Ls] (pu): [0.021, 0.075]

Rotor resistance and inductance [Rr', Lr'] (pu): [0.0135, 0.055]

Mutual inductance Lm (pu): 3

Inertia constant, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]: [2, 0, 2]

Initial conditions

[slip, th(deg), ia, ib, ic(pu), pha, phb, phc(deg)]:

[-8.89496e-048 0 0.280896 0.280896 0.280896 -89.7425 150.258 30.2575]

☐ Simulate saturation

[i; v] (pu): [2.12, 0.4201, 0.8125, 1.0979, 1.4799, 2.2457, 3.2586, 4.5763, 6.4763; 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5]

Рисунок 4.3 – Основні параметри асинхронного електроприводу

Перетворення Парка застосований у вітрогенераторі, зображений на рис. 4.4.

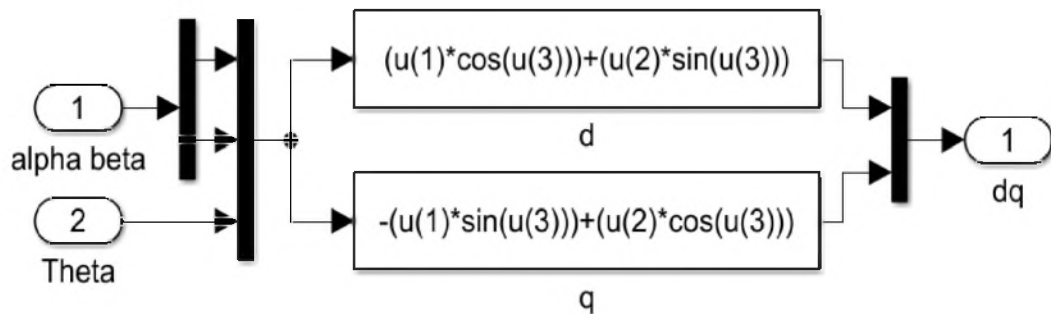


Рисунок 4.4. Перетворення Парка

На рис. 4.5 показана осцилограма активної та реактивної потужності вітрогенератора у (в.о.).

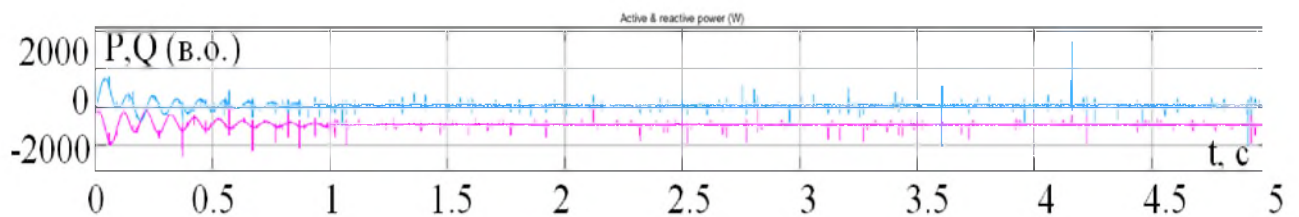


Рисунок 4.5 – Активна та реактивна потужність вітрогенератора

На рис. 4.6 показана осцилограма напруга та струм статора та вітрогенератора.

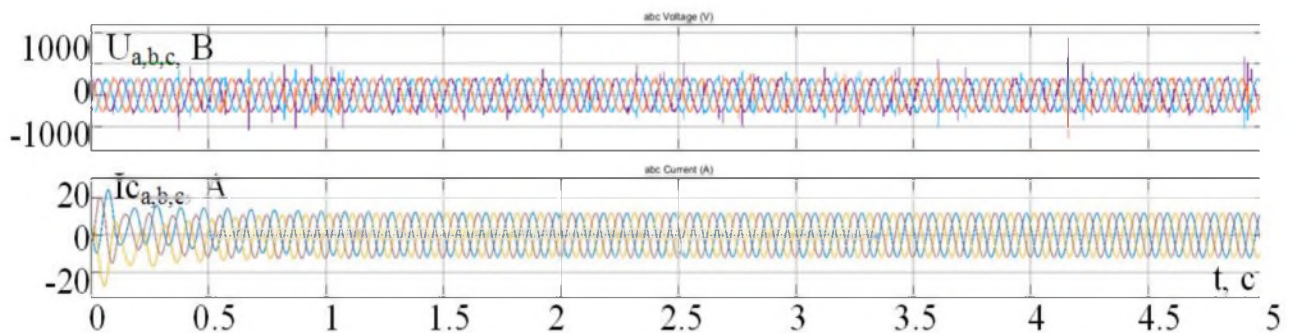


Рисунок 4.6 – Напруга та струм статора вітрогенератора

Осцилограми вихідної напруги та струму асинхронного генератора вітряка наведено на рис. 4.7

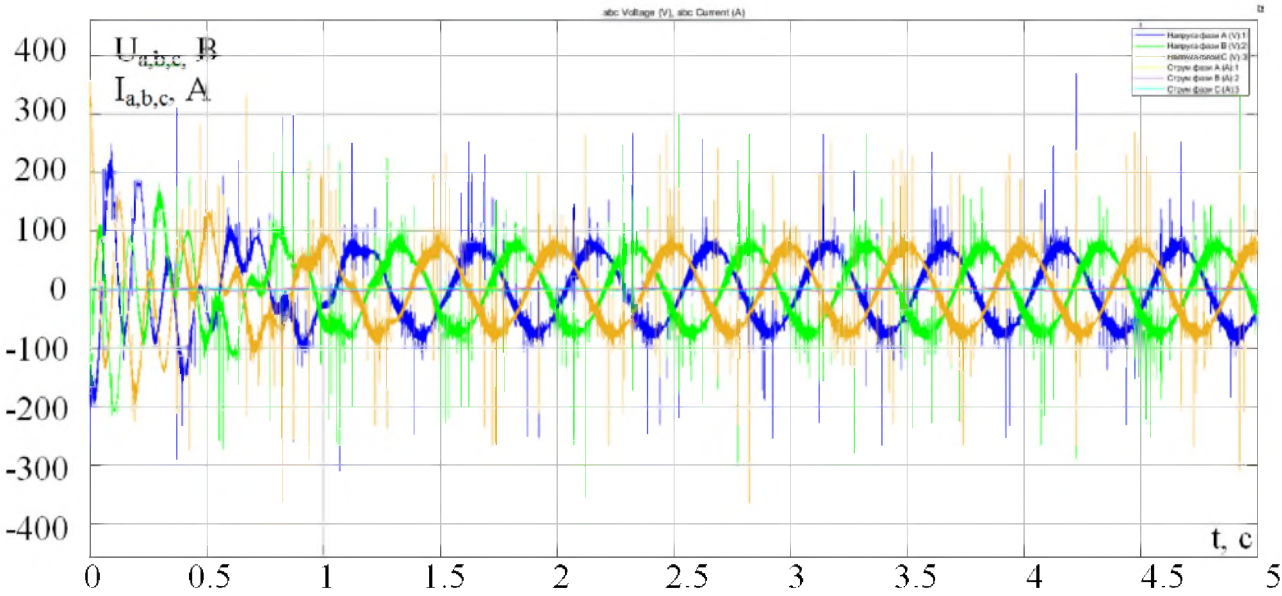


Рисунок 4.7 – Вихідні напруги та струми асинхронного генератора

Осцилограми вихідних струмів статора та ротора асинхронного генератора вітряка представлено на рис. 4.8

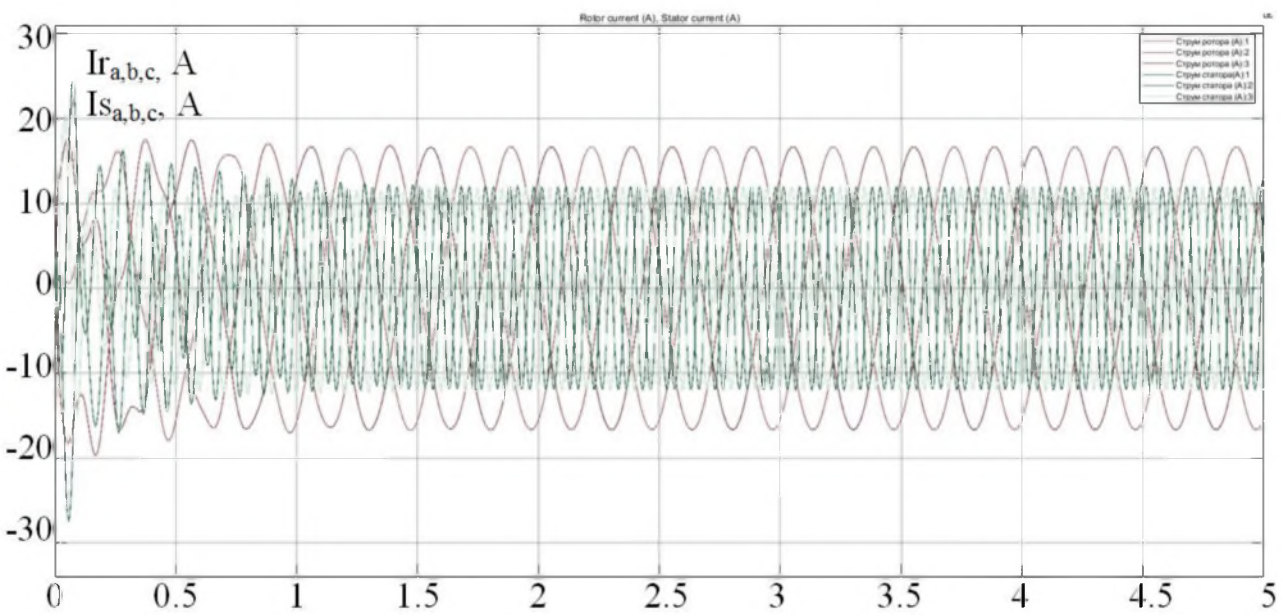


Рисунок 4.8 – Вихідні струми статора та ротора асинхронного генератора

На рис. 4.9 наведена швидкісна характеристика вітроколеса.

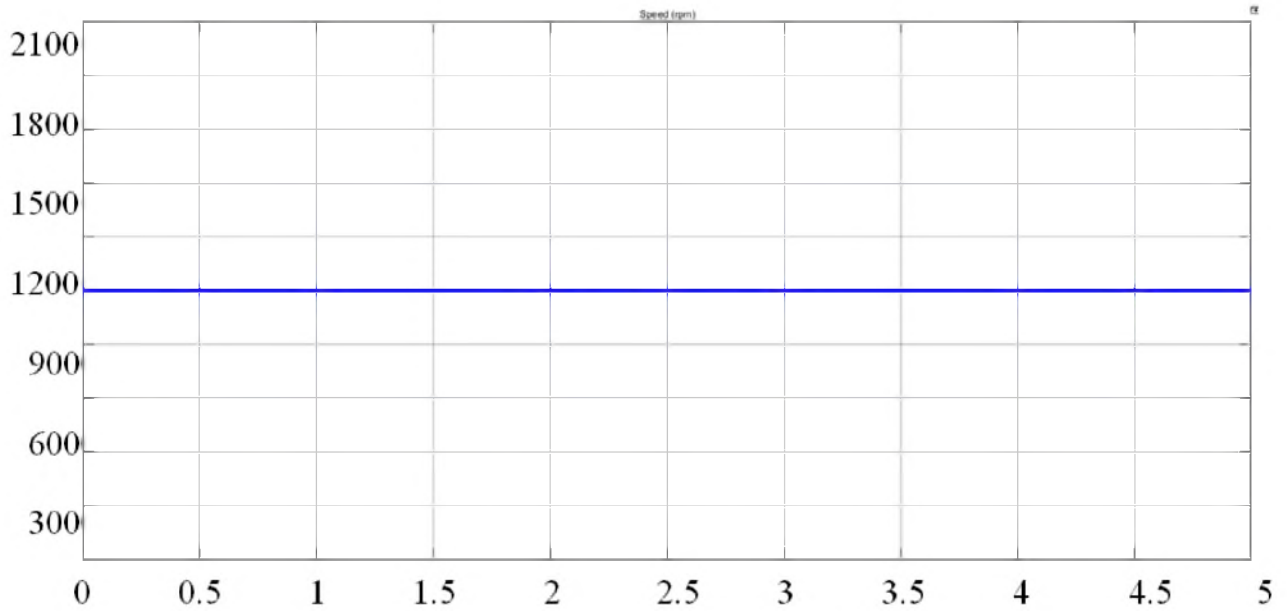


Рисунок 4.9– Швидкісна характеристика вітроколеса $w(t)$ у [рад/с]

Підсистема контролю за значенням кута нахилу лопатей представлена на рис. 4.10

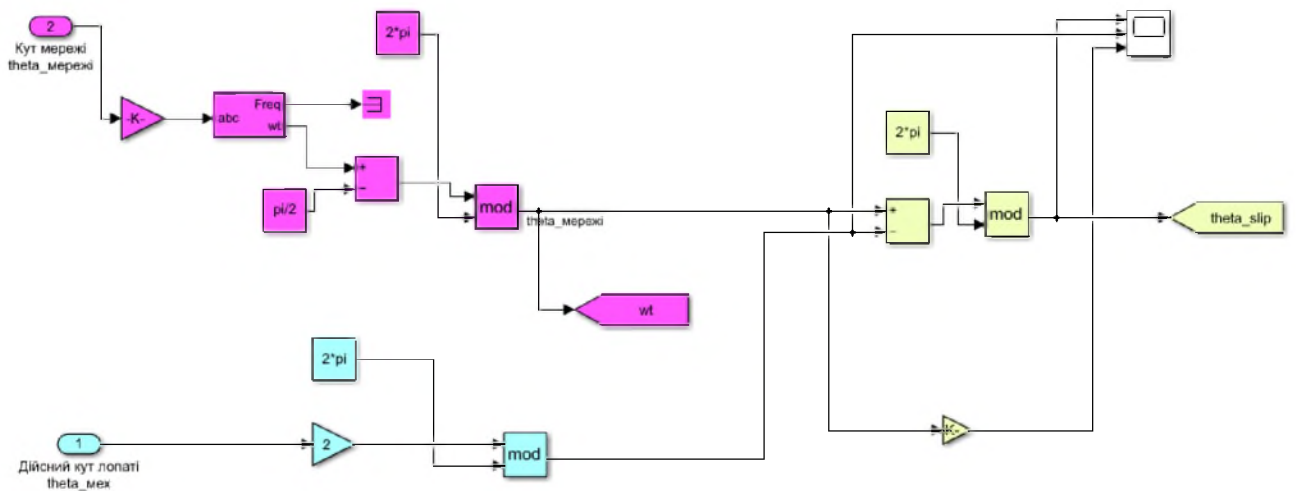


Рисунок 4.10– Підсистема контролю за значенням кута нахилу лопатей вітряка

В той же час на рис. 4.11 представлена роботу такої підсистеми.

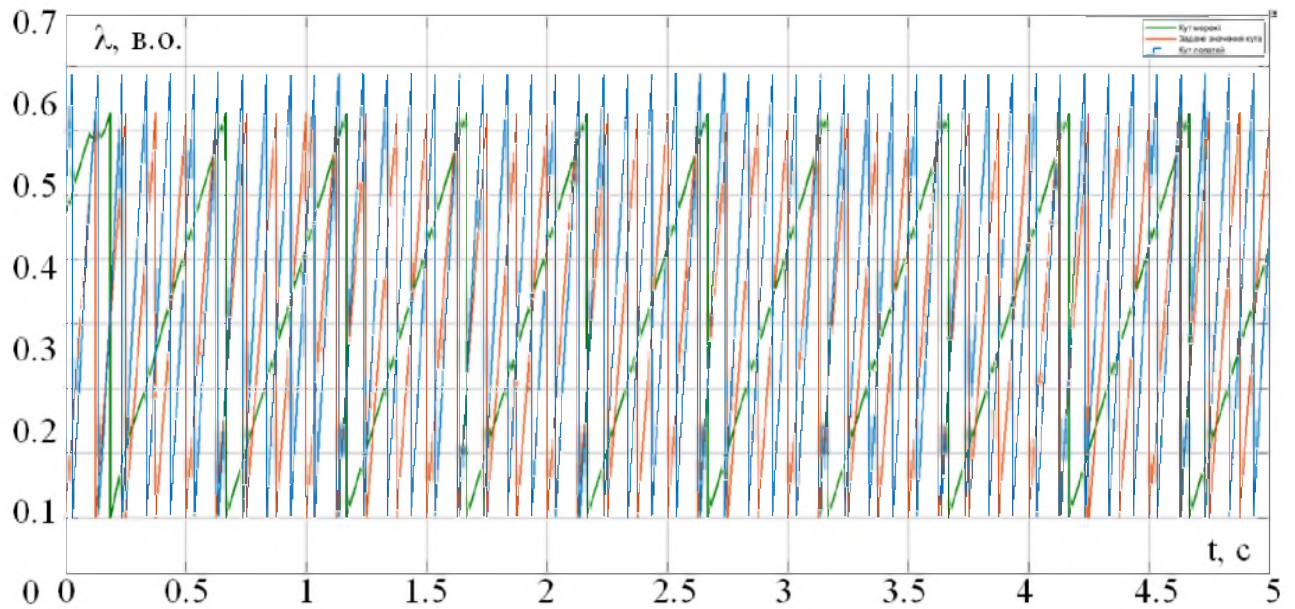


Рисунок 4.11– Робота системи контролю за кутами нахилу лопатей вітрового колеса

Загальна підсистема контролю за параметрами усього вітрогенератора – струми, кути нахилу, частота наведена на рис 4.12, а результатом її роботи стали попередні осцилограми вихідних напруг, струмів та кута нахилу.

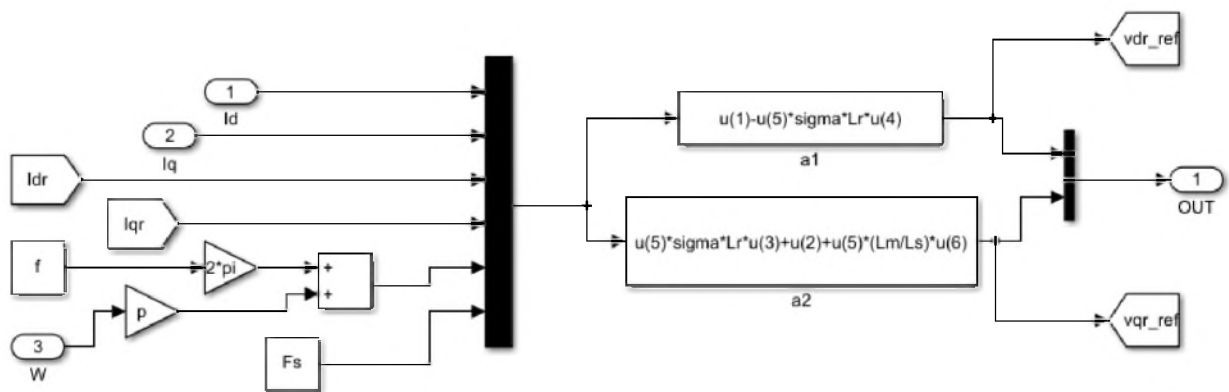


Рисунок 4.12– Підсистема контролю за параметрами вітряка

ВИСНОВКИ

Дипломна робота була присвячена розробці системи керування лопатей вітрогенератора середньої потужності, із подальшим проектуванням математичної моделі.

Тож у першому розділі було приділено увагу аналізу конструкції сучасних вітрогенераторів, їх базова комплектація, яка притаманна вітрякам будь-якої потужності. Далі була дана оцінка конструктивного виконання цих елементів саме для вітряків середньої потужності. Разом із цим було наведено перелік та структурну компоновку (із схемами) додаткових елементів вітрогенератора без яких неможливо здійснювати стабільну роботу самого пристрою у базовій комплектації, ними стали:

- контролер, який керує багатьма параметрами та процесами вітроустановки, у тому числі й поворотом лопатей;

- інвертор – пристрій, для перетворення в системі постійний струму у змінний;

- датчик напрямку вітру й анемоскоп, які відповідають за збір інформації про швидкість та напрям вітру в установках середньої та великої потужності;

- акумуляторні батареї, що накопичують електроенергію для її використання у безвітряний час доби;

- АВР – автоматичне вмикання резерву в електричну мережу, що забезпечує безперервну електрику в системі.

Як результатом аналізу виконаного у першому розділі стала побудова структурної схеми проєктованого у роботі вітряка вона містить наступні елементи: вітрогенератор; контролер; акумуляторні батареї; комутаційні апарати та запобіжники; інвертор; АВР.

Другий розділ містив вже практичні реалізації першого розділу, а саме побудовані були схему вітряка та його електрообладнання, а також у цьому розділі був проведений розрахунок параметрів вітрогенератора.

Після цього остаточно були визначені габаритні розміри вітрогенератору, що знайшло своє місце на відповідній структурній схемі. Також була отримана характеристика потужності вітрогенератора. Окрім цього було розраховано та схематично наведено принцип встановлення захисних приладів й забезпечення автономного резерву живлення у системі. Також були обрана комутуюча апаратура, яка забезпечує перемикання виводів від вітряка на АВР до споживача енергії.

У другому розділі увагою також не було оминемо питання, щодо вибору типа та електричної схеми встановлення, у загальну мережу вітряка, контролера та інвертора.

І останнім підпунктом на цьому етапі став розрахунок захисту від аварійних режимів у мережі. Так для захисту від короткого замикання системи були вживані спеціальних заходи, які обмежують значення струму короткого замикання.

Третій розділ стосувався головного питання усієї роботи – покращення роботи вітрогенератору, завдяки керування кутом нахилу лопатей, використання умов оптимальної генерації електричної енергії. Були виконані розрахунку та подані вирази, за допомогою яких можна у реальному часі мати якісні показники генерації електрики, а звідси й керувати лопатями. Розрахунку та рекомендації проведені на цьому етапі дозволили покращити математичну модель, яка була спроектована у четвертому розділі дипломної роботи.

Тут досліджувалось чотири режими роботи, та відпрацювання системи керування лопатями у них, ці режими залежали від вхідного параметру – швидкості вітру, тому ними стали:

1) Режим, коли швидкість вітру є меншою за значення – за $V < 3$ (м/с). Лопаті обертаються в так званому положенні оперення, а значення кут нахилу становить близько 90° . Вітроколесо стоїть на місці чи обертається дуже повільно, що називається «непомітним» обертанням.

2) Робоче (для вітроколеса) значення вітру – $V = 3-12$ (м/с). Вітрова турбіна обертається та виробляє при цьому енергію. При цьому кут нахилу 0° ,

лопаті колеса знаходяться у оптимальній робочій точці. Із зростанням швидкості вітру збільшується й швидкість на валу генератора, режим «робота з змінною швидкістю».

3) При сильній швидкості вітру $-V=12-25$ (м/с). дійсне значення потужності вітру є занадто високим, тому варто обмежувати швидкість колеса вітряка. При цьому кут нахилу збільшується пропорційно із швидкістю вітру, δ змінюється від 0° до приблизно 30° , а підйомна сила впливає таким чином, що вихідна потужність турбіни вітряка залишається постійною при номінальній потужності.

4) Під час штормового вітру, коли його швидкість $-V>25$ (м/с). вітер настільки сильний, що вітрогенератор доводиться вимикати, аби унеможливити пошкоджень колеса. Кут нахилу спри цьому становить майже 90° , а лопати знаходяться у положенні «на ребро».

Практичні результати та характеристики, які були отримані у ході моделювання показали, що при застосуванні запропонованої системи керування ефективність відбору колесом вітрогенератору енергії вітру зростає на 10-15% (в залежності від швидкості вітру), у порівнянні із випадком, коли цю методики не застосовувати в системі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. П.О. Василега, «Електропривод робочих машин», навч. посіб. / П.О. Василега, Д.В. Муріков . — м. Суми : Університет. кн., — 228 с., 2019 р.
2. «Вітроенергетика України: потенціал та перспективи розвитку» - електронний ресурс. [Режим доступу]. <http://electrician.com.ua/posts/1280> Дата звернення: 27.04.22
3. «Основні положення Енергетичної стратегії України до 2030 року» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-5/section-4/4-1> Дата звернення: 29.04.22
4. «Обмеження та регулювання потужності. Обмеження потужності шляхом зміни кута нахилу лопатей ротора (кроково)» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/leistungsbegrenzung/> Дата звернення: 02.05.22
5. «Дослідження гальмування ротора вітрогенератора.» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d10886-2/*/*Rotorbremse.html?search=Scheibenbremse&op=Wiki.getwiki Дата звернення: 04.05.22
6. Л. Кюль, «Енергія вітру», зб. «Інтегративний екологічний енергоменеджмент.», 2010 р. с. 611-634, https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8602-3_27
7. «Сучасний стан вітроенергетики. Порівняння вітрового колеса різного виду.» – електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://elite.tugraz.at/Jungbauer/3.htm> Дата звернення: 07.05.22
8. «Виробництво електроенергії за допомогою вітрових турбін» – електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://www.lehrerfreund.de/technik/1s/stromerzeugung-mit-windenergieanlagen1/4042>. Дата звернення: 09.05.22

9. «Управління вітровими турбінами» – електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://av.tib.eu/media/31800>. Дата звернення: 11.05.22

10. «Основи управління лопатями вітрових турбін» – електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://slideplayer.org/slide/916100/> Дата звернення: 12.05.22

ДОДАТОК А.
«ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ»

Войталюк Вадим, ст. групи ЕЛКзп – 19

Призначення документа	Документ	Умовні позначення	Зміст зауваження

Дата _____

Підпис _____

(ПІБ)

ДОДАТОК Б

«Охорона праці. Безпека експлуатації систем з вітрогенератором»

Правила експлуатації вітрової установки.

Перш за все необхідно нагадати про сам призначення вітрогенератора.

Отже це вітрогенератор це пристрій, який призначений для перетворення енергії вітру в механічну енергію обертового вітроколеса, а вже потім в електричну енергію.

Вітрогенераторна станція є комплексом устаткування для генерації, акумулювання електроенергії та послідовного її перетворення за якістю, що задовольняє для живлення більшість електроприладів та електроприймачів.

Варто згадати, що застосування вітрових генераторів (та станцій в цілому) вносить величезний внесок у захист навколишнього середовища, сприяючи суттєвому зменшенню викидів забруднюючих атмосферу речовин та парникових газів.

Як правило, вітрогенератори, застовуються в комплексі з іншими видами обладнання, утворюючи вітроелектричної установки (систему).

Принцип роботи вітроелектричної установки полягає в наступному: обертання лопатей, що закріплені на осі пристрою, призводить до обертальних рухів ротора генератора, завдяки чому виробляється електрична енергія.

Змінний струм, який одержується на виході цієї електричної системи, надходить в конвертор, де перетворюється в постійну напругу, який здатний заряджати акумуляторні батареї. Після цього струм поступає на інвертор, там він перетворюється в змінну напругу з показником 220/380В, на цьому етапі можливе ще підвищення цього значення до десятків або сотень кВ за рахунок встановлення мережевих трансформаторів, і далі відбувається передача енергії до електричної мережі, а вже потім споживачів.

Вітрогенератор може працювати тільки відповідно до номінальних(за паспортом) значень та затвердженим класом вітру.

Тож дотримання первинних інструкцій та дотримання інструкцій з технічного обслуговування й ремонту є необхідними попередніми умовами використання за призначенням.

Основні причини аварій при експлуатації вітрогенераторних установок це :

- Робота поза специфікації виробника
- Всі зміни без письмового дозволу виробника!
- Використання деталей, відмінних від оригінальних деталей.
- Робота в явно не дозволені класах SWTS.
- Робота при сильних вітрах або урагани. [18]

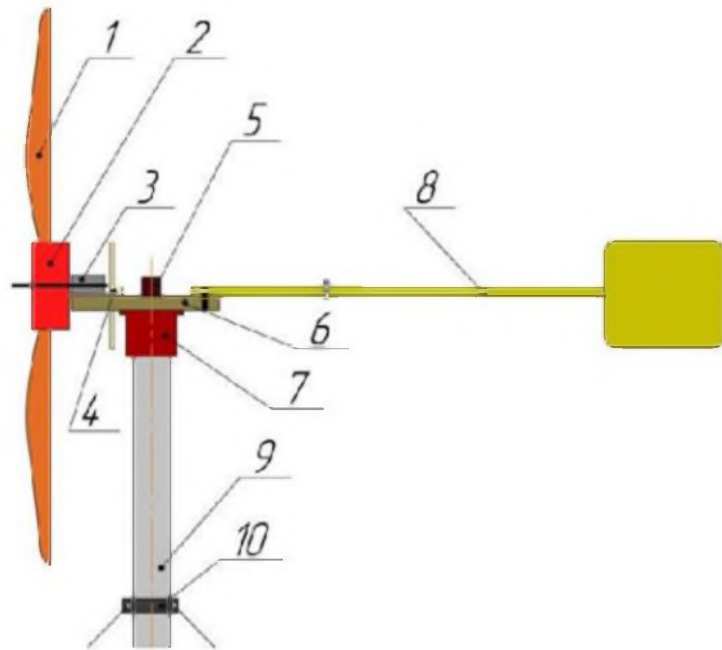


Рисунок Б.1 – Конструкція вітрогенератору середньої потужності

На рис. Б.1 цифрами показані наступні елементи:

1. лопаті вітроколеса;
2. генератор (веломотор);
3. станина для закріплення вала генератора;

4. бічна лопать для захисту вітрогенератора у випадку виникнення ураганного вітру;
5. струмоприймач, який передає струм до нерухомих проводів;
6. рама для кріплення вузлів вітряної електростанції;
7. поворотний вузол, який дозволяє повертатися вітрогенератору навколо осі;
8. хвіст для установки вітроколеса за вітром;
9. щогла вітрогенератора;
10. хомут для кріплення розтяжок підтримки.

Вимоги до місця установки.

Від місця установки вітрогенератора безпосередньо залежить продуктивність електростанції. Одним з найважливіших правил забезпечення ефективної роботи вітрогенератора є виняток завихрення повітряного потоку поблизу турбіни. Тому необхідно прагнути забезпечити ламінарний потік повітря, що обдуває вітроколесо і виключити турбулентність.

Зона турбулентності збільшується в залежності від розмірів перешкоди. Зазвичай довжина зони турбулентності повітряного простору до 20 разів більше, ніж ширина перешкоди, а висота зони до 2-х рази більше, ніж висота перешкоди.

Вітрогенератор повинен бути встановлений максимально високо та подалі від перешкод щоб досягати максимальної швидкості обертання. Грунт під щоглою не повинна бути занадто м'якою – піщаної чи болотистій, або схильною до сильних змін в залежності від кліматичних змін. Довжина струмопровідних кабелів від вітрогенератора до контролера й акумуляторних батарей повинна бути мінімальною з метою уникнення втрат.

Засоби захисту обов'язково повинні відповідати вимогам державних стандартів, а також **НАОП 1.1.10-1.07-8**. Процес експлуатації вітроенергетичної установки вимагає уважного та відповідального ставлення.

Пристрої, що входять до її складу можуть представляти при неправильній експлуатації або у важких погодних умовах джерела підвищеної небезпеки. Тому необхідно наступне:

- регулярно проводити технічне обслуговування обладнання;
- не намагатися виконувати ремонт чи обслуговування вітроенергетичної установки без відповідних знань, самостійно. Усі роботи повинен виконувати професійний обслуговуючий персонал;
- перевірити стан основних вузлів устаткування при його отриманні;
- не допускати до місця експлуатації вітроенергетичної установки осіб, що не одержали необхідні інструкції з техніки безпеки;
- перед початком експлуатації необхідно ретельно оглянути вітрогенератор переконавшись 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 працюючої турбіни.

Запуск вітрогенератора повинен проводитися без підключеного навантаження. Потужність передбачуваного навантаження не повинна перевищувати потужність підключеного до системи інвертора.

Вітрогенератор представляє особливу небезпеку при аномально сильних вітрах. Не дивлячись на те, що таке явище відбувається вкрай рідко, необхідно перед монтажем виділити зону відчуження для ВЕС. Зона відчуження – простір навколо станції, до якого не слід допускати людей, або тварин під час роботи турбіни (особливо при сильних вітрах).

Необхідно також звернути увагу на головне - електричній та механічній безпеці під час роботи з вітрогенератором.

Вітрогенератор обладнаний складними електронними пристроями, при розробці котрих забезпечувався захист від електричних джерел небезпеки, пов'язаних з надмірними струмами. При підключенні цих і будь-яких інших

електротехнічних пристроїв необхідно пам'ятати, що існують ризики для людей, які обумовлені протіканням електричного струму.

Виділення теплової енергії в електротехнічних системах часто є результатом протіканням надмірного струму у проводах з недостатню площею перетину чи 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, які підключаються до акумулятора, плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі відповідного номіналу.

Відповідно до **ГОСТ 12.3.032-84** «Роботи електромонтажні. Загальні вимоги безпеки» забороняється експлуатація компонентів вітроенергетичної установки у вибухонебезпечному середовищі, так як в її електричних частинах можливе іскріння. Забороняється відключати акумуляторні батареї від додаткового обладнання при підключеному до нього генератору, тому що це призведе до виходу з ладу обладнання.

Обертові лопаті є найбільш серйозний механічний джерела небезпеки. Лопаті ротора вітрогенератора виготовлені з дуже міцного матеріалу. Швидкість руху лопатей по зовнішньому діаметру обертання може перевищувати 250 км/год. 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 вітрове колесо при роботі вітротурбіни, це дуже небезпечно. Необхідно проводити всі роботи по обслуговуванню вітрогенератора тільки при повній зупинці вітроколеса і в погоду без сильного та середнього за швидкістю вітру.

Потрібно строго дотримуватися в процесі установки і експлуатації таких вимог техніки безпеки, як у **ДСТУ 2267-93**, а саме:

- всі роботи по установці слід виконувати на рівні землі;

- під час всього процесу установки акумулятори повинні бути відокремлені від мережі;

- регулярно, принаймні 1 раз на рік, перевіряти опорні конструкції, лопаті і електричні системи;

Також необхідно пам'ятати, що лопаті ротора дуже міцні, однак, якщо вони увійдуть в контакт з твердим предметом, вони можуть зламатися. Для того, щоб забезпечити безпечну роботу, при виборі місця для турбіни необхідно уникати можливий контакт з будь-яким фізичним об'єктом.

Також потрібно пам'ятати, що для нових турбін потрібно короткочасний період обкатки, тобто роботи в режимі холостого ходу, при низьких швидкостях вітру. І лише після цього вони досягнуть пікової ефективності, під час обкатки може здаватися, що турбіна працює повільно.

ДОДАТОК В

«Вхідні дані для роботи математичної моделі вітряка»

Далі представлений лістинг програми із коментарями вхідних дані для роботи математичної моделі вітряка, які були зроблені у M-file.

```
close all
clear all
clc
f=50; % Частота обмотки статора (Гц)
Ps=2e6; % Значення потужності статора (Вт)
n=1500; % Кількість оборотів (об/хв)
Vs=690; % Напруга статора (В)
Is=1760; % Струм статора (А)
Tem=12732; % Крутний момент (Н*м)
p=2; % кількість пар полюсов
u=1/3; % коефіцієнт оборотів
Vr=2070; % Напруга ротора (В)
smax=1/3; % Максимальне ковзання
Vr_stator=(Vr*smax)*u; % приведення обмотки ротора до статора (В)
Rs=2.6e-3; % Значення активного опору статора (Ом)
Lsi=0.087e-3; % Індуктивність витоку (Гн)
Lm=2.5e-3; % Індуктивність намагнічування (Гн)
Rr=2.9e-3; % Значення активного опору ротора (Ом)
Ls=Lsi+Lm; % Індуктивність обмотки статора (Гн)
Lr=Lsi+Lm; % Індуктивність ротора (Гн)
Vbus=Vr_stator*sqrt(2); % Напруга шини постійного струму приведенного до
статора (В)
sigma=1-Lm^2/(Ls*Lr);
```

```

Fs=Vs*sqrt(2/3)/(2*pi*f); % Значення потік статора
J=127; %Інерційність
D=1e-3;
fsw=4e3;
% Розрахунок параметрів, який не визначаються напряму.
Ts=1/fsw/50;
tau_i=(sigma*Lr)/Rr;
tau_n=0.05;
wni=100*(1/tau_i);
wnn=1/tau_n;
kp_id=(2*wni*sigma*Lr)-Rr;
kp_iq=kp_id;
ki_id=(wni^2)*Lr*sigma;
ki_iq=ki_id;
kp_n=(2*wnn*J)/p;
ki_n=((wnn^2)*J)/p;

```