

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О. КОЛЛАРОВ
(ініціали, прізвище) «__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
МАГІСТРА

на тему Дослідження режиму роботи вітрогенератора у змінюваних умовах
Study of the mode of operation of the wind generator in changing conditions

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКзм-226
(шифр групи)
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
підготовки (шифр і назва спеціальності підготовки)
електромеханіка»

Олена ЛЮБИМЕНКО
(ім'я та прізвище) _____ (підпис)

Керівник зав. каф., к. т. н., доц., О. КОЛЛАРОВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище) _____ (підпис)

Рецензент зав. каф., к. т. н., доц., В. ПОЦЕПАСВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище) _____ (підпис)

Нормоконтроль:

(підпис)

(дата)

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

Студент _____
(підпис)

(дата)

ЛУЦЬК – 2024.

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії
Освітній ступінь: магістр
Спеціальність: (141) Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« _____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНЦІ**

Любименко Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: _____

Дослідження режиму роботи вітрогенератора у змінюваних умовах

керівник роботи _____ Колларов О. Ю., канд. техн. наук, доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 16 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: _____

Живлення для побутових споживачів забезпечити від вітрогенератору.

Матеріали переддипломної практики та рекомендована література.

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

1. Теоретичний огляд умов роботи вітрогенератора.

2. Аналіз технічних питань умов роботи вітроустановок.

3. Дослідження режиму роботи вітрогенератора у змінюваних умовах.

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

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Пункти 4.1 – 4.3	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ, ст. викл. каф.		

7. Дата видачі завдання 19 лютого 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Пункт 4.1	29.02 - 13.03.2024	
2.	Пункт 4.2	14.03 - 15.04.2024	
3.	Пункт 4.3	16.04 - 15.05.2024	

Студент

(підпис)

Любименко О. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Колларов О. Ю.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Любименко Олена Миколаївна. Дослідження режиму роботи вітрогенератора у змінюваних умовах. / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю (141) «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2024.

Об'єкт дослідження – вітрогенератор подвійного живлення.

Предмет дослідження – вплив швидкості вітру на основні параметри вітрогенератора.

Методи дослідження – обґрунтування, математичного моделювання.

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає три розділи, висновків, переліку використаних джерел.

В I розділі роботи проводиться огляд сучасних вітрогенераторів та проблем, які виникають у процесі їх використання.

В II розділі роботи дається технічна характеристики вітрогенератора та проводиться детальний аналіз різних режимів роботи вітрогенератора.

В III розділі роботи розробляється математична модель для аналізу роботи вітрогенератора у різних умовах. Виконується аналіз процесу запуску вітрогенератора та його роботи при фіксованій і змінній швидкості вітру.

**ВІТРОГЕНЕРАТОР, ШВИДКІСТЬ ВІТРУ, ПОТУЖНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ
ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ**

Список публікацій здобувача

1. О. М. Любименко, О. А. Штепа, "Імітаційне комп'ютерне моделювання процесу отримання електроенергії, «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології: зб. доповідей Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, «ДонНТУ», Луцьк, 2022, с. 35-37

SUMMARY

Lyubimenko Olena Mykolayivna. Study of the mode of operation of the wind generator in changing conditions. / Graduation qualification work for obtaining a master's degree in the specialty (141) "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". - DVNZ DonNTU, Lutsk, 2024.

The object of research is a dual-power wind generator.

The subject of the study is the influence of wind speed on the main parameters of the wind generator.

Research methods - substantiation, mathematical modeling.

The graduation thesis consists of an introduction, the main part, which includes three sections, conclusions, and a list of used sources.

In the 1st section of the work, an overview of modern wind generators and the problems that arise in the process of their use is carried out.

In the II section of the work, the technical characteristics of the wind generator are given and a detailed analysis of various modes of operation of the wind generator is carried out.

In the III section of the work, a mathematical model is developed for the analysis of the operation of the wind generator in different conditions. An analysis of the wind generator start-up process and its operation at fixed and variable wind speed is performed.

WIND GENERATOR, WIND SPEED, POWER, WIND ENERGY
UTILIZATION COEFFICIENT

List of publications of the acquirer

1. O. M. Lyubimenko, O.A. Shtepa, "Simulation computer modeling of the process of obtaining electricity, "TAK": telecommunications, automation, computer-integrated technologies: coll. reports of the All-Ukrainian science and practice conf. young scientists, resp. ed. G. V. Stupak, State Technical University "DonNTU", Lutsk, 2022, p. 35-37

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД УМОВ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРА	11
1.1 Аналіз сучасних вітрогенераторів та проблеми пов'язані з їх використанням.....	11
1.2 Конструктивна характеристика вітрогенератора.....	21
1.3 Висновки до розділу	26
2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ПИТАНЬ УМОВ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ	28
2.1 Характеристика вітрогенератора.....	28
2.2 Характеристика режимів роботи вітрогенератора.....	31
2.3 Висновки до розділу	38
3 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРА У ЗМІНЮВАНИХ УМОВАХ.....	39
3.1 Огляд напрямів вдосконалення режиму роботи вітрогенератора.....	39
3.2 Структурна схема та математична модель вітрогенератору	42
3.3 Аналіз зміни впливу швидкості вітру на параметри моделювання	46
3.4 Дослідження режиму запуску вітрогенератора та фіксованої швидкості.....	60
3.5 Моделювання за допомогою MATLAB SIMULINK роботи енергосистеми з отриманою енергією	67
3.6 Висновки до розділу	74
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78
ДОДАТОК А. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО РОБОТИ	85

ВСТУП

Електрична енергетика в цьому столітті стала основною необхідністю, а не просто даром науки для людства. За останні кілька десятиліть вітроенергетика виросла в окремий енергетичний сектор у низці країн, успішно конкуруючи із традиційними джерелами енергії. Більшість вітроенергетичних установок (ВЕУ), в основному, складають великі та середні одиниці потужності, інтегровані в магістральні, розподільні та локальні мережі, включаючи мікро-гриди системи. Зазвичай вітрогенератори об'єднані у вітропарки, що включають від 10 до 100 одиниць. Сучасні мережеві вітрогенератори переважно використовують електричні генератори подвійного живлення, які здатні виробляти електроенергію при різних швидкостях вітру та частотах обертання ротора вітрогенератора, передаючи енергію безпосередньо в мережу через обмотки статора.

Динамічна взаємодія між генераторами подвійного живлення та мережею є об'єктом управління під час перехідних процесів, щоб відповідати вимогам як розробників вітрогенераторів, так і мережевих компаній, включаючи захист електрообладнання ВЕУ від перехідних процесів та автоматичне відновлення нормального регулювання потужності після відновлення мережі.

Наприклад, при глибокому падінні напруги в мережі та зменшенні потенціалу на обмотках статора, а також обертанні ротора (вітроколеса), на обмотках ротора генератора ВЕУ може виникнути надвисока напруга, що може призвести до виходу з ладу електронних пристроїв, що управляють. Це може спричинити каскадне відключення або вихід з ладу однієї або кількох ВЕУ, що входять до складу вітропарку. Стійка робота окремої ВЕУ з максимальною ефективністю, включаючи роботу в критичних мережевих умовах та відновлення після них, є актуальною галуззю досліджень.

Енергія вітру розглядається як екологічно чисте та необмежене джерело енергії, доступне на тривалий період. Протягом 2016—2023 років ми неодноразово спостерігали за розповсюдженням виключно альтернативних відновлюваних джерел енергії у деяких країнах з розвитком вітроенергетики зростає як потужність окремих вітрогенераторів, так і набирає обертів новий досвід експлуатації вітростанцій, що створює додаткові фактори, впливаючи на загальну ефективність. Ці фактори включають у себе збільшення потужності окремих вітрогенераторів, додаткові витрати на ремонт та запасні частини для вітростанцій, а також пов'язану з цим логістику. Враховуючи ці фактори, необхідно уважно планувати та проектувати роботу вітростанцій для кожного конкретного регіону.

Однією з ключових характеристик, що визначає ефективність роботи вітроелектричної установки є коефіцієнт використання енергії вітру або середній коефіцієнт потужності (C_p). Цей показник є відношенням реальної механічної потужності, що генерується вітрогенератором, до повної аеродинамічної потужності, що надходить від вітрового потоку через захоплену площу.

Тому проблема дослідження режимів роботи відновлюваних джерел енергії з використанням сучасних інтелектуальних енергосистем є актуальною, як і розробка нових напрямів регулювання режимів роботи вітрогенератора з метою зменшення механічних навантажень, а також для забезпечення їх надійної роботи.

Мета даного дослідження полягає у розробці рекомендацій щодо забезпечення максимального коефіцієнта використання енергії вітру (коефіцієнта потужності) у всіх режимах роботи вертикально-осьової вітрогенератора. Для підтвердження результатів роботи використовувалося середовище Matlab/Simulink на основі математичного моделювання.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

Розробка функціональної математичної моделі вертикально-осьової вітроенергетичної установки.

Побудова моделі вертикально-осьової вітроенергетичної установки з використанням програмного пакету Matlab/Simulink та перевірка різних режимів роботи.

Використовуючи математичне моделювання, робота вітроенергетичної установки була промодельована з метою підтримки максимальних коефіцієнтів потужності для різних швидкостей вітру. Отримані результати також включають характеристики активної та реактивної потужності.

Об'єкт дослідження – вітрогенератор подвійного живлення.

Предмет дослідження – вплив швидкості вітру на основні параметри вітрогенератора та коефіцієнта використання енергії σ у всіх режимах роботи вітроустановки

Методи дослідження – обґрунтування, обчислення, методи математичного моделювання, програмний комплекс Matlab/Simulink.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та літератури, додатків [1].

В I розділі роботи «Теоретичний огляд умов роботи вітрогенератора» проводиться огляд сучасних вітрогенераторів, їх технічних характеристик та проблем, які виникають у процесі їх використання. Розглядається конструктивна будова вітрогенератора, включаючи його основні компоненти, принципи роботи та особливості конструкції.

В II розділі роботи «Аналіз технічних питань умов роботи вітроустановок» дається технічна характеристики вітрогенератора, включаючи його потужність, розміри, конструкцію, способи регулювання та інші важливі параметри. Проводиться детальний аналіз різних режимів роботи вітрогенератора, зокрема змінювані умови експлуатації та вимоги енергосистеми. Обговорюються особливості кожного режиму та їхні впливи на ефективність та надійність роботи вітрогенераторів.

В III розділі роботи «Дослідження режиму роботи вітрогенератора у змінюваних умовах» проводиться аналіз сучасних тенденцій та напрямків розвитку технологій, спрямованих на покращення ефективності та надійності

роботи вітрогенераторів. Розглядається структура та принципи функціонування вітрогенератора, а також розробляється математична модель, яка дозволяє аналізувати його роботу у різних умовах. Досліджується вплив зміни швидкості вітру на ключові параметри вітрогенератора за допомогою розробленої математичної моделі. Виконується аналіз процесу запуску вітрогенератора та його роботи при фіксованій швидкості вітру, що дозволяє визначити оптимальні параметри для початку генерації електроенергії та описується моделювання роботи енергосистеми з використанням отриманої від вітрогенератора енергії за допомогою програмного забезпечення Matlab/Simulink.

Загальний обсяг 88 сторінок, з яких 80 сторінок - основний текст.

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД УМОВ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРА

1.1 Аналіз сучасних вітрогенераторів та проблеми пов'язані з їх використанням

Енергія вітру є найбільш вибраною завдяки прогресу в перетворювачах силової електроніки, що робить її такою ж економічною, як і звичайні джерела [2]. На території України переважає континентальний клімат із низькими швидкостями вітрів у приземному шарі. На узбережжі моря швидкість вітру помітно вища. На рис.1.1 показано розподіл швидкості вітру у різних регіонах України від 4,0 м/с до 10 м/с [3].



Рисунок 1.1 – Розподіл швидкості вітру у різних регіонах України

Основу роботи вітроенергетичної установки (ВЕУ) становить система перетворення енергії вітру, яка перетворює кінетичну енергію потоку повітря на механічну енергію обертання ротора. Процес генерації енергії залежить від взаємодії лопаті з потоком повітря. Система перетворення енергії вітру, у

свою чергу, складається з двох ключових компонентів: механічної (аеродинамічної) частини, що включає в себе ротор з лопатями і пов'язану з ним механічну передачу, таку як коробка передач (мультиплікатор), а також електричної (електродинамічної) частини, що включає в себе електричний генератор із системою перетворення електричної енергії. Робочі параметри вітроустановки, такі як вихідна потужність, швидкість обертання і момент, що крутить, визначаються впливом аеродинамічних сил і моментів, що виникають при взаємодії лопатей з потоком вітру.

На ранніх стадіях з'явилися системи перетворення енергії вітру з фіксованою швидкістю (WECS) завдяки їх простому управлінню за допомогою індукційного генератора з короткозамкненою кліткою (SCIG). Непостійний характер вітру створює умови для різної швидкості вітру. Однак SCIG працює з фіксованою швидкістю, що робить його менш бажаним [4-5]. Зараз широко використовуються WECS зі змінною швидкістю, де швидкість ротора генератора контролюється перетворювачами силової електроніки, які допомагають збирати максимальну енергію вітру. Двома найпопулярнішими машинами, які використовуються в WECS із змінною швидкістю, є індукційний генератор із подвійним живленням (DFIG) і синхронний генератор (SG). Перший широко використовується, незважаючи на неминучу коробку передач, оскільки потужність перетворювача може бути зменшена максимум на 30% від потужності вітрової турбіни (WT) [6].

БЕУ змінною швидкістю на основі DFIG та WECS мають два перетворювачі джерела напруги (VSC), з'єднані один до одного, а саме перетворювач сторони ротора (RSC) і мережу (GSC) із загальним ланцюгом постійного струму. RSC зазвичай відстежує швидкість ротора таким чином, щоб мати максимальну потужність, що генерується з наявної швидкості вітру, а також може забезпечити реактивну потужність, необхідну генератору [7]. Для досягнення максимальної потужності, що відповідає швидкості вітру, доступні різні методи, наприклад, співвідношення швидкості (TSR), P&O, ШНМ та управління на основі нечіткої логіки [8]. Однак техніка TSR

для отримання максимальної потужності при доступній швидкості вітру потребує менше обчислювального навантаження та меншої складності для реалізації, що призводить до швидшої роботи та зменшення втрат при перемиканні [6]. Крім того, GSC можна використовувати для плавного переходу від режиму підключення до мережі (GCM) до автономного режиму (SAM) або навпаки. У SAM інженерна мережа від'єднується від точки загального з'єднання (PCC). Отже, керування GSC може підтримувати напругу PCC у SAM. Однак напруга PCC безпосередньо підтримується комунальною мережею в GCM. У результаті в GCM керування GSC може регулювати загальну напругу ланцюга постійного струму [7].

Відповідно до мережевих кодексів, під час аварій в мережі WECS має залишатися підключеною до мережі, якщо несправності не тривають протягом більш тривалого періоду [7]. Таким чином, WECS на основі DFIG має мати можливість проходження низької напруги і підтримувати відновлення мережі. Це робиться шляхом забезпечення підтримки реактивної потужності під час аварій, що може зменшити генерацію активної потужності для підтримки струмів перетворювача при їх номінальних значеннях [7].

Завдяки таким перевагам, як простий дизайн із включенням системних обмежень і лінійності, швидшої та покращеної динамічної реакції [7], модельне керування стає основою новою технікою керування, яка широко використовується в різних програмах керування перетворювачами електроенергії. В роботі [7] представлено прогнозне керування моделі постійної частоти перемикання (CSF) для системи перетворення енергії вітру на базі індукційного генератора з подвійним живленням в автономних і підключених до мережі операціях. Ефективність запропонованого підходу керування для WECS на основі DFIG як у SAM, так і в GCM перевіряється за допомогою моделювання на основі MATLAB та експериментальних результатів за різних динамічних умов, таких як змінна швидкість вітру, що змінюється від 12 м/с до 8 м/с, різні вимоги до мережі: від 3 кВт до 1,5 кВт і зміною навантаження від 4 кВт до 6,5 кВт. Крім того, надійність

запропонованого керування підтверджується параметричною чутливістю, часовою затримкою та дисбалансом мережі, а також його можливістю проходження низької напруги під час несправності [7].

В роботі [9] наведено порівняння основних параметрів вітрогенераторів. За певним алгоритмом [10] було розраховано кількість синхронних генераторів потужністю від 600 до 3600 кВт з прив'язкою до потужності. Якір статора грає роль корпусу. Статор з обмоткою грає роль модуля головки вітрогенератора, що дозволяє зменшити його вагу і габарити. В даний час найбільшого поширення набули асинхронні генератори з редукторами для збільшення швидкості, оскільки швидкість обертання вітроколеса зменшується зі збільшенням потужності і становить лише кілька обертів за хвилину. Зі збільшенням частоти обертання електромагнітний момент, об'єм і маса генератора зменшуються, але збільшуються відповідні параметри мультиплікатора. В останні роки спостерігається тенденція до використання без редукторних синхронних генераторів із збудженням від постійних магнітів, що спрощує конструкцію агрегату, підвищує надійність установки, усуває необхідність обслуговування редуктора (мультиплікатора) і втрати на збудження. У зв'язку з цим у роботі порівнюються ці варіанти реалізації модульної частини ВЕУ за електромагнітними параметрами, масою та габаритами. Зміна геометричних співвідношень генератора визначає його електромагнітні параметри, при цьому визначаються оптимальні співвідношення діаметрів статора і ротора, ширини щілини і зубця, залежність геометрії зони зубця від її потужності; обґрунтовано можливість використання обмотки за рахунок малого розрахункового значення числа витків у перетині. Така обмотка дозволяє спростити технологію її виготовлення, дає можливість збільшити коефіцієнт заповнення щілини і потужність.

У сучасному світі існує кілька способів знайти і підтримувати максимальне значення потужності в електричних системах з альтернативними джерелами енергії [9]. Серед них може бути використана

стабільна і ефективна система вітряних турбін з DFIG або синхронним PMG генератором. Проте система вітряних турбін з DFIG з фіксованою швидкістю з нижчою вартістю перетворювача і меншими втратами потужності, тому на неї звернули уваго багато дослідників [9].

Слід відзначити, що якість електричної напруги в мережах з вітрових електростанцій (ВЕС) значною мірою залежить від конструкції вітрогенераторів [10-12]. На початковому етапі розвитку ВЕС, коли їх частка у загальному обсязі виробленої електроенергії була невеликою, вимоги до генераторів ВЕС стосовно стійкості систем електропостачання не були такими високими. Малопотужні вітрогенератори використовували асинхронні генератори, для яких не ставилися окремі вимоги до якості генерованої електроенергії. Проблема спотворення форми напруги в електричних мережах також не вважалася актуальною на той час. На початковому етапі розвитку ВЕС головними проблемами були зміни напруги в мережі при ввімкненні та вимкненні вітрогенераторів, а також їхнє споживання реактивної потужності з мережі [13-15].

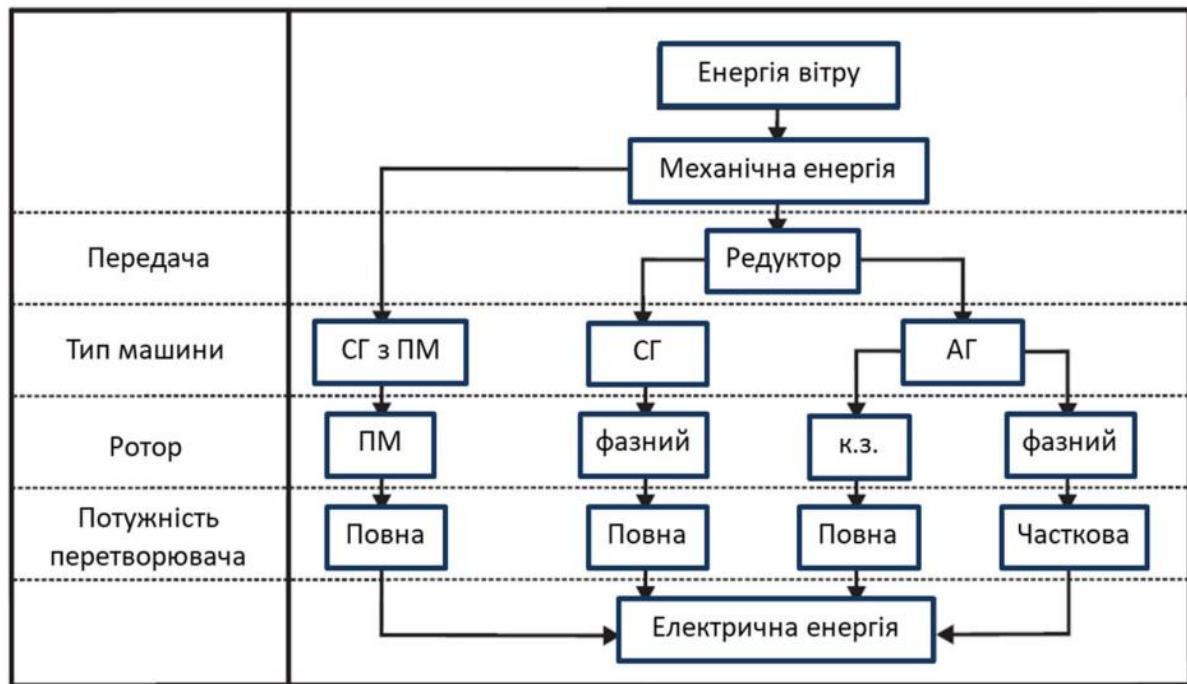
З урахуванням досягнень у силовій електроніці та керуванні, сучасні ВЕС використовують такі застосування, як компенсація реактивної потужності, статичні перемикачі, накопичення енергії, генерування електроенергії при змінній швидкості вітру, керування напругою та підтримка динамічної реактивної потужності [15-20]. На початковому етапі, коли ВЕС були невеликими і мали мінімальний вплив на мережу, правила, що регулюють генерування електроенергії з використанням вітру, були пом'якшені для сприяння розвитку.

Сучасні технології керування дозволяють експлуатувати ВЕС при меншій максимальній потужності протягом тривалішого періоду, забезпечуючи виконання додаткових завдань для мережі [20-25].

Для здійснення електромеханічного перетворення на вітрових електростанціях існує багато технологічних альтернатив. Різні конфігурації досягаються шляхом поєднання асинхронних або синхронних машин з

перетворювачами повної або часткової потужності. Це представлено у табл. 1.1, де етапи перетворення механічної енергії в електричну показані різними рядками, а для кожного етапу наведені технологічні альтернативи [21-27].

Таблиця 1.1 – Конфігурації вітрогенераторів



Запропоноване використання систем генерування електроенергії має ряд практичних застосувань, оскільки кількість нелінійних навантажень, що підключені до мережі, постійно зростає. Це призводить до збільшення гармонічних складових струмів, що протікають в мережі. У зв'язку з тим, що в мережі допускається лише обмежена кількість спотворень, пристрої, такі як пасивні та активні фільтри, встановлюються для компенсації струмів гармонік, що виникають внаслідок нелінійних навантажень.

Для реалізації процесу енергетичного перетворення можна використовувати різні підходи [27-34]. Існує чотири комбінації машин та перетворювачів, які охоплюють більшість сучасних установок. Ці комбінації відомі як:

1. З фіксованою швидкістю,
 2. З динамічним керуванням частотою ковзання,
 3. Машина подвійного живлення з перетворювачем у ланці ротора з двох напрямленим потоком енергії,
 4. З без редукторним приводом.
1. Конфігурація машин/перетворювачів із фіксованою швидкістю

Використання систем генерування електроенергії (СГЕ) з фіксованою швидкістю є найстарішою та найпростішою конфігурацією. На рис. 1.2 зображено, що ротор асинхронного генератора (АГ) є короткозамкненим, а статор підключений до мережі. Вал асинхронного генератора з'єднаний з турбіною за допомогою редуктора. На клеммах статора встановлено реактивний компенсатор для забезпечення реактивної потужності генератора [31, 33].

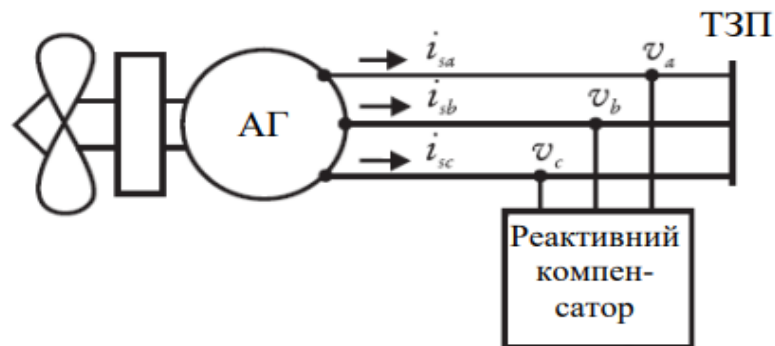


Рисунок 1.2 – Конфігурація перетворювачів із фіксованою швидкістю

Це рішення просте, оскільки не потребує встановлення силових перетворювачів. Проте робота з фіксованою швидкістю не гарантує оптимального генерування потужності, а реактивний компенсатор необхідний для забезпечення струму намагнічування. Є два основних недоліки цієї конфігурації:

Термін повернення вкладених інвестицій у цю конфігурацію триваліший, ніж у випадку конфігурацій зі змінною швидкістю, оскільки річний видобуток енергії є меншим;

Система не може компенсувати турбулентність швидкості вітру, яка безпосередньо передається в мережу.

Головною метою дослідження є теоретичний аналіз та математичне моделювання впливу швидкості вітру на основні параметри роботи вітроустановки.

2. Конфігурація машин/перетворювачів з динамічним керуванням частоти ковзання

Конструкція, відома під назвою Dynamic Slip, була впроваджена датською компанією Vestas у 1999 році (технологія Vestas OptiSlip [35-37]). Основною відмінністю між цією конструкцією і першим типом є змінний опір, що додається послідовно до обмоток ротора, як показано на рис. 1.3.

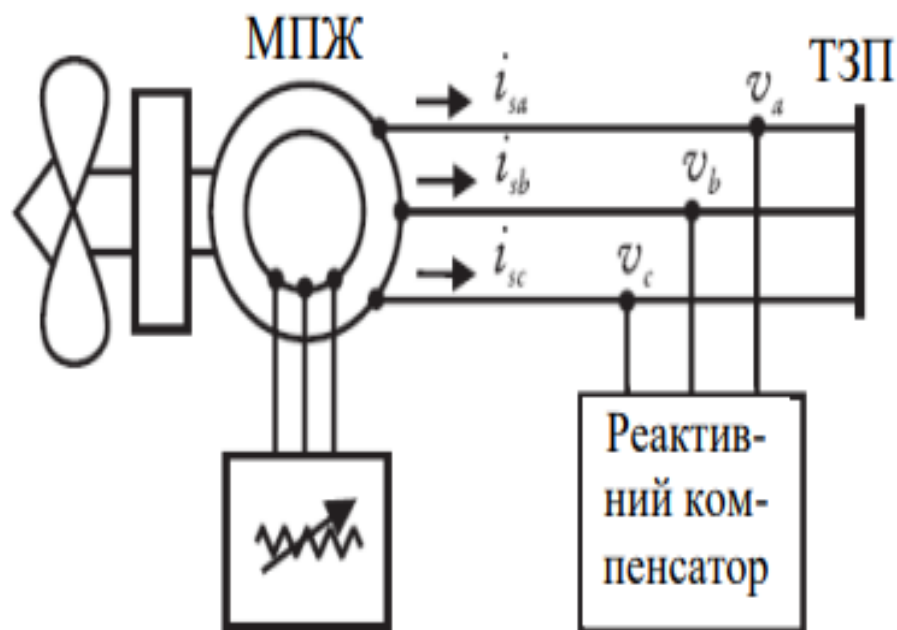


Рисунок 1.3 – Конфігурація перетворювачів з динамічним керуванням частотою ковзання

Управління змінним опором здійснюється за допомогою напівпровідникового перетворювача, що дозволяє працювати зі змінною швидкістю із максимальним ковзанням, яке становить 0,03-0,05. Другий тип конструкції потребує більш великих витрат через складнішу будову, проте

робота зі змінною швидкістю дозволяє отримати більшу ефективність потужності та плавне керування енергією, що подається в мережу. Ця конфігурація відома як важлива стадія на шляху до реалізації режиму змінної швидкості, проте наразі її замінили технологією МПЖ (конфігурація третього типу).

3. Конфігурація машин/перетворювачів: МПЖ з перетворювачем у ланці ротора з двох напрямленим потоком енергії

Концептуальну схему системи генерування на базі МПЖ показано на рис. 1.4 [35-37].

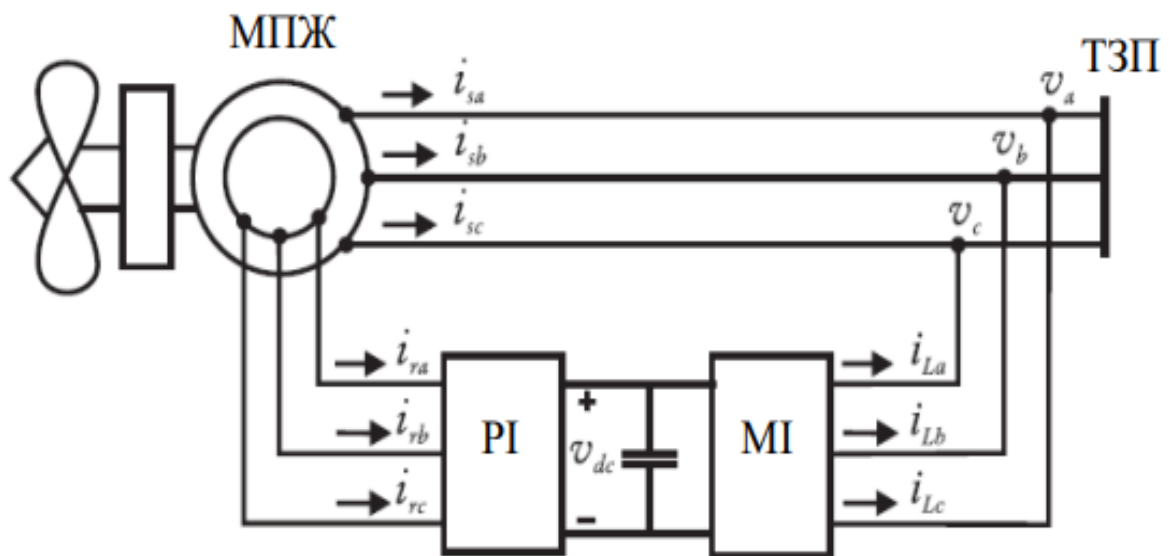


Рисунок 1.4 – Конфігурація перетворювачів: МПЖ із перетворювачем у ланці ротора з двох напрямленим потоком енергії

Статор прямо підключений до мережі. Ротор живиться за допомогою перетворювача із двох напрямленим потоком енергії, що складається з роторного інвертора (PI) та мережевого інвертора (MI), які з'єднані за допомогою ланки постійного струму. Ця конфігурація дозволяє формувати напругу ротора з регульованою амплітудою і частотою.

Незважаючи на її складність, ця конфігурація є найбільш поширеною для систем генерування електроенергії, зокрема у вітроенергетиці, через кілька переваг [37-42]:

1. Лише 25-30% від загальної потужності проходить через перетворювачі у колі ротора, які можуть бути спроектовані на невелику потужність. Це призводить до зменшення розміру і ваги, а також зниження вартості, а також до менших втрат потужності порівняно з системами, де силові перетворювачі підключені до статора.

2. Можливе керування обміном активної та реактивної потужності з мережею. Регулювання активної та реактивної потужності відбувається дуже швидко (до секунди) і точно завдяки керуванню силовими перетворювачами.

3. Робота за змінною швидкістю призводить до більшого збору енергії за однакових вітрових умов, а також зменшує динамічні навантаження на башту і редуктор.

4. Конфігурація машин/перетворювачів з без редукторним приводом

Конфігурація з без редукторним приводом є відносно новою, у ній використовується синхронний генератор із постійними магнітами (СГПМ) з великою кількістю полюсів. Редуктор не потрібен, оскільки СГПМ здатен виробляти електроенергію з відносно низькою швидкістю. Щоб від'єднати турбіну з різною швидкістю обертання від постійної частоти мережі, обмотки статора з'єднано з мережею через перетворювачі, розраховані на повну потужність [37-42].

Конфігурація четвертого типу призначена для використання перетворювача на повну потужність та має підвищену вартість відносно третього типу. Висока вартість постійних магнітів обмежує застосування цієї конфігурації у вітрогенераторах з низькою номінальною потужністю. Однак відсутність редуктора істотно підвищує надійність установки та знижує витрати на обслуговування. З цієї причини багато досліджень проводять щодо збільшення застосувань без редукторних вітрогенераторів [37].

1.2 Конструктивна характеристика вітрогенератора

Вітрогенератор - це пристрій, який перетворює потік повітря у електричну або механічну енергію для подальшого використання користувачами [32-40].

На сьогоднішній день існують два основних типи вітрогенераторів, які відрізняються за конструкцією та розташуванням осі обертання елементу, що збирає енергію вітру. Вони поділяються на 2 види, коли вісь обертання :

- горизонтальна (рис.1.5 а);
- вертикальна рис.1.5. б).

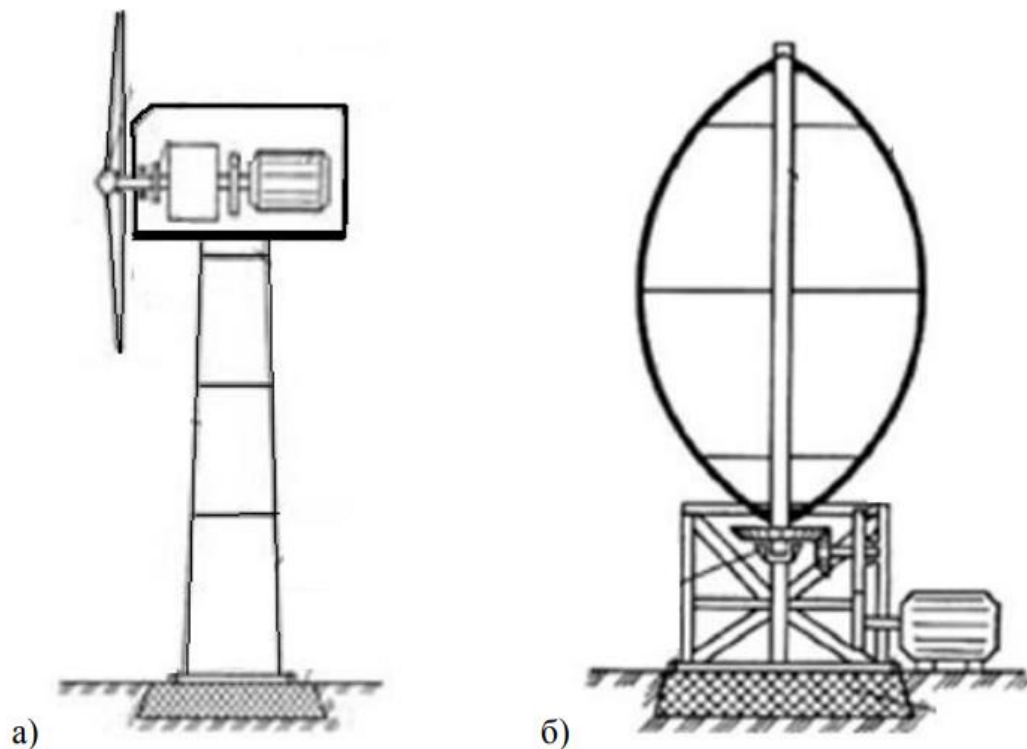


Рисунок 1.5 – Вітроустановки з горизонтальною віссю обертання (а) і з вертикальною віссю (б)

Принцип роботи вітрогенератора досить простий. Потік повітря накладає тиск на лопаті (позиція 12 на рис.1.6) вітряного колеса. Ротор (позиція 1 на рис.1.6) вітряного колеса закріплений на низько швидкісний вал (позиція 2 на рис.1.6). Під впливом вітру вітряне колесо (ротор з лопатями та

вал) починає обертатися, що призводить до перетворення вітряної енергії на механічну. Через вал та редуктор (позиція 3 на рис.1.6) механічний рух передається на вал (позиція 8 на рис.1.6) електричного генератора (позиція 4 на рис.1.6). Під час обертання ротора електрогенератора проходить процес перетворення механічної енергії в електричну.

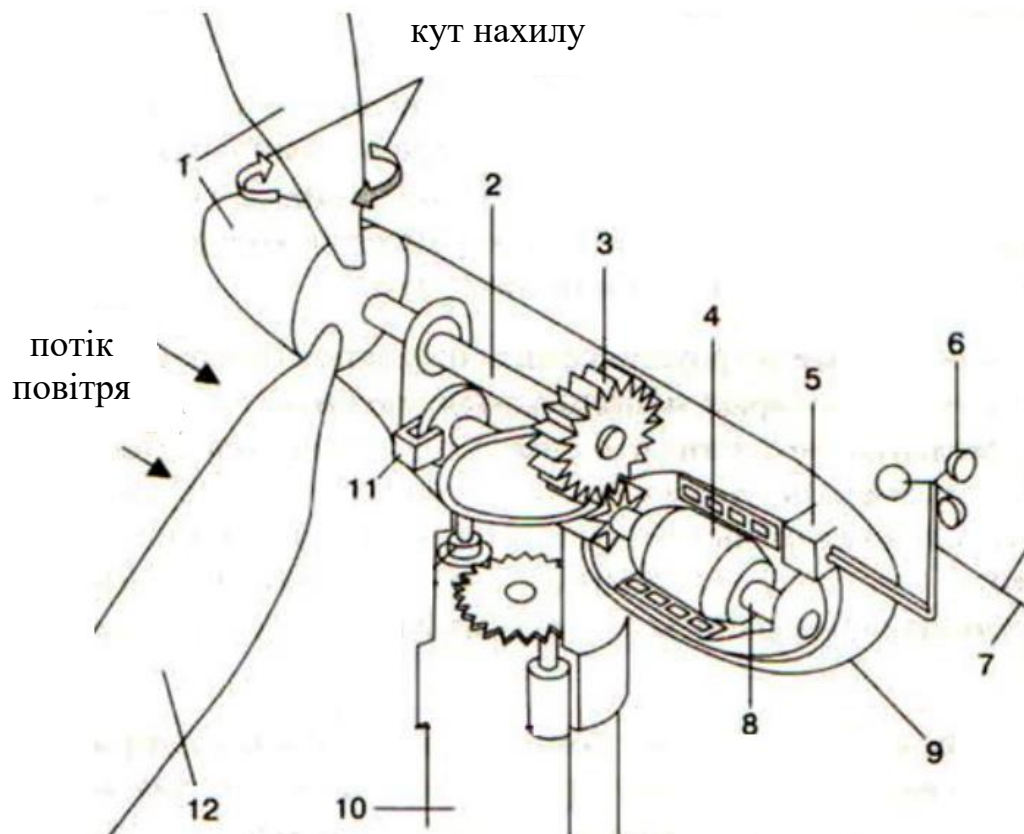


Рисунок 1.6 – Конструктивна схема для вітроустановки

На рис.1.6 зображена конструктивна схема електроустановки, що повністю відображає її устрій. У схемі використовуються наступні позиційні позначення:

- Ротор вітроколеса, що бере участь у процесі перетворення тиску вітру на механічну енергію.
- Низько швидкісний, який приводиться в рух ротором вітроколеса і використовується для передачі механічної енергії.
- Редуктор, що підвищує частоту обертання вітроколеса (ротора).

- Генератор, що виробляє електроенергію і має у своєму складі високошвидкісний вал.
- Контролер, який відповідає за керування всією установкою. З його допомогою в автоматичному режимі запускаються вітряні турбіни або здійснюється їх зупинка.
- Анемометр, призначений для визначення швидкості вітру з подальшим передаванням даних контролеру.
- Флюгер, який визначає напрямки вітру та повертає вітроколесо у потрібному напрямку.
- Високошвидкісний вал, що обертає ротор електрогенератора.
- Гондола, що розташовується у верхній частині вітряної турбіни і є несучою частиною конструкції. Усередині неї знаходяться вали, редуктор, генератор, контролер та гальмо.
- Мачта, що представляє собою порожнисту конструкцію з металу або бетону, що служить для розміщення всіх основних елементів на висоті.
- Гальмо, що запобігає поломкам установки і використовується для зупинки ротора у критичних ситуаціях (наприклад, під час урагану).
- Лопаті, які є ключовим елементом вітроустановки, призначеним для уловлювання енергії вітру. Завдяки лопатям здійснюється функціонування даного пристрою. Потік вітру, що потрапляє на лопаті, приводить їх у рух і забезпечує обертання ротора та подальшу генерацію енергії генератором.

Незважаючи на схожість, існують значні різниці у характеристиках вітрогенераторів з горизонтальним і вертикальними осями обертання. Проаналізуємо технічні можливості вітрогенераторів обох конструктивних типів [37-42].

Після вивчення конструкційних та технологічних особливостей промислових вітрогенератора можна зробити такі висновки:

- Вертикальний вітрогенератор має менший момент тертя, що дозволяє йому працювати навіть при мінімальних швидкостях вітру.

- Горизонтальний, натомість, є потужнішим і може забезпечувати електроенергією споживачів з значно більшою потужністю.
- Вертикально-осеві вітрогенератори встановлюються на землі, що спрощує доступ до генератора та їх обслуговування.
- Вертикальному вітрогенератору не страшні напрямленому по різному вітру або бурі, оскільки вони мають мінімальний опір вітру. Ці якості дозволяють встановлювати такі вітрогенератори навіть близько до житла та навіть у містах.
- В середньому більшість сучасних горизонтальних вітрогенераторів характеризується коефіцієнтом використання вітру, рівним 0,48. Згідно з даними спеціальних досліджень, цей коефіцієнт можна збільшити. Наприклад, у деяких конструкцій вітрогенератори, що відрізняються відмінними аеродинамічними характеристиками, коефіцієнт використання енергії вітру може досягати значення 0,593.
- Горизонтально-осеві вітрогенератори мають коефіцієнт корисної дії (40-59%). Тому ці вентилятори можуть використовуватися як для домашнього використання, так і для промислового виробництва електроенергії.
- Однаково горизонтальні вітрогенератори потребують постійного пошуку вітру за допомогою флюгера, що є додатковим пристроєм в складі вітрогенератори, ускладнює конструкцію та підвищує її вартість.

Вітряні турбіни можна розділити на 2 типи: підйомні і опорні. Вітряні турбіни підйомного типу використовують підйом лопатей для приведення осі обертання у обертання, тим самим перетворюючи енергію вітру на електричну енергію. Цей вид вітряних турбін наразі є найпоширенішим. Більшість вітряних турбін з горизонтальною віссю відносяться до вітряних турбін підйомного типу. Наразі у великих і середніх вітроенергетичних установках переважно використовуються вітряні турбіни з горизонтальною віссю, які є вітряними турбінами підйомного типу з наступними перевагами:

- висока швидкість;
- висока ефективність використання вітру.

Коефіцієнт швидкості на кінці лопаті зазвичай перевищує 4, а максимальний коефіцієнт потужності може сягати 50%. Вітряні турбіни опорного типу використовують опір, отриманий на лопатях, для приведення генератора в дію для виробництва електроенергії. Більшість вітряних турбін опорного типу – це вітряні турбіни з вертикальною віссю (рис.1.1. та рис.1.7).



Рисунок 1.7 – Вітряні генератори з вертикальною віссю

Вертикальні вітряні турбіни підйомного типу мають численні переваги, серед яких проста конструкція та легке обслуговування. Вони також досягають високої швидкості, подібно до вітряних турбін підйомного типу, та виявляють покращений коефіцієнт використання енергії вітру. У порівнянні з вітряними турбінами з горизонтальною віссю, вони забезпечують більш раціональне використання зусиль під час роботи та мають підвищений термін служби. Для подальшого дослідження були обрані саме вітряні турбіни з вертикальною орієнтацією для більш детального аналізу.

На етапі обмеженого впровадження вітрогенераторів для вирішення проблем щодо якості електроенергії було достатньо використання схем

плавного пуску вітрогенераторів, а також застосування зовнішнього обладнання у вигляді коректорів коефіцієнта потужності задля забезпечення високих значень коефіцієнта потужності у точці підключення вітрогенератора до електричної мережі.

Крім того, під час аварійної ситуації в мережі електропостачання, коли вітрогенератор не має можливості генерувати струм протягом суттєвого проміжку часу, а час спрацьовування внутрішньої схеми захисту вітрогенератора не узгоджений з часовими уставками захисту загальної системи, це може призвести до розширення та ускладнення наслідків аварії.

1.3 Висновки до розділу

Вивчення особливостей промислових вітроустановок дозволяє зробити низку висновків:

1. Вертикальні вітрогенератори мають менший момент інерції, що робить їх здатними до запуску вже при мінімальних швидкостях вітру, в той час як горизонтальні мають більшу потужність і можуть ефективно постачати електричні приймачі високою потужністю.

2. Встановлення вертикально-осьових вітроустановок на землі полегшує доступ до генератора та їх обслуговування.

3. Вертикальні вітрогенератори мають стійкість до різноспрямованих вітрів і бурях завдяки мініимальному опору. Ці якості дозволяють встановлювати їх близько до житлових зон і навіть у містах. Вісь обертання вітрогенератора з вертикальною віссю перпендикулярна до напрямку вітру.

4. Конструкція вітрогенератора з вертикальною віссю проста, і вітроколесо не обов'язково має бути спрямоване на вітер. Його переваги наступні: вітрогенератор може приймати вітер будь-якого напрямку, немає

необхідності повертати його "обличчям" до вітру; редуктори та генератори можуть бути встановлені на землі для зручності обслуговування.

5. Більшість сучасних горизонтальних вітроустановок мають коефіцієнт використання вітру близько 0,48, проте існують конструкції з більш досконалими аеродинамічними характеристиками, що дозволяють досягти коефіцієнта використання вітру до 0,593.

6. Горизонтальні вітрогенератори мають більш високий коефіцієнт корисної дії (40–59%), що робить їх придатними як для побутового використання, так і для промислового виробництва електроенергії.

7. Однак горизонтальні вітрогенератори мають недоліки, включаючи необхідність у флюгері для пошуку вітру, що ускладнює конструкцію і збільшує вартість.

8. Враховуючи переваги вертикальних вітроустановок та розвинене виробництво даного типу, можна рекомендувати встановлення таких вітрогенераторів як альтернативне джерело живлення, тому слід поставити задачу по дослідженню умов їх роботи.

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ПИТАНЬ УМОВ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

2.1 Характеристика вітрогенератора

Вітроенергетичні установки включають не тільки обладнання для виробництва та зберігання електричної енергії, але також пристрої, що забезпечують стабільну напругу з відповідними стандартними показниками якості. У складі ВЕУ є акумуляторна батарея, яка заряджається від постійного струму. Електрогенератор, що також входить до складу ВЕУ, працює на змінному струмі. Тому в установці також присутній пристрій, що виконує функцію перетворення змінного струму на постійний випрямляч. Щоб забезпечити перетворення постійного струму назад на змінний (50 Гц, 220/380 В), використовується інвертор, особливо якщо електричні приймачі, що працюють від вітрогенератора, чутливі до якості напруги живлення.

Параметри вітроенергетичної установки тісно пов'язані з кількома факторами, включаючи необхідний обсяг виробленої електроенергії та вітровий потенціал місцевості, де планується розміщення вітряка.

Вітровий потенціал місцевості визначається середньорічною швидкістю вітру (рис.1.1). Це значення є ключовим показником при виборі місця встановлення вітрогенератора.

Враховуючи переваги вертикальних вітрогенераторів ми робимо висновок про доцільність використання вітрогенератора українського виробництва цієї конструкції як альтернативного джерела енергії, основні характеристики якого наведено в табл.2.1 [43].

При виборі конкретної моделі вітрогенератора важливо враховувати кілька критеріїв: - середньорічна швидкість вітру на майданчику;

- електрична потужність, що виробляється;
- стартова швидкість вітру від 0,3 до 2 м/с.

Таблиця 2.1 - Характеристики вертикальних вітрогенераторів [43]

Вітрогенератор/Специфікація	VE-mini	VE-1	VE-1.5	VE-2	VE-3
Номінальна потужність, кВт	0,5	1	1,5	2	3
Максимальна потужність, кВт	1,5	3	4,5	5	9
Пускова швидкість вітру, м/с	0.3	0,4	0,7	0,8	0,9
Швидкість вітру для стійкого заряджання АКБ, м/с	2	2	2,5	2,5	2,5
Швидкість вітру для номінальної потужності, м/с	8	8	8	8	8
Діаметр вітроколеса, м	1.3	2	3	4	4,8
Висота крила, м	3	4	4	4	5
Вага вітроколеса, кг	45	80	170	250	360
Кількість крил, шт	3	5	5	5	5
К-ть енергії за годину, кВт	0,5	1	1,5	2	3
К-ть енергії за місяць, кВт	360	720	1080	1440	2160

Зв'язок між швидкістю вітру і електричною потужністю вітрогенератора, що генерується, описується формулою:

$$P_{\text{ел}} = \xi 0,5 \pi R^2 \rho V_{\text{ср}}^3 \eta, \quad (2.1)$$

де ξ - коефіцієнт використання енергії вітру;

R - радіус вітроколеса;

ρ - щільність повітря;

$V_{\text{ср}}$ - середньорічна швидкість вітру;

η - ККД електромеханічного перетворювача енергії.

Номінальна швидкість вітру, як правило, становить від 5 до 15 м/с. Оцінка середньорічної швидкості вітру проводиться за допомогою шкали Бофорта та спостережень за видимими ефектами вітру на майданчику протягом року.

Обсяг виробленої електроенергії залежить від площі поверхні лопатей, що омиває вітер. Ця площа визначається діаметром (або радіусом) вітроколеса.

В роботі будемо розглядати вітрогенератор VE-3 з прямим приводом на вертикальній осі (див. рис. 2.1), що включає в себе:

- вітряну турбіну;
- генератор;
- вал;
- муфту;
- башту тощо.

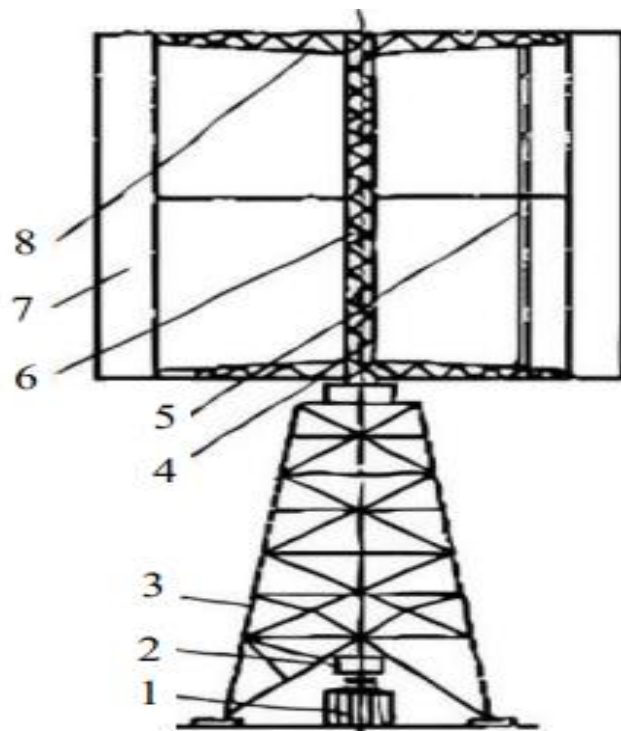


Рисунок 2.1 – Вертикальний вітрогенератор:

1 – генератор; 2 – прискорювач швидкості; 3 – вежа; 4 – нижня опора; 5 – тормози лопаті; 6 – вертикальний вал; 7 – лопаті; 8 – верхня опора.

2.2 Характеристика режимів роботи вітрогенератора

Вітрогенератор може працювати в різних режимах, залежно від швидкості вітру, наявності електричного навантаження та інших факторів. Ось основні режими роботи вітрогенератора:

Початковий запуск: При досягненні певної мінімальної швидкості вітру починається початковий запуск. У цьому режимі вітрогенератор активується, починає обертатися та генерувати електроенергію. Цей режим зазвичай характеризується низькою продуктивністю.

Режим змінної швидкості: У цьому режимі вітрогенератор працює зі змінною швидкістю обертання ротора, що дозволяє ефективніше використовувати вітрову енергію в різних умовах. При зміні швидкості вітру швидкість обертання ротора автоматично регулюється для оптимального вироблення електроенергії.

Режим фіксованої швидкості : У цьому режимі вітрогенератор працює на постійній швидкості обертання ротора. Зазвичай, цей режим використовується в старих моделях вітрогенераторів. Він менш ефективний, ніж режим змінної швидкості, але все ще може бути використаний.

Режим зупинки: Якщо швидкість вітру стає занадто високою або вітрогенератор потрібно вимкнути через технічні причини, він переходить у режим зупинки. У цьому режимі ротор вітрогенератора зупиняється, щоб запобігти пошкодженню та забезпечити безпеку.

Режим регулювання потужності: У цьому режимі вітрогенератор регулює потужність, що виробляється відповідно до потреби. Це дозволяє підтримувати стабільний рівень живлення в мережі та керувати навантаженням.

Різні режими роботи вітрогенератора застосовуються залежно від умов експлуатації та вимог енергосистеми, враховуючи такі особливості:

1. **Умови вітрового потенціалу:** Вітрогенератори включаються до роботи залежно від швидкості вітру у конкретному регіоні. Початковий

запуск відбувається при досягненні мінімальної швидкості вітру, а режимі змінної швидкості вітрогенератор регулює свою роботу залежно від змін швидкості вітру.

2. Вимоги енергосистеми: Енергосистеми можуть вимагати стабільного чи регульованого виробництва електроенергії. Режим фіксованої швидкості може бути кращим для мереж з постійним навантаженням, тоді як режим змінної швидкості забезпечує гнучкіше управління виробництвом енергії для мереж зі змінним навантаженням.

3. Технічні можливості та вимоги: Старі моделі вітрогенераторів можуть працювати тільки в режимі фіксованої швидкості, тоді як сучасні моделі зазвичай мають можливість регулювання швидкості обертання ротора для оптимальної ефективності.

4. Безпека та запобігання пошкодженню: Режим зупинки активується при досягненні критичних умов вітру або у разі потреби технічного обслуговування, щоб запобігти пошкодженню обладнання та забезпечити безпеку персоналу.

5. Ефективне використання вітроенергії: Режим регулювання потужності дозволяє оптимізувати використання вітроенергії відповідно до потреб енергосистеми та забезпечити стабільне електропостачання.

Таким чином, вибір та використання конкретного режиму роботи вітрогенератора залежить від ряду факторів, включаючи умови вітрового потенціалу, вимоги енергосистеми, технічні характеристики обладнання та безпеку експлуатації.

Характер роботи вітроустановок можна розділити на два основні режими: перетворення енергії при змінній та постійній швидкості вітру.

Саме вітроколесо, або ротор, також може функціонувати в постійному або змінному режимі, який досягається шляхом зміни кута установки лопатей або використання пітч-контролю. При цьому лопаті можуть повертатися довкола своїх осей. Термін "вітродвигун" також застосовується до вітроколеса з його механізацією, який відповідає за перетворення вітрової

енергії на механічну енергію обертання. Існує два типи вітродвигунів залежно від режиму роботи: з постійною та змінною швидкістю обертання.

Вітродвигун із постійною швидкістю обертання характеризується тим, що ротор обертається з постійною кутовою швидкістю. Він з'єднаний з валом асинхронного генератора подвійного живлення із короткозамкненим ротором. Частота обертання цього генератора прив'язана до частоти мережі, до якої він підключений, і змінюється при зміні швидкості вітру у певному діапазоні. Переваги цього типу вітроустановок: проста та надійна конструкція та низька вартість.

Недоліки:

- Обмежена здатність вилучення максимальної енергії з вітру.
- Обмеження в регулюванні активної та реактивної потужності, що надходить у мережу, через особливості даного типу генератора.
- Збільшене механічне навантаження на мультиплікатор (коробку передач) при змінній швидкості вітру.

Вітродвигун зі змінною швидкістю обертання характеризується тим, що ротор обертається зі змінною кутовою швидкістю. Його переваги [23]:

1. Вітрогенератор зі змінною швидкістю може ефективно працювати на оптимальних умовах швидкохідності в ширшому діапазоні швидкостей вітру, що дозволяє максимально використовувати вітрову енергію і підвищити ефективність роботи вітроустановки [23].

- Можливість подачі живлення на постійній напрузі при частоті обертання ротора, що змінюється.
- Управління активною та реактивною потужністю, що надходить у мережу.

Недоліки [23]:

- Вітрогенератор генерує змінну частоту та змінний струм/напругу, що потребує спеціальних пристроїв для перетворення енергії перед її передачею в електричну мережу.

– Висока продуктивність при змінній швидкості обертання ротора може призвести до збільшених механічної напруги і коливань потужності.

Тим не менш, це також забезпечує більш високу вихідну потужність порівняно з вітроустановками, що працюють на основі постійної швидкості та підвищує надійність експлуатації обладнання [25-34].

Сучасні дослідження сфокусовані на підвищення характеристик вітроустановок зі змінною швидкістю обертання ротора. Методи керування такими установками різняться залежно від режиму. Їх можна поділити на 3 області.

Область 1 – це швидкість вітру до 5 м/с (нормальна швидкість вітру). Тут вітрогенератор запускається. Алгоритм управління в цій галузі спрямований на контроль швидкості вітру та ухвалення рішення про можливість її відповідності технічним вимогам роботи вітроустановки. Якщо умови відповідають, виконуються необхідні процедури запуску ротора.

Область 2 – розташований між швидкістю вітру 5 м/с (нормальна швидкість вітру) та номінальною швидкістю вітру 14 м/с, де вітроустановка працює найбільш ефективно, витягуючи максимальну кількість енергії з потоку вітру. У цій галузі методи управління крутним моментом генератора та орієнтацією ротора широко використовуються, зберігаючи постійні кути контролю (кути нахилу лопатей).

Область 3 – вище номінальної швидкості вітру (від 14 м/с до 23 м/с) вимагає підтримки певної фіксованої швидкості обертання ротора і номінальної вихідної потужності. Управління контролем лопатей використовується для регулювання зайвої потужності на пост номінальних швидкостях вітру. Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є ефективним та простим методом управління, який обмежує швидкість обертання ротора та відповідну потужність.

Коефіцієнт використання енергії вітру (C_p) є ключовим показником, що відображає ефективність роботи вітрогенератора. Оскільки не вся енергія

вітру, що пройшла через турбіну, не може бути повністю перетворена на механічну енергію, коефіцієнт використання енергії вітру C_p визначається:

$$C_p = P_m / P_w, \quad (2.2)$$

де P_m - вихідна механічна потужність вітряної турбіни

P_w - енергії вітру, що надходить на вітрогенератор.

Цей коефіцієнт змінюється зі швидкістю вітру та обертанням турбіни. Відношення лінійної швидкості кінчика лопаті до швидкості вітру відоме як коефіцієнт швидкості кінчика лопаті (λ). Для досягнення найкращого коефіцієнта використання енергії вітру зазвичай обирається відповідне співвідношення швидкостей на кінчику лопаті відповідно до кривої $C_p - \lambda$ [44]. При досягненні коефіцієнта швидкості обертання кінчика лопаті на приблизно 8, коефіцієнт використання енергії вітру досягає свого максимуму, і значення C_p має найвищу величину (0,45). У реальних умовах вітряна турбіна зазвичай не досягає такого високого коефіцієнта використання енергії вітру. Тому спочатку, під час проектування вітрогенератора, встановлюється коефіцієнт швидкості обертання кінчика лопаті на рівні $\lambda = 6,1$, а коефіцієнт використання енергії вітру $C_p = 0,3$.

В літературі є фундаментальна теорія, щодо ефективного використання енергії вітру у вітроенергетиці – це Закон Беца (запропонований німецьким фізиком Альбертом Бецем у 1919 році) ґрунтується на концепції "ідеального вітроколеса", яке може забезпечити повний збір кінетичної енергії газу, що проходить через нього, при умові, що газ є безперервним та таким, що не стискається.

У такому ідеальному сценарії граничне використання енергії вітру, яке може бути перетворено на кінетичну енергію, становить $16/27$, що приблизно дорівнює 59%. Формула для розрахунку цього [44]:

$$\frac{dC_p}{da} 4(1-a)(1-3a) = 0, \quad (2.3)$$

де a - коефіцієнт індукції повітряного потоку;

C_p -коефіцієнт використання енергії вітру.

Найбільше значення коефіцієнт використання енергії $C_p=0,59$, набуває при $a=1/3$.

Відношення швидкості кінчика лопаті вітрової турбіни до швидкості вітру відоме як відношення швидкості кінчика лопаті. Це співвідношення зазвичай коливається від 33 до 88 для турбін підйому.

У вітрових турбінах підйому, ставлення швидкості кінчика лопаті коливається від 0,3 до 0,6 та безпосередньо відображає відносну швидкість вітру та кут атаки лопаті, що є ключовим параметром для аналізу продуктивності турбіни [44].

При постійній роботі вітроколеса, лопать завжди знаходиться під належним кутом атаки протягом певного періоду часу. Встановлено, що при оптимальному куті атаки у 13° отримуємо найбільшу кінетичну енергію вітру, а максимальний крутний момент формується вітроколесом. Ці дані можна виразити у такому вигляді:

$$M = \frac{1}{2} \rho v^2 R (1 + \cot^2 \varphi) (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) S,$$

$$N = \frac{1}{2} \rho v^2 \cot \varphi (1 + \cot^2 \varphi) (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) S,$$

$$N = w \times M,$$

Де ρ – густина повітря ($1,205 \text{ кг/м}^3$),

v – швидкість вітру, (м/с).

R – радіус розгортки вітроколеса (м),

S – площа вітроповерхні однієї лопаті (м^2),

M – крутний момент, утворений лопаттю після збору енергії вітру ($\text{Н}\cdot\text{м}$),

N – потужність енергії вітру, яку вбирає лопата (Вт),

C_L – підйомна сила,

C_D – коефіцієнтом лобового опору аеродинамічного.

Згідно з графіком, що показує залежність між підйомною силою та коефіцієнтом лобового опору і кутом атаки α , коли кут атаки лопаті відносно напрямку вітру становить 13° , турбіна отримує максимальну кінетичну енергію (рис. 2.2) [44].

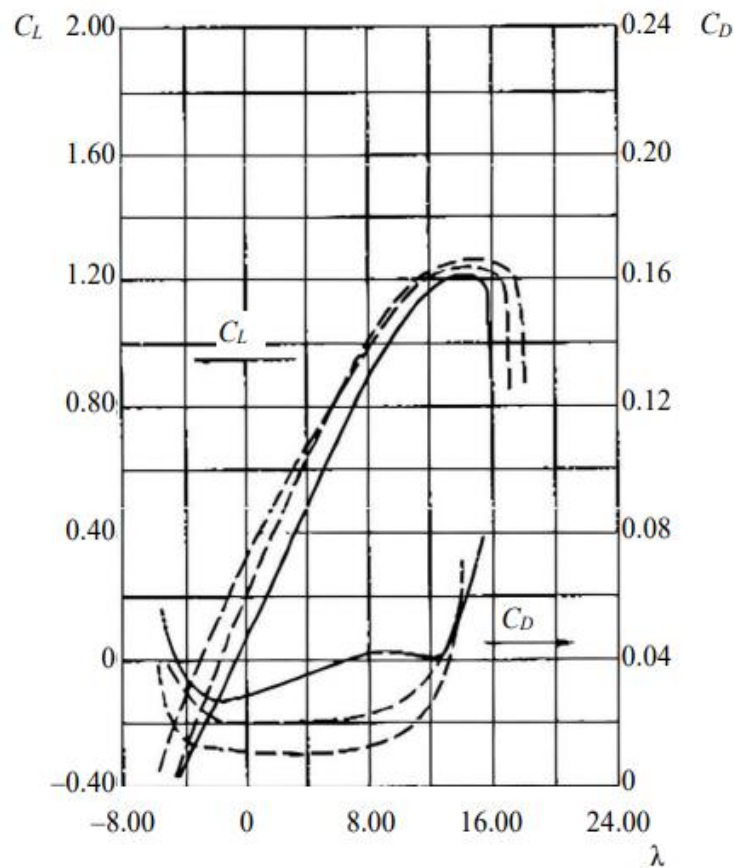


Рисунок 2.2 – Відношення між підйомною силою та коефіцієнтом лобового опору в залежності від кута атаки

Отримані дані крутного моменту:

при швидкості вітру 0,90 м/с $M = 1,723 \text{ Н} \cdot \text{м}$,
при швидкості вітру 2,50 м/с $M = 2,458 \text{ Н} \cdot \text{м}$,
при швидкості вітру 5,0 м/с $M = 6,4222 \text{ Н} \cdot \text{м}$,
при швидкості вітру 8,0 м/с $M = 7,624 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

2.3 Висновки до розділу

Вітрогенератор вертикального типу має низькі експлуатаційні вимоги. Встановлення вертикально-осьової вітрової турбіни дозволяє повністю використати потенціал енергії вітру. Вісь обертання вертикально-осьової вітряної турбіни перпендикулярна до напрямку вітру і не залежить від джерела вітру. При постійній зміні напрямку вітру вертикально-осьова вітрова турбіна зберігає нормальну та стабільну роботу, що дозволяє їй ефективно та безпечно працювати у складних та мінливих вітрових умовах на різних висотах. Теоретичні дані, отримані шляхом зміни величини вітру, коли швидкість вітру досягає 0,9 м/с, показали, що вітрогенератор з вертикальною віссю може запуститися та працювати нормально. При швидкості вітру більше 15 м/с вітряна турбіна все ще може працювати безпечно.

Вітряні турбіни з вертикальним підйомом повністю адаптовані до складного та мінливого вітрового середовища на різних висотних і можуть працювати безпечно та ефективно, забезпечувати постійний потік чистої енергії і навіть стати експортерами енергії, які відіграють позитивну роль у зниженні енергетичного тиску та покращенні стану навколишнього середовища.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ВІТРОГЕНЕРАТОРА У ЗМІНЮВАНИХ УМОВАХ

3.1 Огляд напрямів вдосконалення режиму роботи вітрогенератора

Вітрогенератори з вертикальною віссю не вимагають спеціальних пристроїв для орієнтації відносно напрямку вітру. Проте крутний момент залишається сталим протягом одного оберту, а самі лопаті турбіни, обертаючись, створюють імпульси, які призводять до додаткових навантажень на елементи їх конструкції, по літературним даним цей недолік ліквідують – гвинтовим поворотом.

Однак, залежно від напрямку і швидкості вітру, а також величини навантаження на вітрогенератор, генератор постійного струму може працювати у одному з таких режимів:

- заряджає батарею без зовнішнього навантаження;
- заряджає батареї та використовується для зовнішнього навантаження;
- працює з батареєю паралельно для живлення зовнішнього навантаження;
- батарея живить зовнішнє навантаження незалежно від вітрогенератора.

Зазвичай акумуляторна батарея працює у змішаному режимі для вітрогенераторів, перемикаючись між режимами заряду та розряду - цей режим відомий як буферний. Це відбувається тоді, коли одночасно є навантаження для розряду батареї та вітер має достатньо потужний потік для її підзарядки.

Зарядний струм залежить від різниці у напругах між генератором та акумуляторною батареєю. Чим менша напруга батареї, тим більший зарядний струм, за умови наявності достатньо сильного вітру.

Один із особливих аспектів оцінки продуктивності вітроенергетичних установок полягає у врахуванні змінних параметрів та потужності вітрових джерел енергії. На рис.3.1 наведено типову енергетичну характеристику

вітрогенератора, крива 1 розрахована по формулі 3.1, а крива 2- побудована з аналізу даних, для практично оцінених даних, я як бачимо коли швидкість вітру сягає величини менше мінімальної, то вітрогенератор зупиняється. Мінімальна швидкість вітру визначається як, половина від номінальної [45].

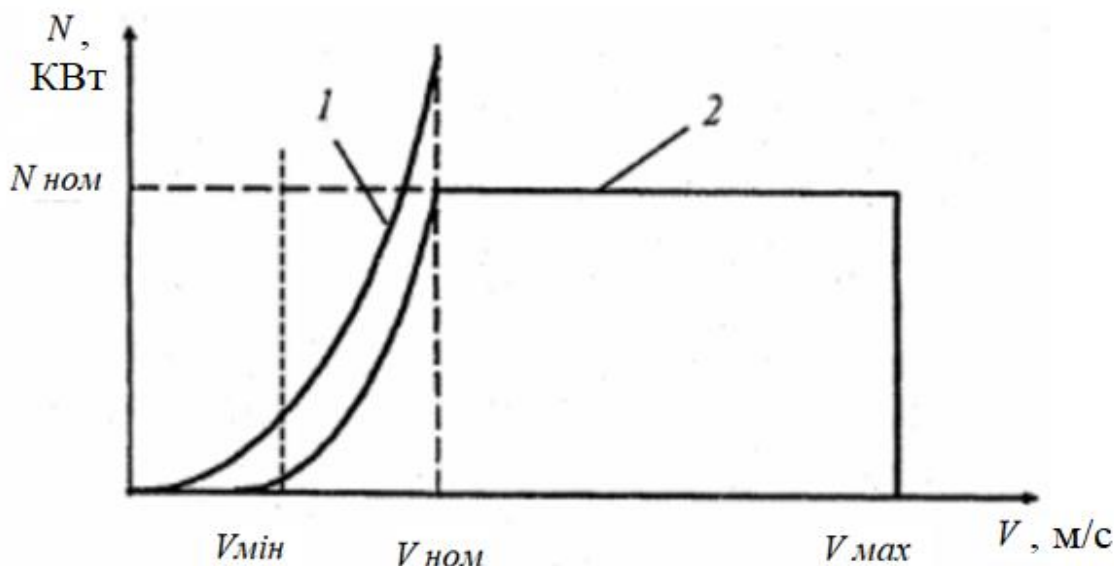


Рисунок 3.1 – Характеристика вітрогенератора (енергетична): 1- теоретична, 2 – практична.

З аналізу графіка енергетичної характеристики вітрогенератора очевидно, що при зростанні швидкості вітру збільшується його енергія. Проте через пологоу форму реальних енергетичних характеристик використання цієї енергії не може бути повністю оптимізоване [26].

Величина потужності для вітрового потоку (N) визначається за формулою:

$$N(V) = C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S / 2, \quad (3.1)$$

де ρ – густина повітря;

V – швидкість вітрового потоку, який рухається на лопаті;

S – площа вітроколеса, яка контактує з вітром;

C_p – коефіцієнт використання енергії вітру.

Однак останні наукові відкриття надають докази того, що аеродинамічні характеристики ротора, виражені через коефіцієнт використання енергії вітру (C_p) відносно швидкості вітру (λ), змінюються зі збільшенням швидкості вітру.

Цю закономірність можна математично змоделювати для заданої швидкості вітру по наступним виразам:

$$C_p(\lambda, V_B) = 1,14 \left(\frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) \exp \frac{-f(V_B)}{\lambda},$$

де $f(V_B)$ – функціональна залежність від швидкості вітру:

$$f(V_B) = 0,003869V_B^2 - 0,128V_B + 6,627$$

Отримані залежності представлено на рис.3.2. Як бачимо, максимум C_p в інтервалі від 0,28 до 0,38 спостерігаємо для від $\lambda=3,5$ до $\lambda=3,9$.

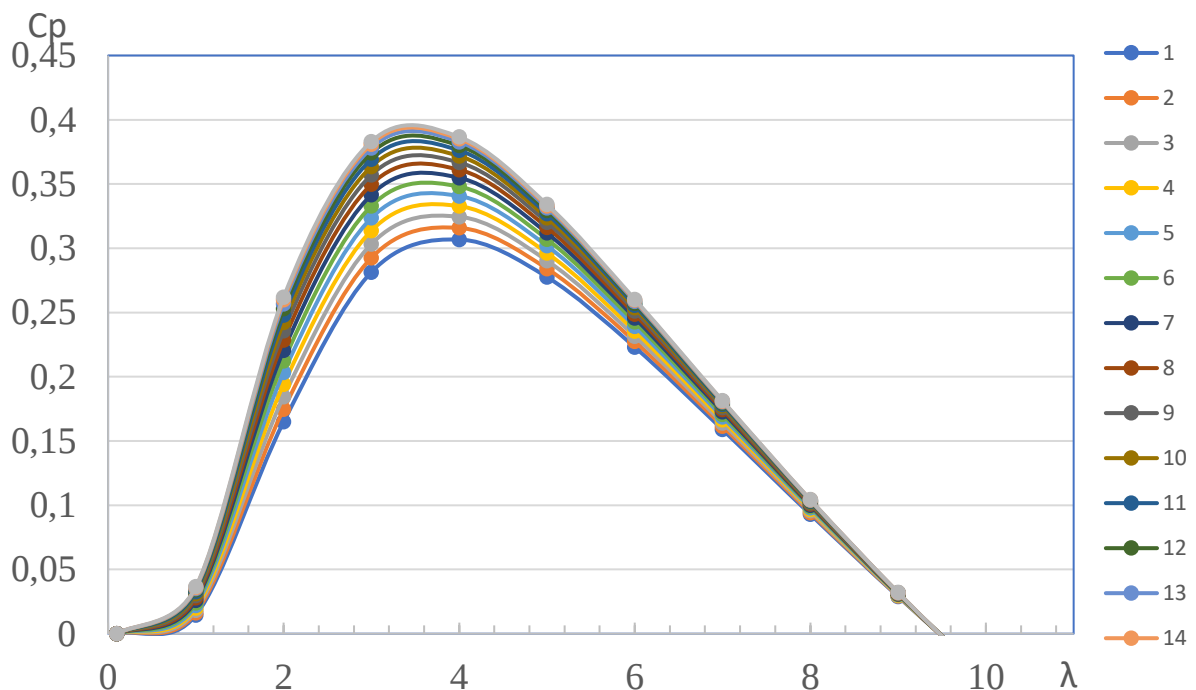


Рисунок 3.2 – Залежність C_p від λ при зміні швидкості вітру ($v=1$ м/с (1)... $v=15$ м/с(15))

Тому можна стверджувати, що ігнорування впливу швидкості вітру та температури повітря на ротор призводить до зміни його робочих параметрів та аеродинамічних характеристик, виражених коефіцієнтом використання енергії вітру (C_p) відносно швидкості вітру (λ), порівняно з номінальними значеннями, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) вітроенергетичної установки.

Як вказано на рис.3.2, при досягненні швидкості вітру 5 – 7 м/с, коефіцієнт використання енергії вітру досягає свого максимуму, і значення C_p має найвищу величину (0,35 – 0,354). У реальних умовах вітряна турбіна зазвичай не досягає такого високого коефіцієнта використання енергії вітру.

Одним з ключових показників ефективності вітрогенератора є коефіцієнт використання встановленої потужності (K) [26]:

$$K = (N_f \times T) / (N_y \times T)$$

де N_f – номінальна потужність вітрогенератора за період часу T ;

N_y – середня потужність вітрогенератора за T .

T – період.

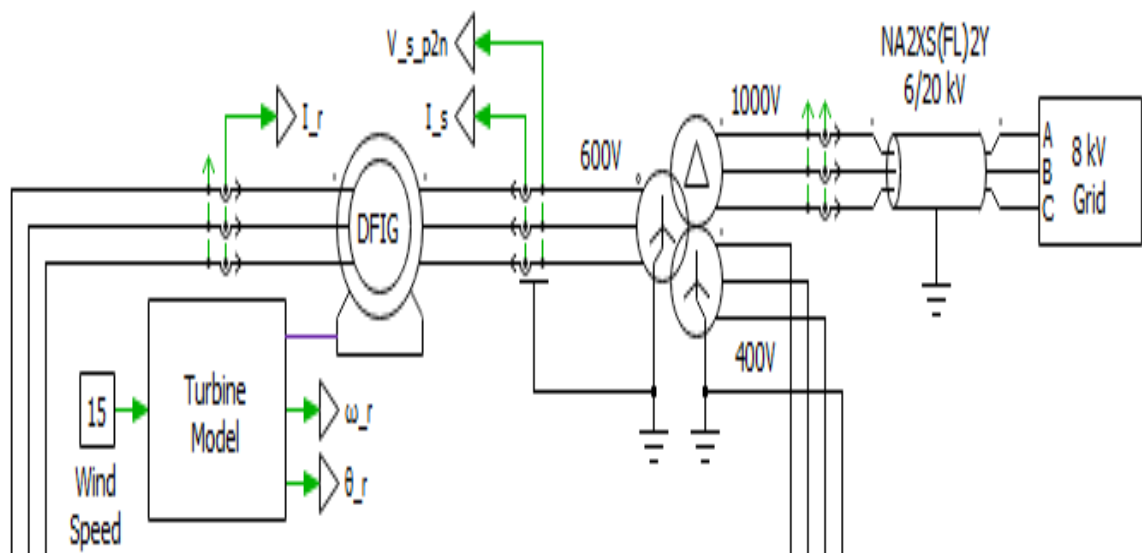
Аналіз статистичних даних використання вітрових енергетичних установок показує, що прийнятне значення коефіцієнта K знаходиться у діапазоні від 0,35 до 0,5. Тому для нашої установки в результаті розрахунку отримуємо 0,42.

3.2 Структурна схема та математична модель вітрогенератору

Для обраного вертикального вітрогенератора сформували структурну модель вітряної турбіни для застосування та змодельовали умови роботи вітрогенератора в програмному пакеті Matlab Simulink [37, 46-47]. Побудовано структурну схему отримання електричної енергії від енергії вітру з індукційним генератором з подвійним живленням (DFIG), яку представлено на рис.3.3,а та її прототип – математичну модель рис.3.3,б.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Система з індукційним генератором з подвійним живленням (DFIG): а) - структурна схема , б) - математична модель

Принцип дії всіх вітроустановок один: під напором вітру обертається вітроколесо з лопатями, яке передає крутильний момент через систему передач валу генератора, що виробляє електроенергію. Реальний к.к.д. кращих вітрових колес досягає 45% у разі стійкої роботи при оптимальній швидкості вітру [37].

У роботі [37] розглядаються моделі оцінки вітрових ресурсів, моделі вибору місця та аеродинамічні моделі, включаючи ефект сліду. Обговорено різні проблеми, пов'язані з компонентами вітрової турбіни (лопаті, редуктор, генератор і трансформатор) і мережею вітроенергетичної системи.

Система із використанням індукційного генератора ілюструє з'єднання вітрової турбіни з електромережею. Вона включає модель лопатей (рис. 3.4), втулки та валу, зворотний перетворювач (рис. 3.5), а також розрахунки електричних характеристик (рис. 3.6,а), теплових втрат (рис. 3.6,б), магнітну модель трифазного трансформатора, лінію електропередачі та мережу. Схема живлення включає двигун, статор якого безпосередньо приєднаний до мережі через трансформатор, а обмотка ротора з'єднана через контактні кільця до зворотного перетворювача. Зі сторони мережі перетворювач підключений до третинної обмотки трансформатора, який передає вироблену електроенергію в мережу середньої напруги 0,4 кВ через кабель завдовжки 20 км. Лінія передачі моделюється за допомогою компонента лінії з розподіленими параметрами [37, 46-47] .

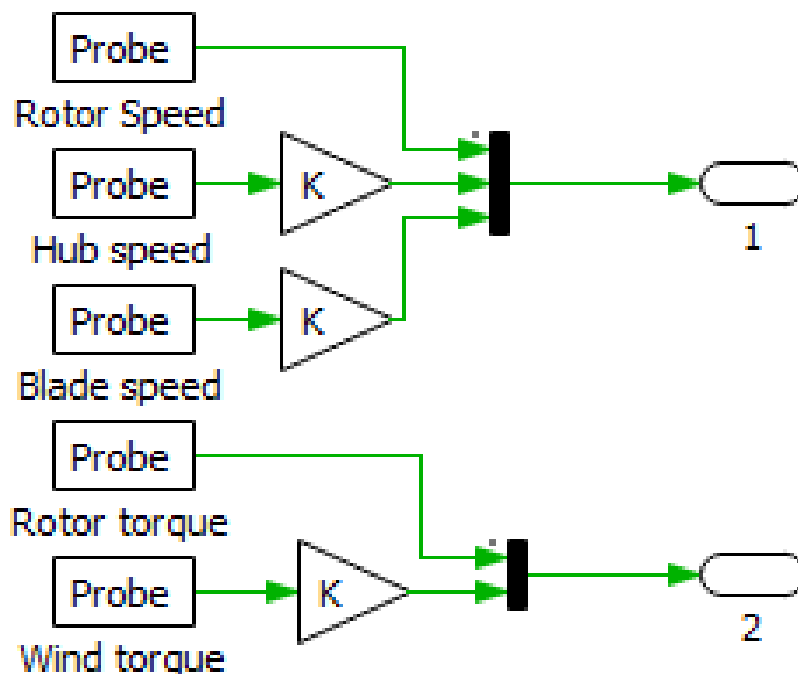


Рисунок 3.4 – Механічна модель лопатей, втулки та валу

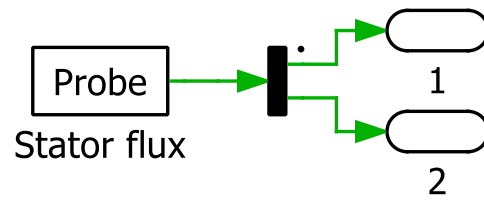
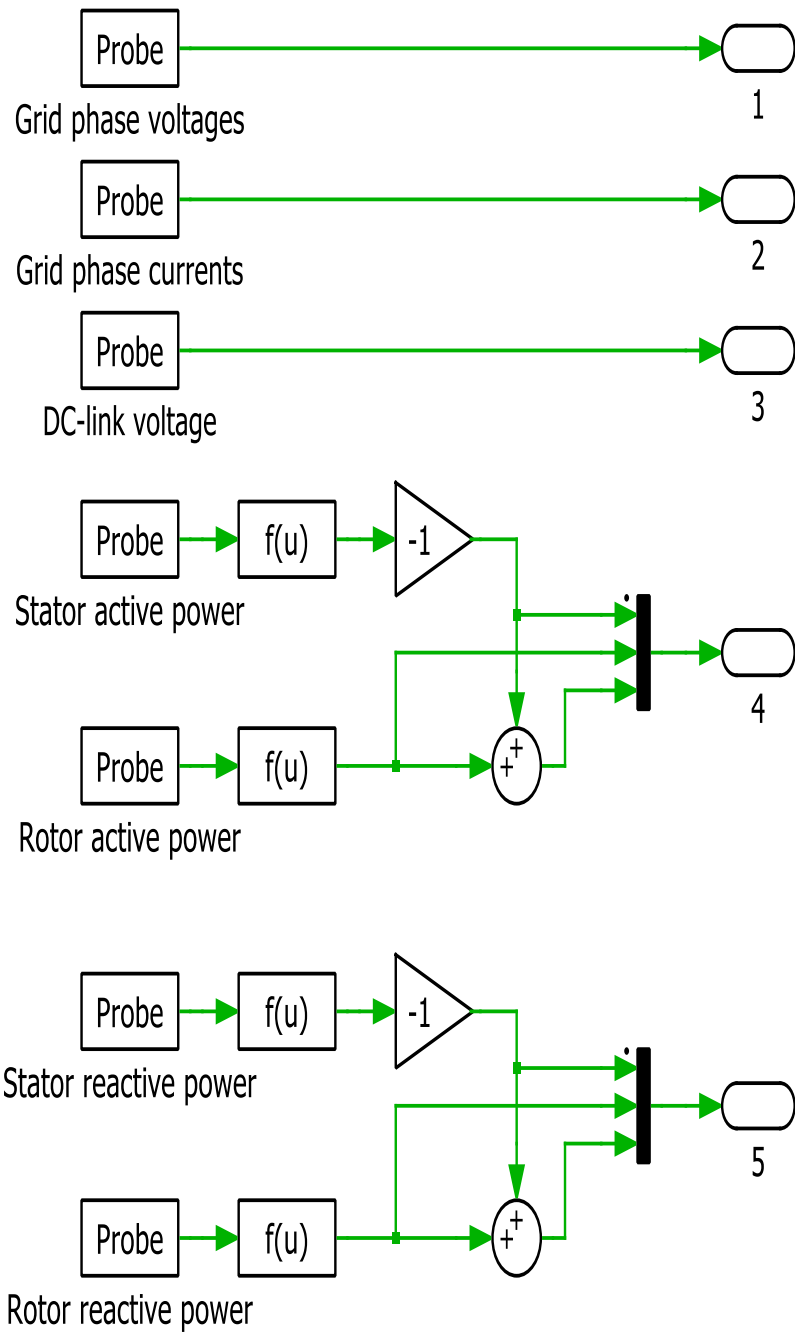


Рисунок 3.5 – Модель зворотного перетворювача



a)

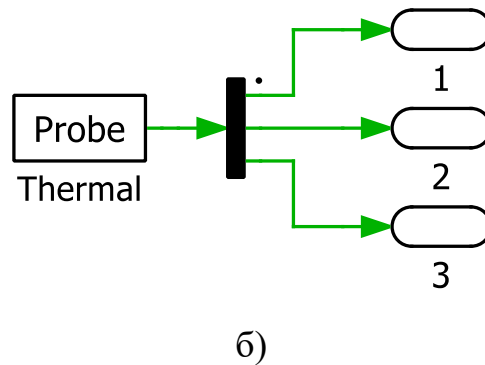


Рисунок 3.6 – Модель обчислення: а) електричних характеристик; б) теплових втрат

3.3 Аналіз зміни впливу швидкості вітру на параметри моделювання

Зазвичай номінальна швидкість вітру для великих вітроенергетичних установок становить 8 м/с, тому чим більша потужність установки, тим вищу швидкість вітру враховують. Проте через зміни швидкості вітру велику частка часу вітрогенератори виробляють меншу потужність. Так середньорічна швидкість вітру у даному регіоні не менша за 5 м/с, а кількість годин на рік, коли виробляється номінальна потужність, перевищує 2000 [48].

Лопаті вітряної турбіни вловлюють енергію вітру і перетворюють її в механічну енергію, яку генератор DFIG перетворює в електричну енергію для мережі завдяки встановленим перетворювачам, які максимально намагаються перетворити механічну енергію (залежить від швидкості вітру та напрямку вітрового потоку). Розглянемо та промодельємо варіант, коли на вхід запропонованої моделі подається середньорічна швидкість вітру 5 м/с і 8 м/с, що відповідає середнім значенням даного параметру по регіону.

В результаті моделювання роботи системи вітряної турбіни з індукційним генератором підключеної до електромережі при заданих параметрах швидкості вітру, наприклад 5 м/с, отримаємо наступні залежності рис.3.7 – рис.3.11 [37, 46-47] .

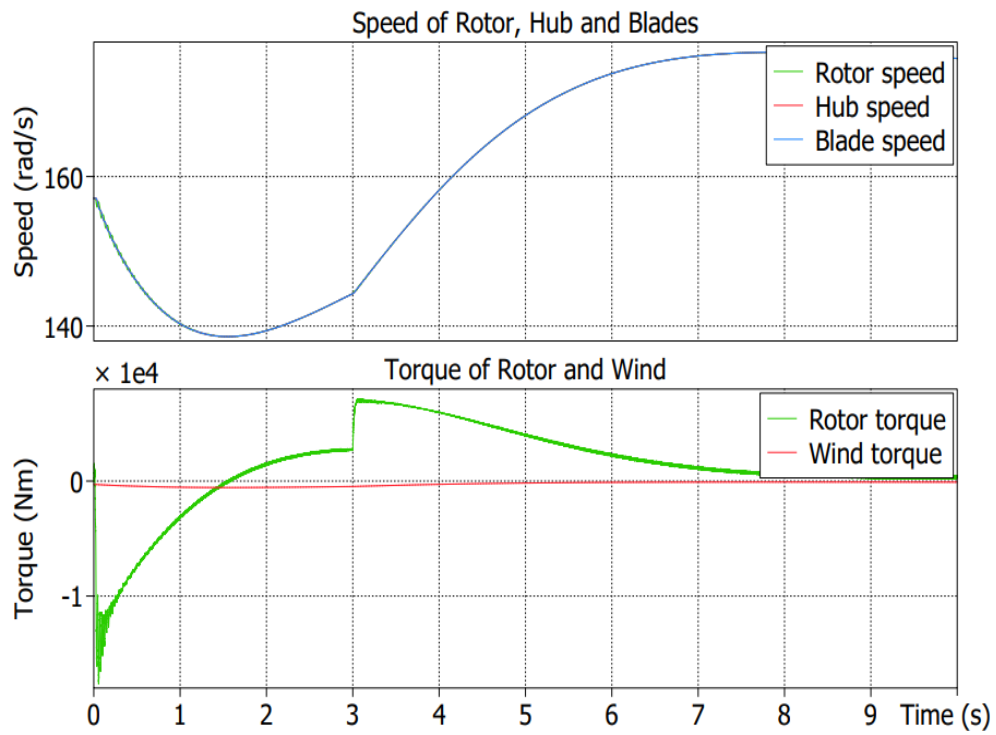


Рисунок 3.7 – Залежність зміни швидкості обертання (лопатей, втулки, валу) (1) та крутний момент ротора і вітру з часом (2)

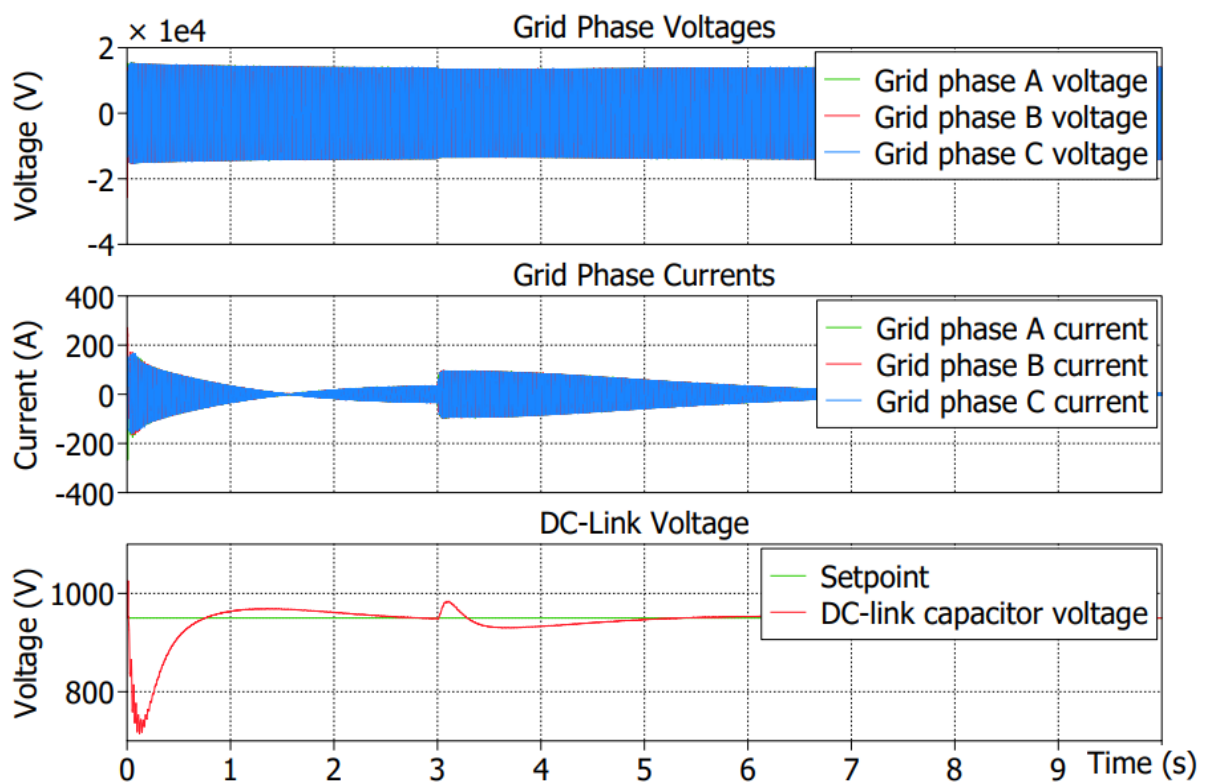


Рисунок 3.8 – Залежність зміни напруги та сили струму в часі

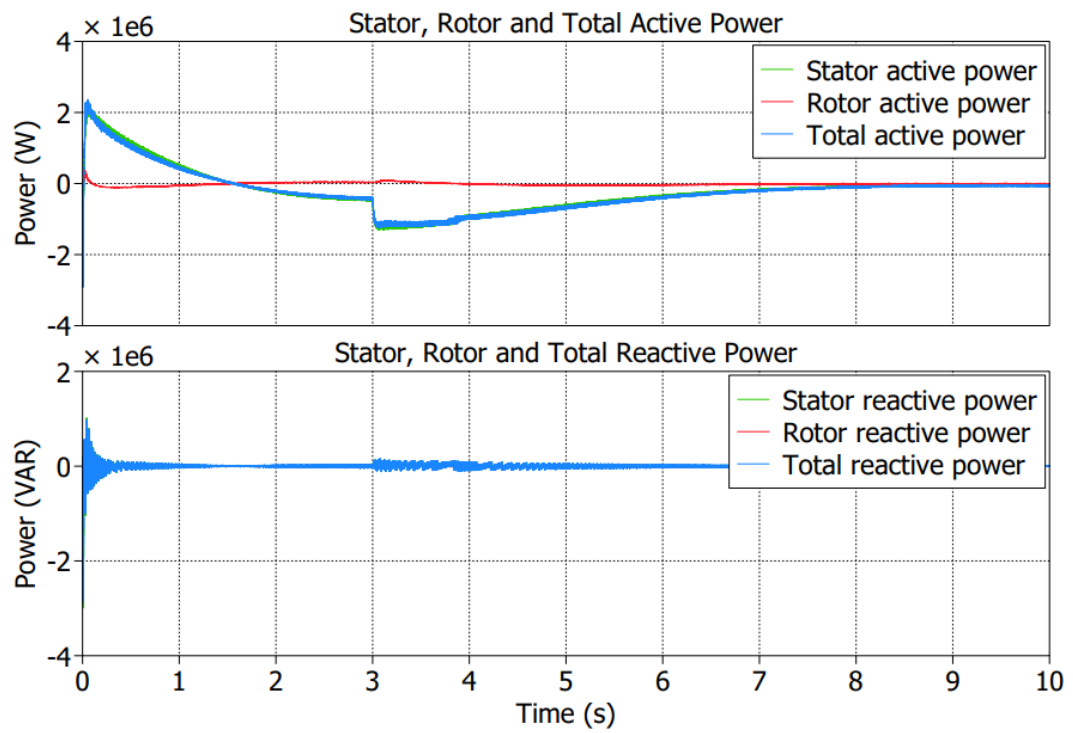


Рисунок 3.9 – Залежність зміни активної, реактивної, повної потужності з часом для статора та ротора

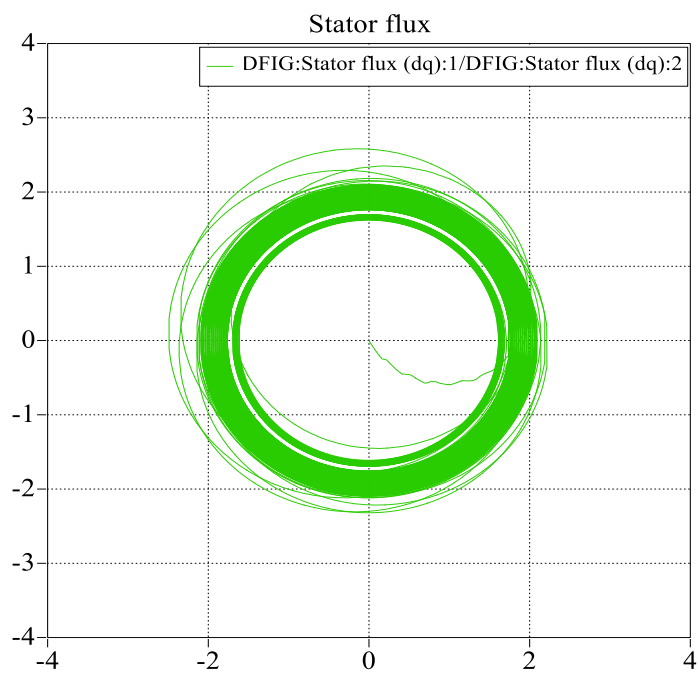


Рисунок 3.10 – Модель зміни магнітного потоку для статора

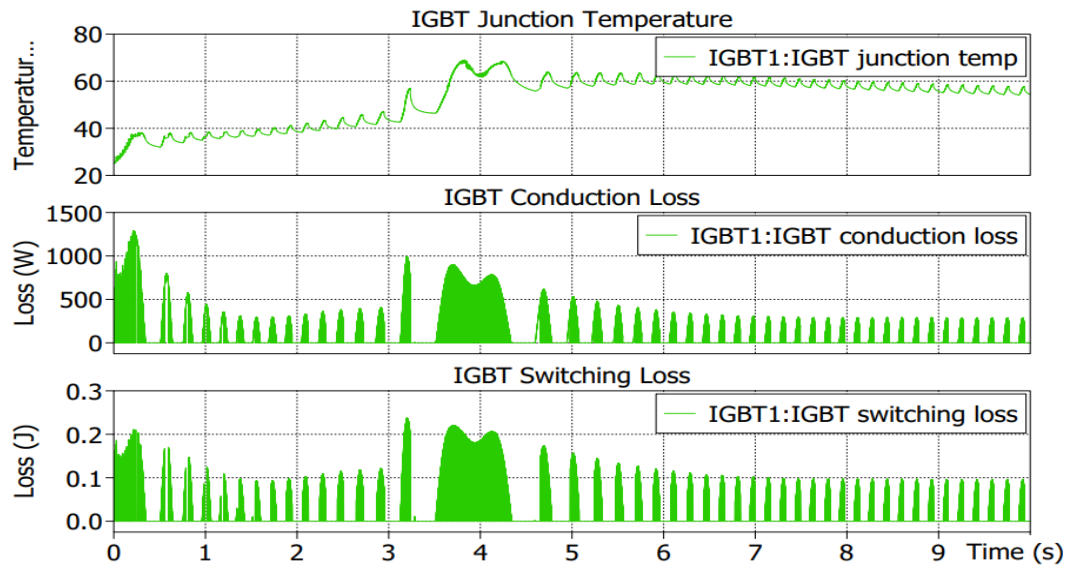


Рисунок 3.11 – Залежність зміни температури ($^{\circ}\text{C}$), втрата провідності, комутаційні втрати для швидкості вітру 5 м/с

Проведемо порівняння отриманих залежностей для швидкості вітру 5 м/с та 8 м/с (це середнє значення по регіону) протягом 10 с, які представлено на рис. 3.12 -3.16.

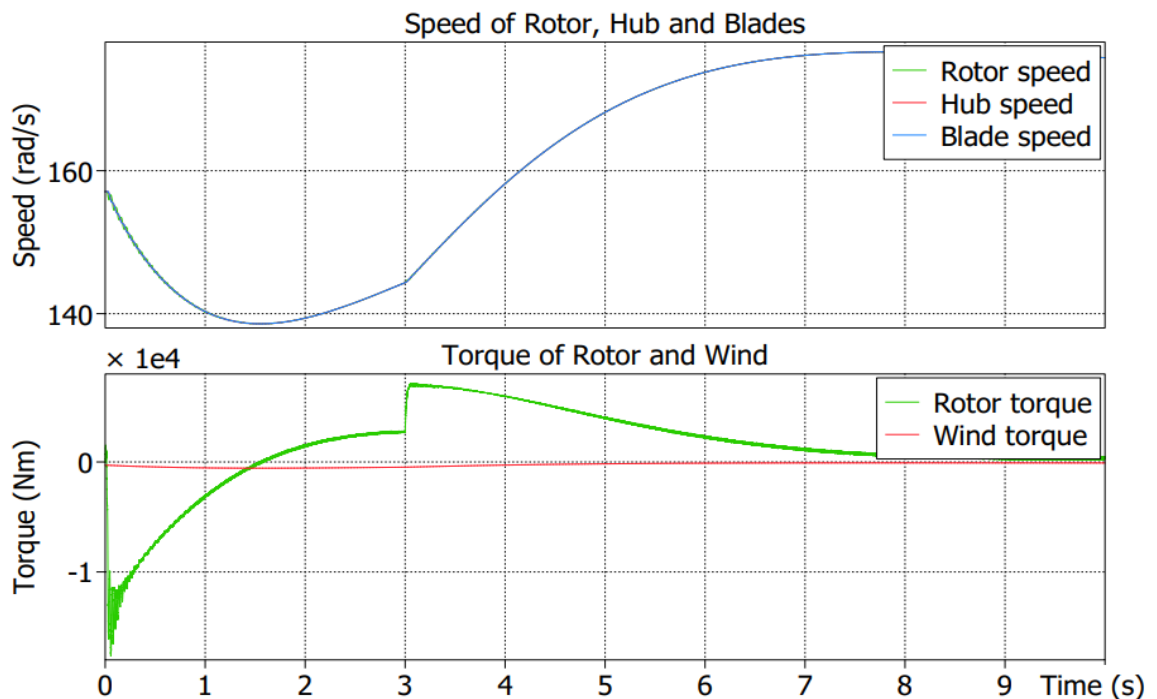


Рисунок 3.12 – Залежність зміни швидкості обертання (лопатеї, втулки, валу) та крутний момент ротора і вітру з часом для швидкості вітру 8 м/с

Визначимо характер зміни поведінки швидкості обертання: 1 – ротор; 2 – втулки; 3 – лопатей (рис. 3.7 та рис. 3.12). На початку моделювання ми спостерігаємо затухаючі коливання внаслідок пружного зв'язку та зв'язку, який пов'язано з втратами енергії на тертя. Після проведення оцінки впливу швидкості вітру 5 м/с та 7 м/с, оцінено поведінку швидкості обертання і обертального моменту. Зображено на рис.3.8 та рис.3.12, тут швидкість обертання втулки та лопатей була передана в сторону валу машини, та дозволила підвищити швидкість його обертання [37, 46-47].

Та як бачимо з рис.3.7 та рис.3.12 при швидкості вітру 5 м/с та 7 м/с приблизно через 3 с після старту електричний момент асинхронної машини і крутний момент вітру переходить у збалансований стан обертання, та приблизно на 7 с при швидкості вітру 7 м/с виходить на необхідну швидкість обертання, та залишається 177 рад/с [37, 46-47].

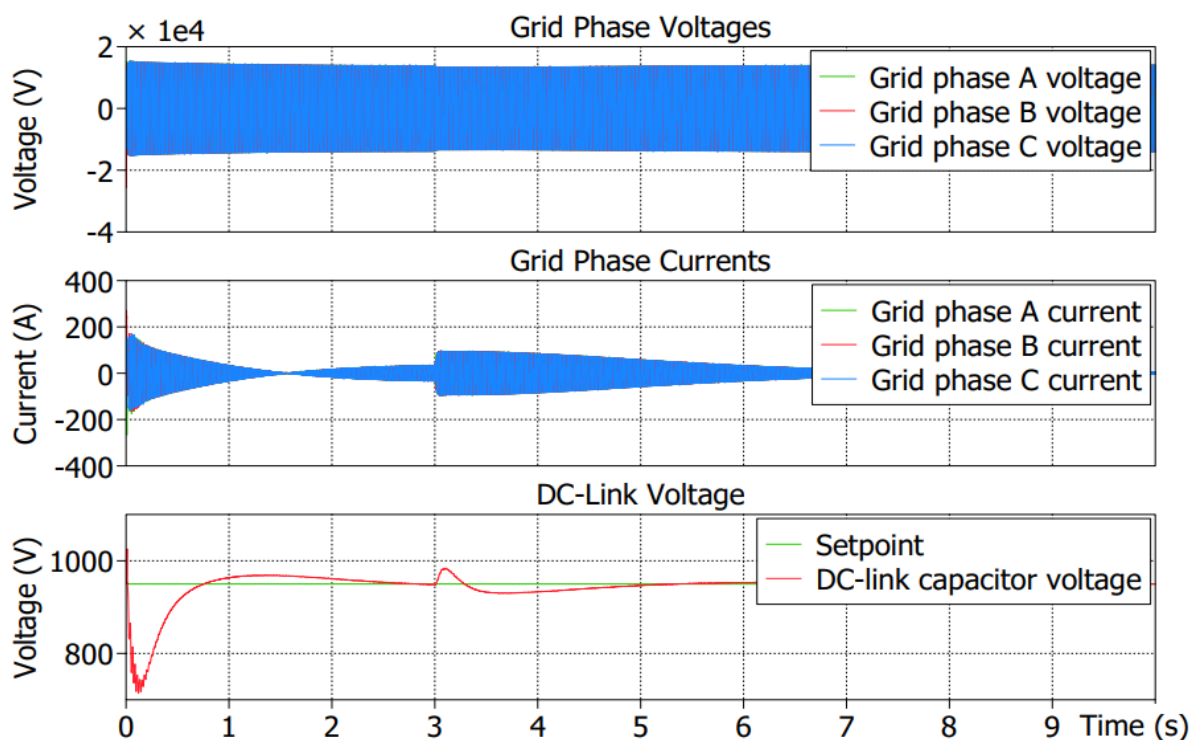


Рисунок 3.13 – Залежність зміни напруги та сили струму в часі для швидкості вітру 8 м/с

Та як бачимо з рис.3.8 та рис.3.13 при швидкості вітру 5 м/с та 7 м/с напруга для А, В, С фаз на всьому інтервалі дослідження є величиною змінною по синусоїдальному закону в межах від 1,5 до -1,5В, а ось сила струму має цікаву залежність (2) для А, В, С фаз і приблизно через 1,5 с після старту спостерігаємо затухаючі коливання величини сили струму, які далі відновлюються і амплітудне значення сили струму зростає і призводить до отримання піку сили струму на 3-4 секунді після запуску вітрогенератора, а далі спостерігаємо знову затухаючі коливання сили струму.

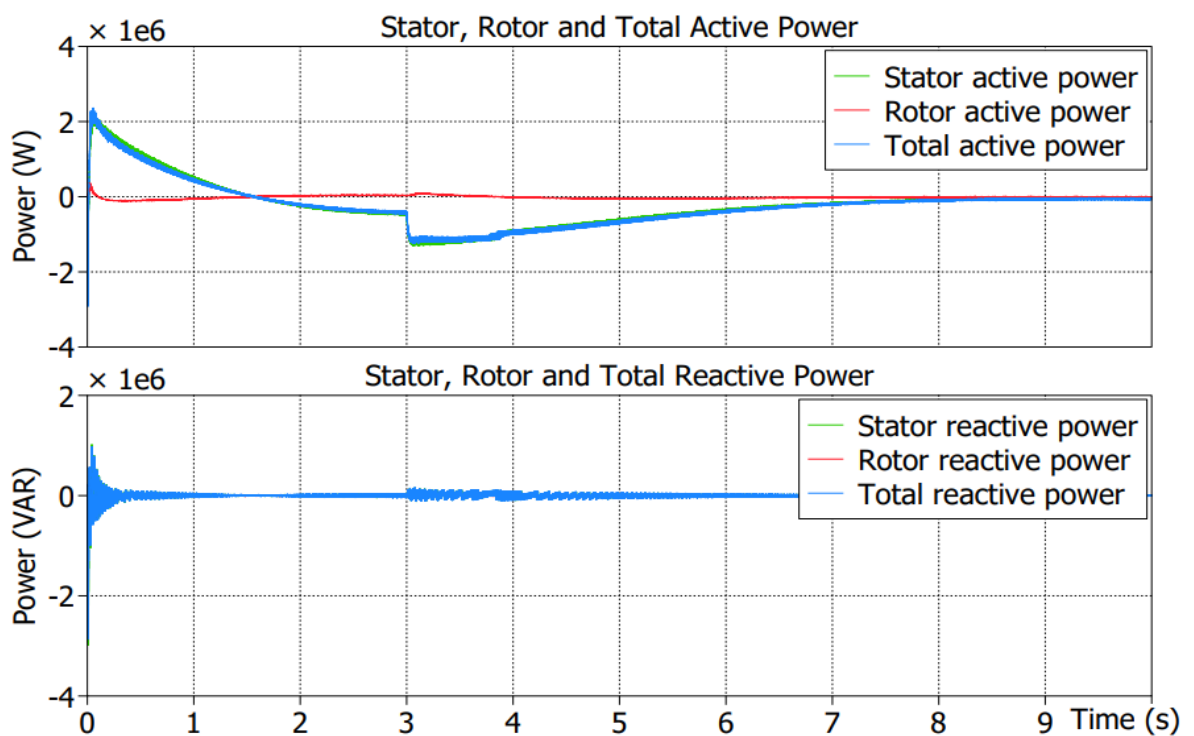


Рисунок 3.14 – Залежність зміни активної, реактивної, повної потужності з часом для статора та ротора для швидкості вітру 8 м/с

На рис.3.9 та рис.3.14 при швидкості вітру 5 м/с та 8 м/с також спостерігається піковий час в 3с, після якого відбувається налагодження роботи двигуна, та вихід на заданий режим роботи. Активна потужність являє собою корисну потужність, та визначається кількістю енергії, реально використаної при роботі електроустаткування, тобто енергії, що знімається з валу двигуна для обертання механізму. Але в цей же час

спостерігається коливання майже 10% реальної потужності в результаті процесу ковзання, яке передається з обмотки ротора [37, 46-47] .

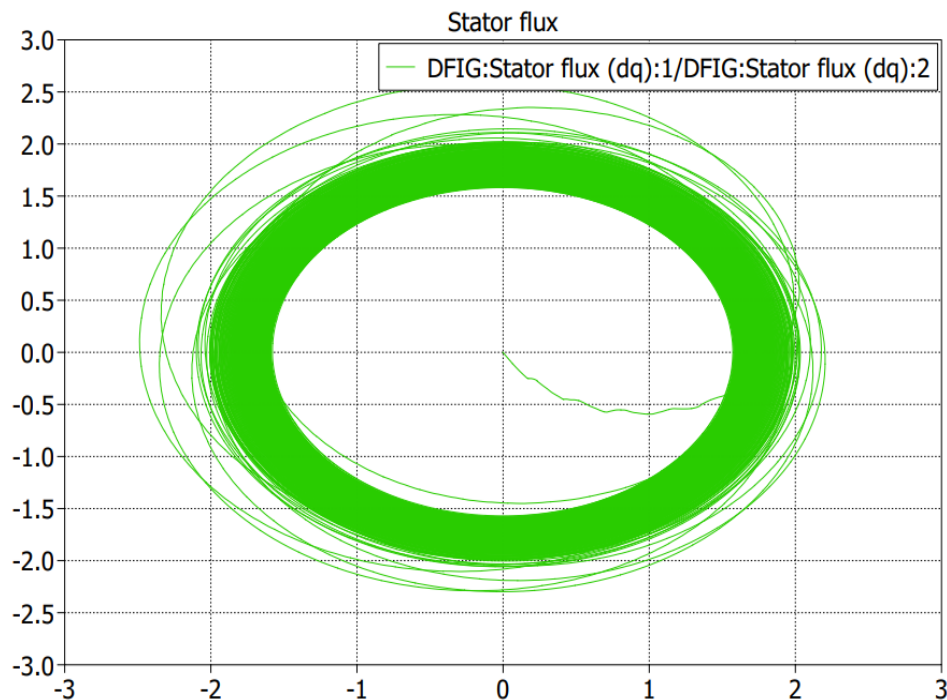


Рисунок 3.15 – Модель зміни магнітного потоку для статора для швидкості вітру 8 м/с

На рис.3.10 та рис.3.15 при швидкості вітру 5 м/с та 8 м/с модель зміни магнітного потоку для статора і вона при таких невеликих швидкостях вітру не змінна.

На рис.3.11 та рис.3.16 при швидкості вітру 5 м/с та 8 м/с також спостерігається піковий час на 4с, після якого відбувається налагодження роботи двигуна, та вихід на заданий режим роботи. Проте як бачимо є пікове зростання температури до 70С, яке в свою чергу у цьому інтервалі приводить до підвищення втрата провідності, комутаційних втрат, а це впливає на час необхідний для встановлення нормального режиму роботи [37, 46-47] ..

Якщо зробити загальний висновок, при швидкості вітру 5 м/с та 8 м/с усі характеристики та отримані параметри по величині досить близькі, але у них є спільне те що спостерігається піковий час в інтервалі від 3с до 4с [37, 46-47].

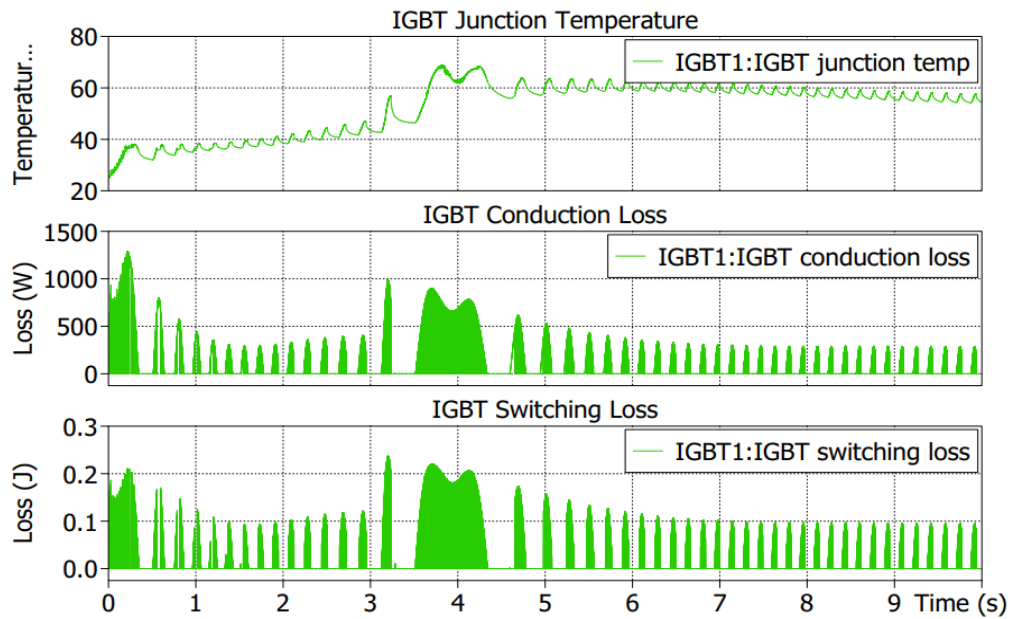


Рисунок 3.16 – Залежність зміни температури, °C, втрата провідності, комутаційні втрати для швидкості вітру 8 м/с

Тому цікаво промоделювати усі отримані залежності для інтервалу швидкості вітру від 11 до 15 м/с, яка забезпечує найкращі показники для експлуатації вітрогенератора. На рис. 3.17-3.21 наведено основні отримані параметри для швидкості вітру 11 м/с, ми їх також порівнюємо з параметрами отриманими для швидкості вітру 15 м/с (рис. 3.22-3.26) [37, 46-47] .

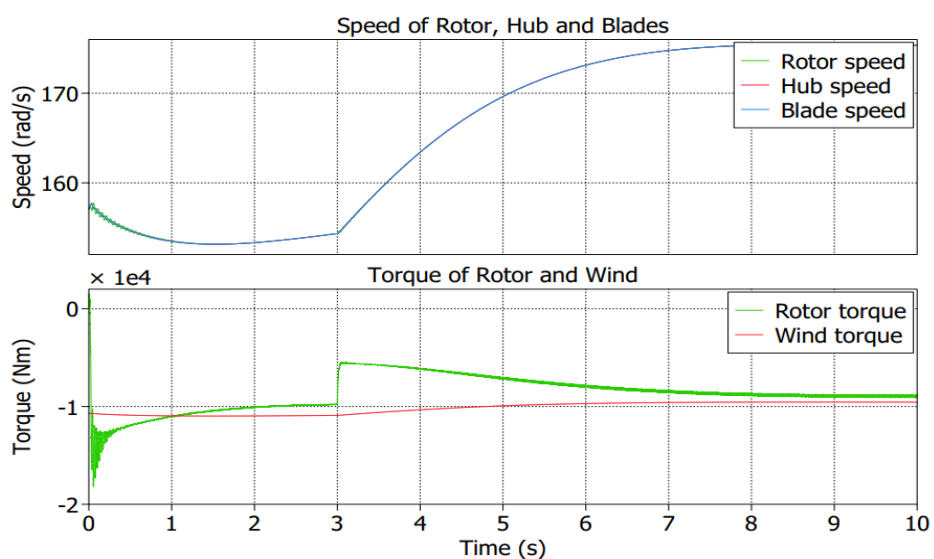


Рисунок 3.17 – Залежність зміни швидкості обертання (лопатеї, втулки та валу) та моменту обертання для валу з часом для 11 м/с

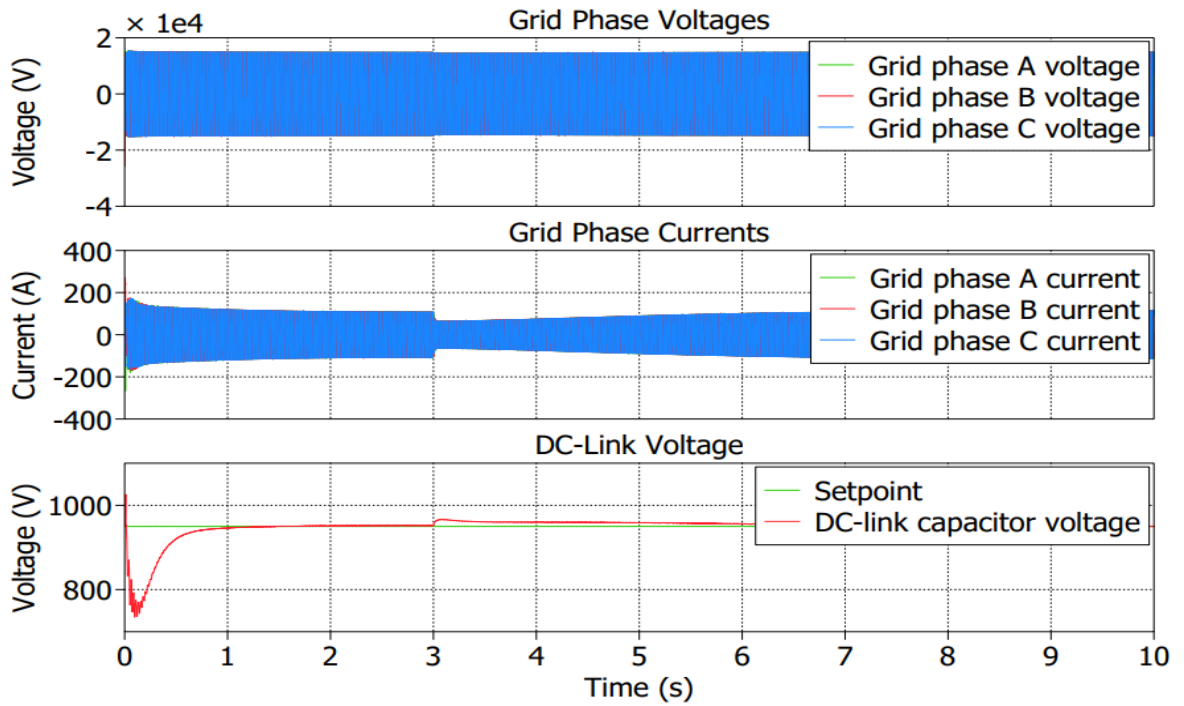


Рисунок 3.18 – Залежність зміни напруги та сили струму в часі для швидкості вітру 11 м/с

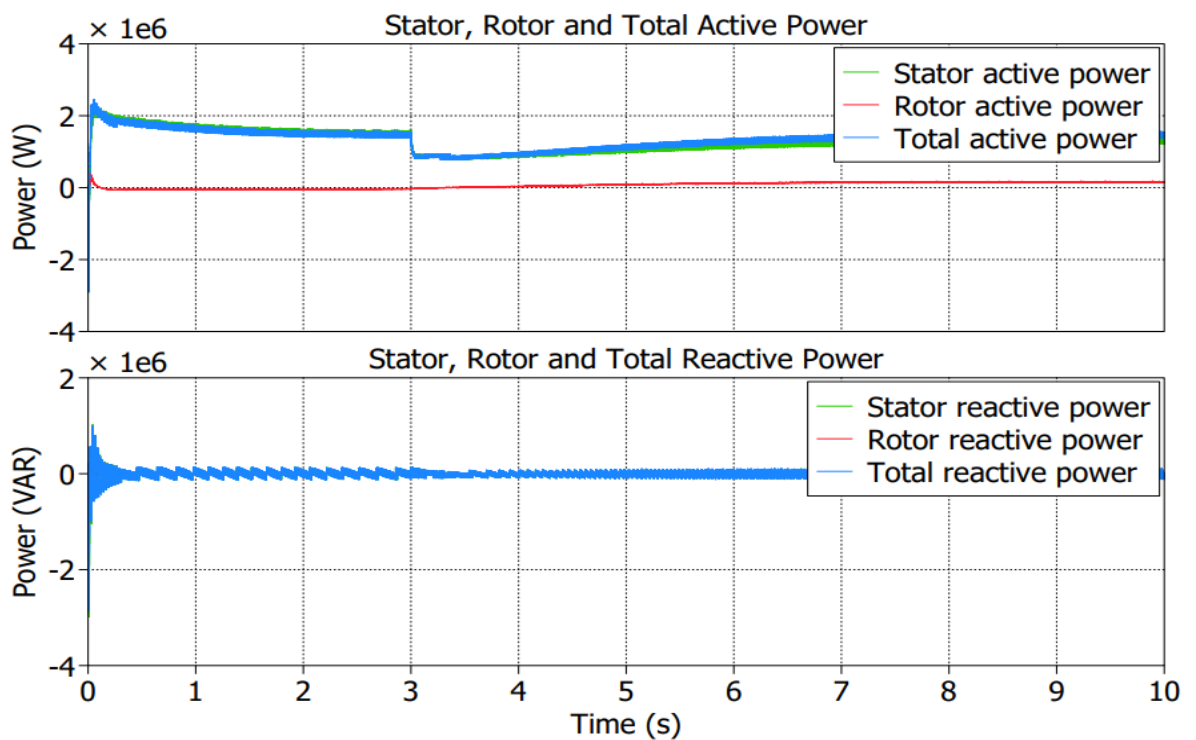


Рисунок 3.19 – Залежність зміни активної, реактивної, повної потужності з часом для статора та ротора для швидкості вітру 11 м/с

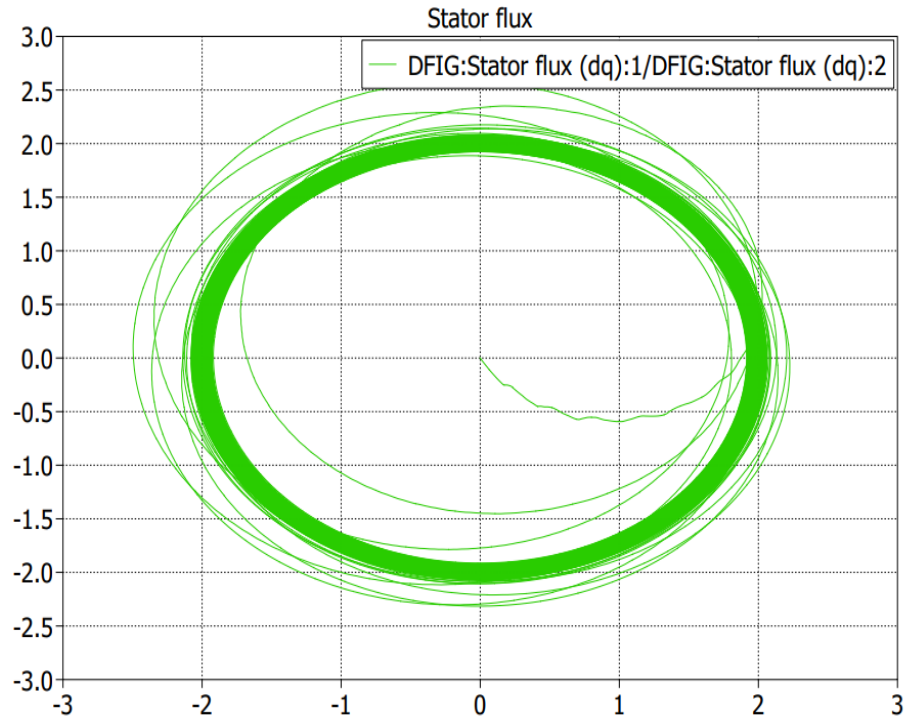


Рисунок 3.20 – Модель зміни магнітного потоку для статора для швидкості вітру 11 м/с

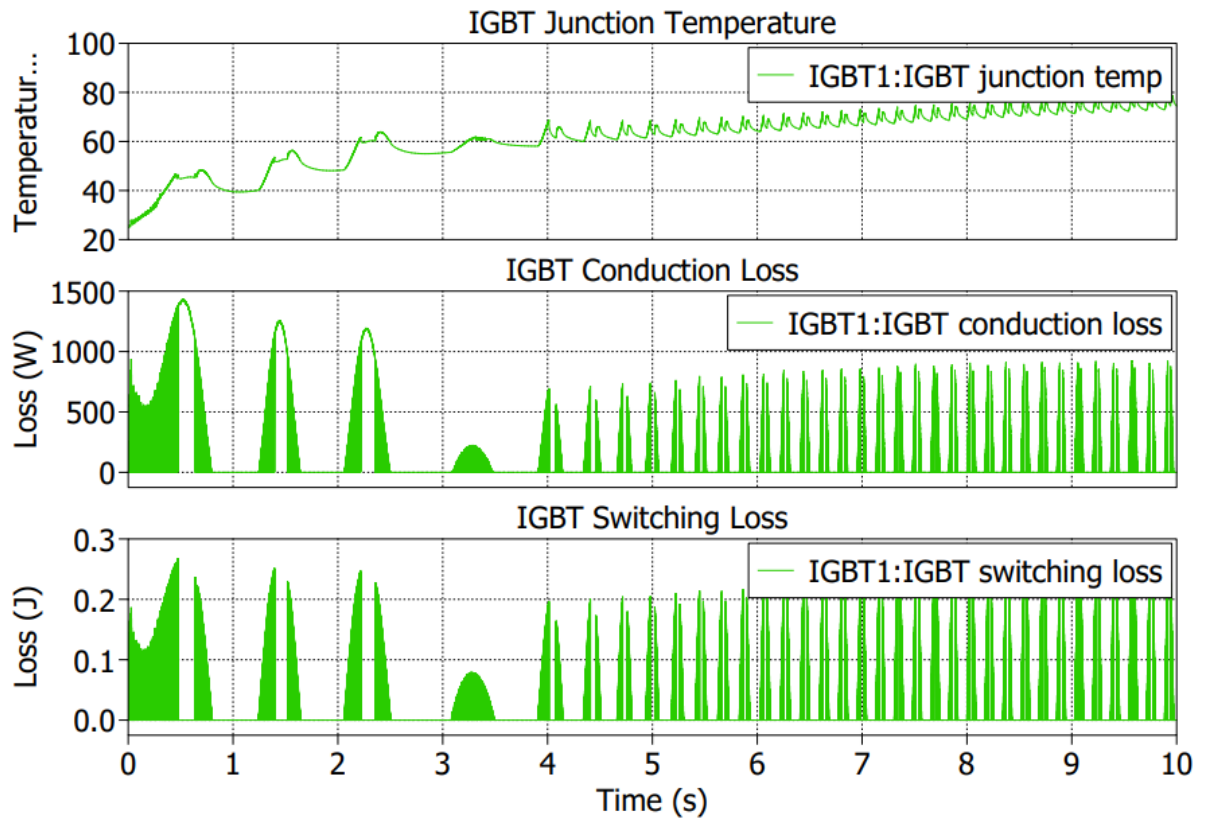


Рисунок 3.21 – Залежність зміни температури, °C, втрата провідності, комутаційні втрати для швидкості вітру 11 м/с

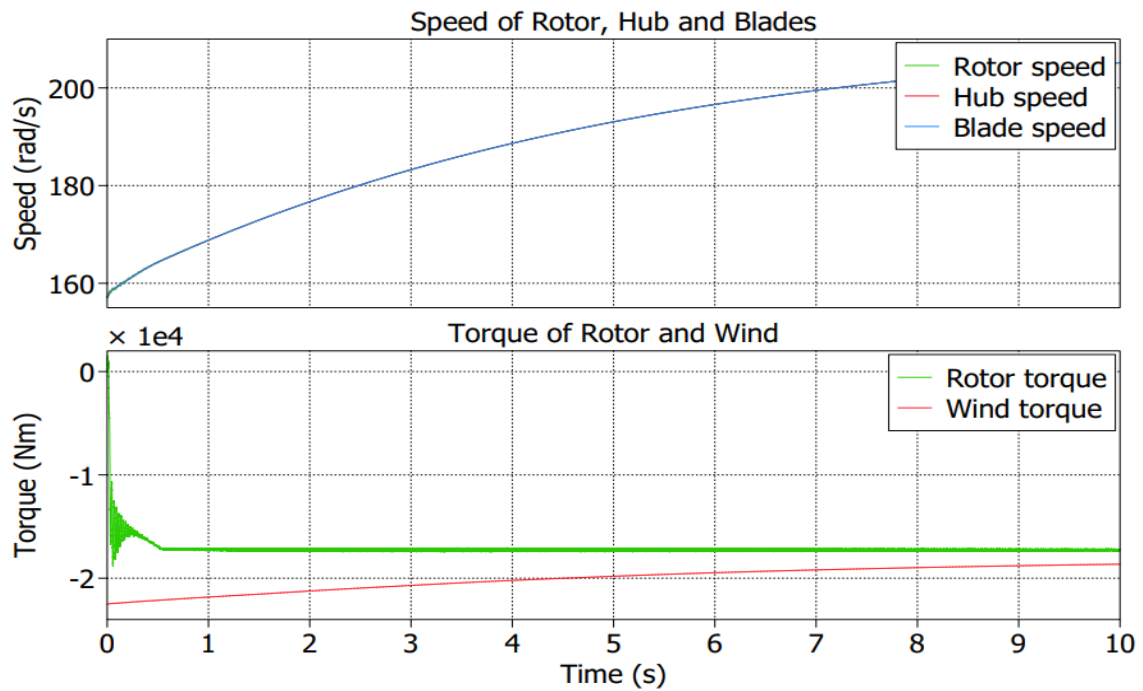


Рисунок 3.22 – Залежність зміни швидкості обертання (лопатеї, втулки та валу) та моменту обертання для валу з часом для 15 м/с

Визначимо характер зміни поведінки швидкості обертання: 1- ротор; 2 – втулки; 3 – лопатей (рис.3.17 та рис. 3.22). На початку моделювання ми спостерігаємо затухаючі коливання внаслідок пружного зв'язку та зв'язку, який пов'язано з втратами енергії на тертя для швидкості вітру 11 м/с, але що цікаво для швидкості вітру 15 м/с ми бачимо що швидкість обертання ротора зростає пропорційно та не спостерігаємо ніякого піка і сповільнення швидкості обертання, навпаки дуже стрімкий вихід на швидкість обертання 200 рад/ с. Момент обертання валу з часом на швидкості 11 м/с на 3 секунді після старту має скачкообразне зростання, тому електричний момент асинхронної машини і крутний момент вітру переходить у збалансований стан обертання, та приблизно на 8 с при швидкості вітру 11 м/с виходить на необхідну швидкість обертання, та залишається 178 рад/с, як і при 8 м/с [37, 46-47].

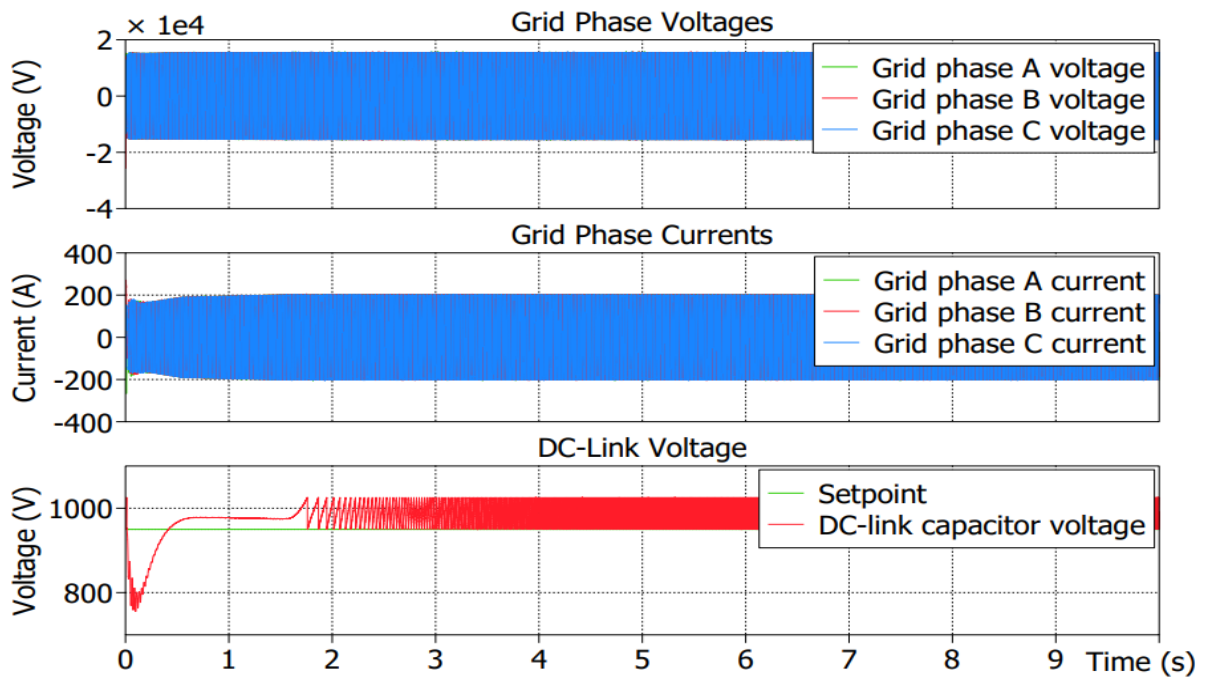


Рисунок 3.23 – Залежність зміни напруги та сили струму в часі для швидкості вітру 15 м/с

Та як бачимо з рис.3.18 та рис.3.23 при швидкості вітру 11 м/с та 15 м/с напруга для А, В, С фаз на всьому інтервалі дослідження є величиною змінною по синусоїдальному закону в межах від 1,8 до -1,8 В. а ось сила струму має цікаву залежність (2) для А, В, С фаз і приблизно через 0,5 с після старту спостерігаємо затухаючі коливання величини сили струму, які далі відновлюються до гармонічних коливань і амплітудне значення сили струму зростають до 200 А і призводить до отримання піку сили струму через 1 с для швидкості вітру 15 м/с. А ось для 11 м/с ми спостерігаємо, що напруга для А, В, С фаз на всьому інтервалі дослідження є величиною змінною по синусоїдальному закону в межах від 1,8 до -1,8 В. А ось сила струму має цікаву залежність (2) для А, В, С фаз і приблизно через 3 с після старту спостерігаємо затухаючі коливання величини сили струму, які далі відновлюються і амплітудне значення сили струму зростає і призводить до отримання піку сили струму на 6-7 секунді після запуску вітрогенератора, але до величини меншою за ту що була на 3 с [37, 46-47].

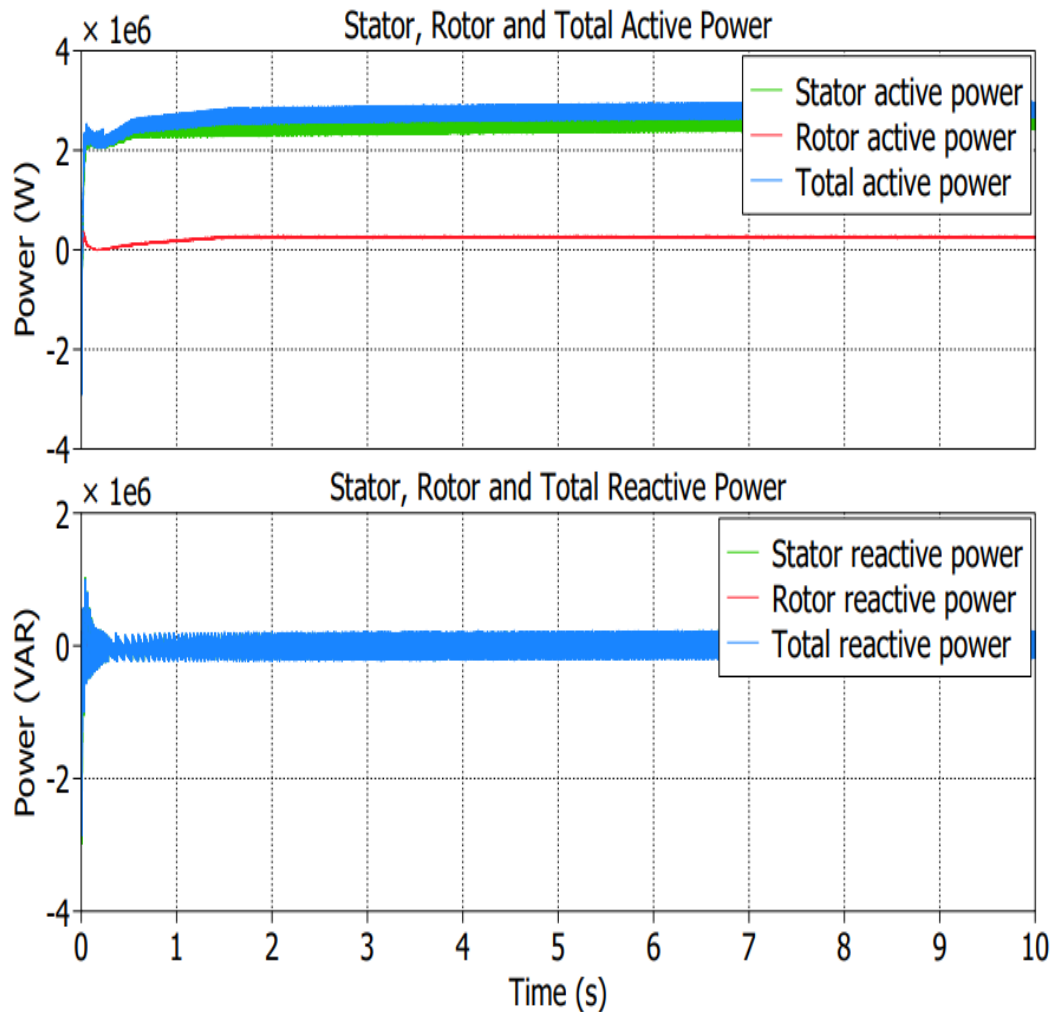


Рисунок 3.24 – Залежність зміни активної, реактивної, повної потужності з часом для статора та ротора для швидкості вітру 15 м/с

На рис.3.19 та рис.3.24 при швидкості вітру 11 м/с також спостерігається піковий час в 3 с. як і при швидкостях 5-8 м/с, після якого відбувається налагодження роботи двигуна, та вихід на заданий режим роботи. Активна потужність являє собою корисну потужність, та визначається кількістю енергії, реально використовуваної при роботі електроустаткування, тобто енергії, що знімається з валу двигуна для обертання механізму. Але в цей же час спостерігається коливання майже 10% реальної потужності в результаті процесу ковзання, яке передається з обмотки ротора. Проте при 15 м/с вже на 1 секунді відбувається стійке зростання активної потужності до величини $2,5 \cdot 10^6$ Вт, в порівнянні з 11 м/с, яка ще на 7 с складає $1,7 \cdot 10^6$ Вт і є стабільною [37, 46-47].

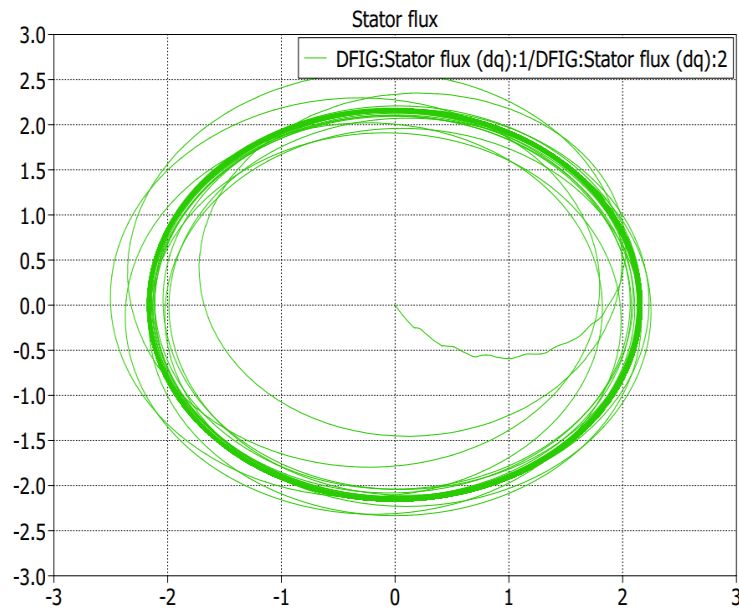


Рисунок 3.25 – Модель зміни магнітного потоку для статора для швидкості вітру 15 м/с

На рис.3.20 та рис.2.15 при швидкості вітру 11 м/с та 15 м/с величина радіусу внутрішнього діаметра магнітного потоку зростає від 1,7 до майже до 2.

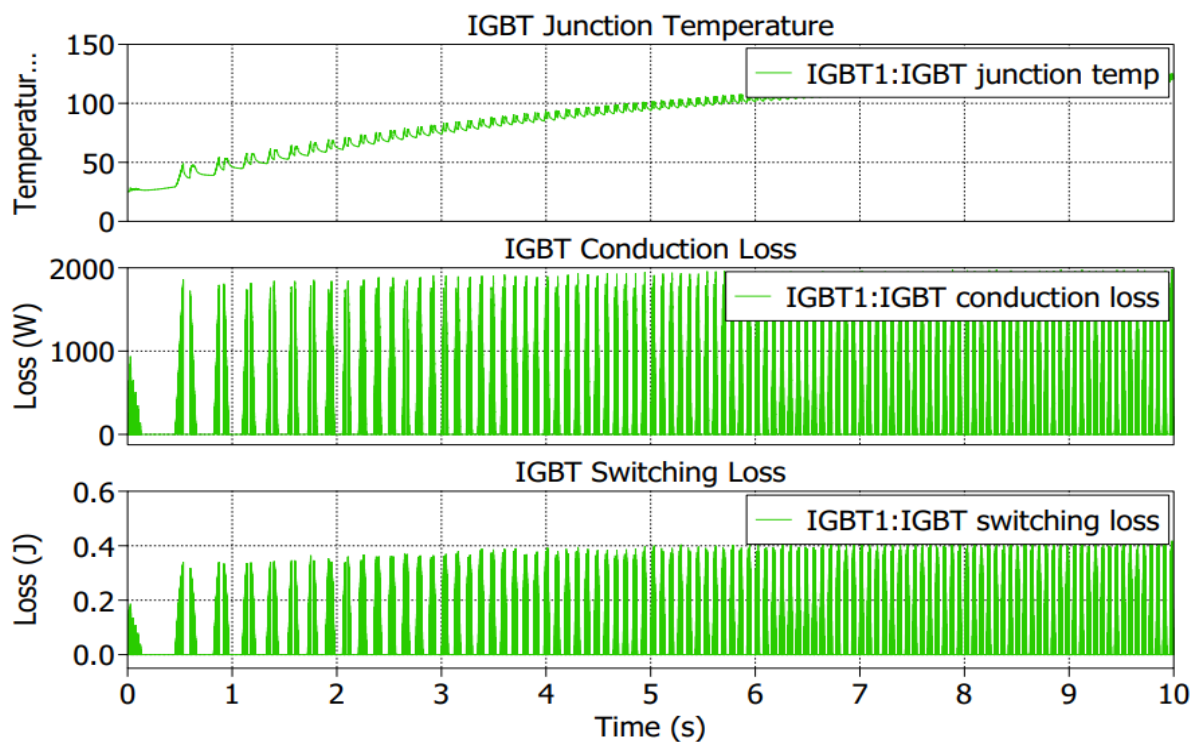


Рисунок 3.26 – Залежність зміни температури (°C), втрата провідності, комутаційні втрати для швидкості вітру 15 м/с

На рис.3.21 при швидкості вітру 11 м/с також спостерігається піковий час на 3-4 с, після якого відбувається налагодження роботи двигуна, та вихід на заданий режим роботи. Проте як бачимо є пікове зростання температури до 80°C, яке в свою чергу у цьому інтервалі приводить до підвищення витрати провідності, комутаційних витрат, а це впливає на час необхідний для встановлення нормального режиму роботи. На рис.3.26 при швидкості вітру 15 м/с спостерігаємо підвищення температури вище 100°C, вже на 7 с після запуску. Та значення підвищення витрат майже до 2000Вт, та комутаційних витрат до 0,4 м/с. вже після 7 с від моменту запуску і ці величини є сталими [37, 46-47] .

3.4 Дослідження режиму запуску вітрогенератора та фіксованої швидкості

Вітрогенератор може працювати в різних режимах, залежно від швидкості вітру, наявності електричного навантаження та інших факторів.

Тому при досягненні певної мінімальної швидкості вітру починається початковий запуск. У цьому режимі вітрогенератор активується, починає обертатися та генерувати електроенергію. Цей режим зазвичай характеризується низькою продуктивністю.

Для даної моделі вітрогенератора VT-3, ця швидкість дорівнює 0,9 м/с, отримані за допомогою моделювання дані представимо на рис. 3.27- рис. 3.31.

Визначимо характер зміни поведінки швидкості обертання: 1- ротор; 2 – втулки; 3 – лопатей (рис.3.27). На початку моделювання ми спостерігаємо що для швидкості вітру 0,9 м/с швидкість обертання лопатей зменшується нижче 140 рад/с , а потім з 1,5 с зростає до 170 рад/с зростає пропорційно та не спостерігаємо ніякого піка і сповільнення швидкості обертання. Момент обертання валу з часом на швидкості 0,9 м/с на 3 секунді після старту має скачкообразне зростання, тому електричний момент ротора і крутний момент

вітру переходить у збалансований стан обертання приблизно на 8 с [37, 46-47].

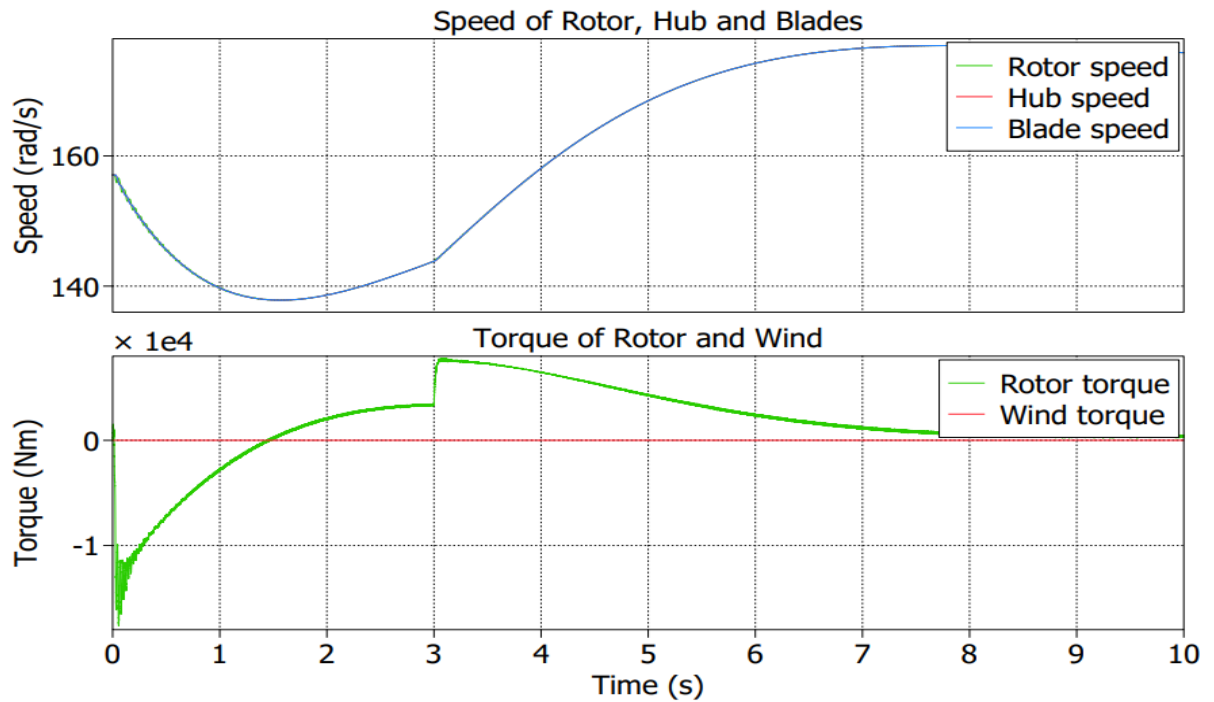


Рисунок 3.27 – Залежність зміни швидкості обертання (лопатеї, втулки, валу) (1) та крутний момент ротора і вітру з часом (2)

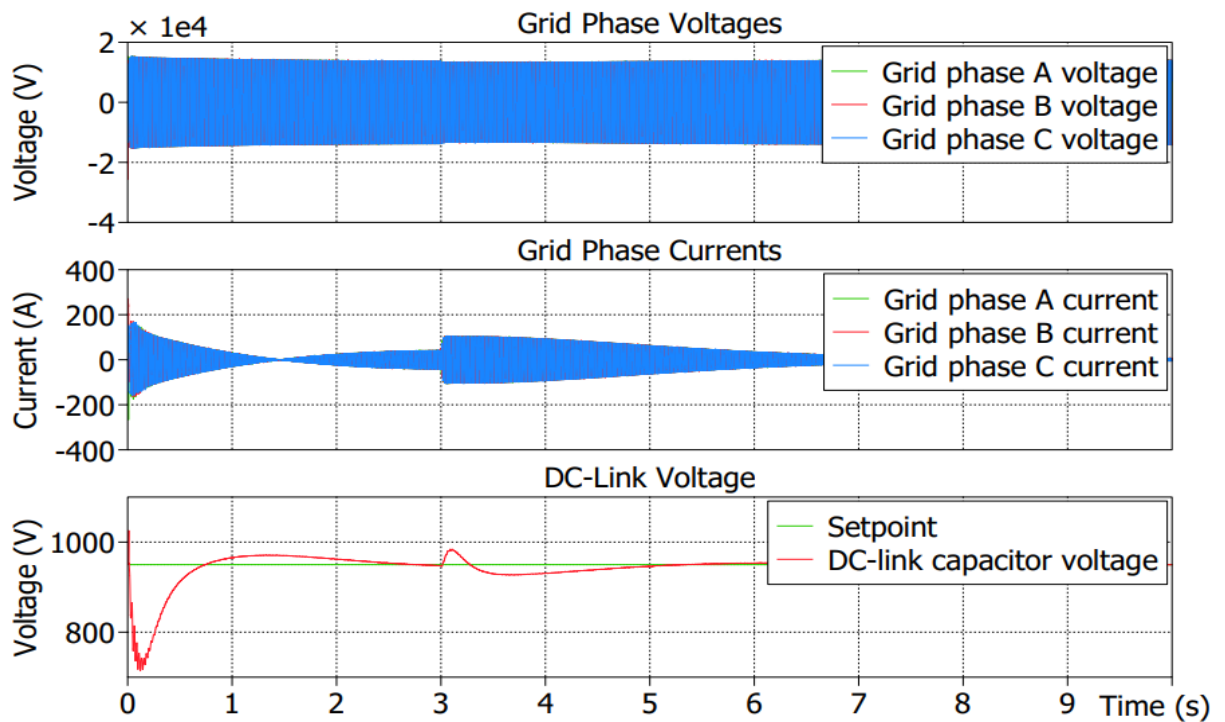


Рисунок 3.28 – Залежність зміни напруги та сили струму в часі

Та як бачимо з рис.3.28 напруга для А, В, С фаз на всьому інтервалі дослідження є величиною змінною по синусоїдальному закону в межах від 1,8 до -1,8 В. а ось сила струму має цікаву залежність (2) для А, В, С фаз і приблизно через 1,5 с після старту спостерігаємо затухаючі коливання величини сили струму, які далі відновлюються до гармонічних коливань і амплітудне значення сили струму зростає до 150 А і призводить до отримання піку сили струму через 3 с [37, 46-47] .

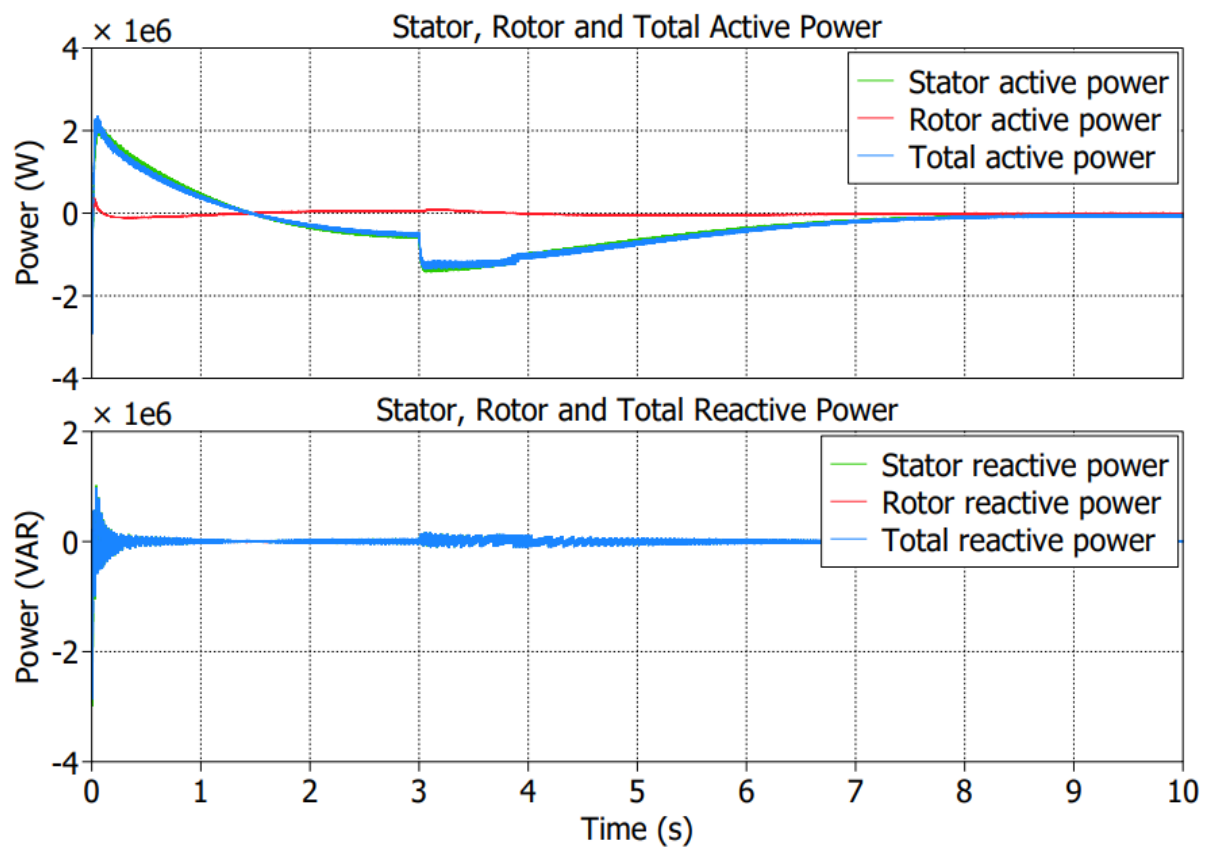


Рисунок 3.29 – Залежність зміни активної, реактивної, повної потужності з часом для статора та ротора

На рис.3.29 при швидкості вітру 0,9 м/с також спостерігається піковий час в 3 с, після якого відбувається налагодження роботи вітрогенератору, та вихід на заданий режим роботи [46-47] .

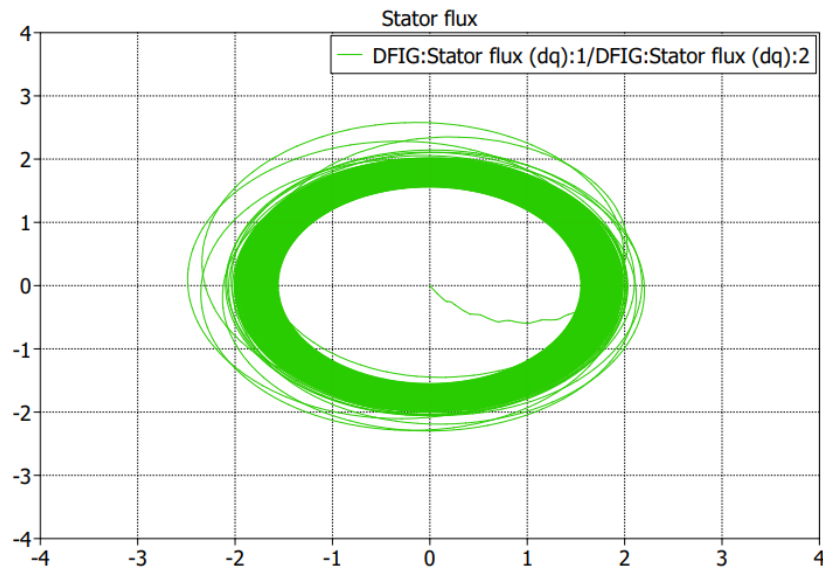


Рисунок 3.30 – Модель зміни магнітного потоку для статора

На рис.3.30 величина радіусу внутрішнього діаметра магнітного потоку має величину 1,5.

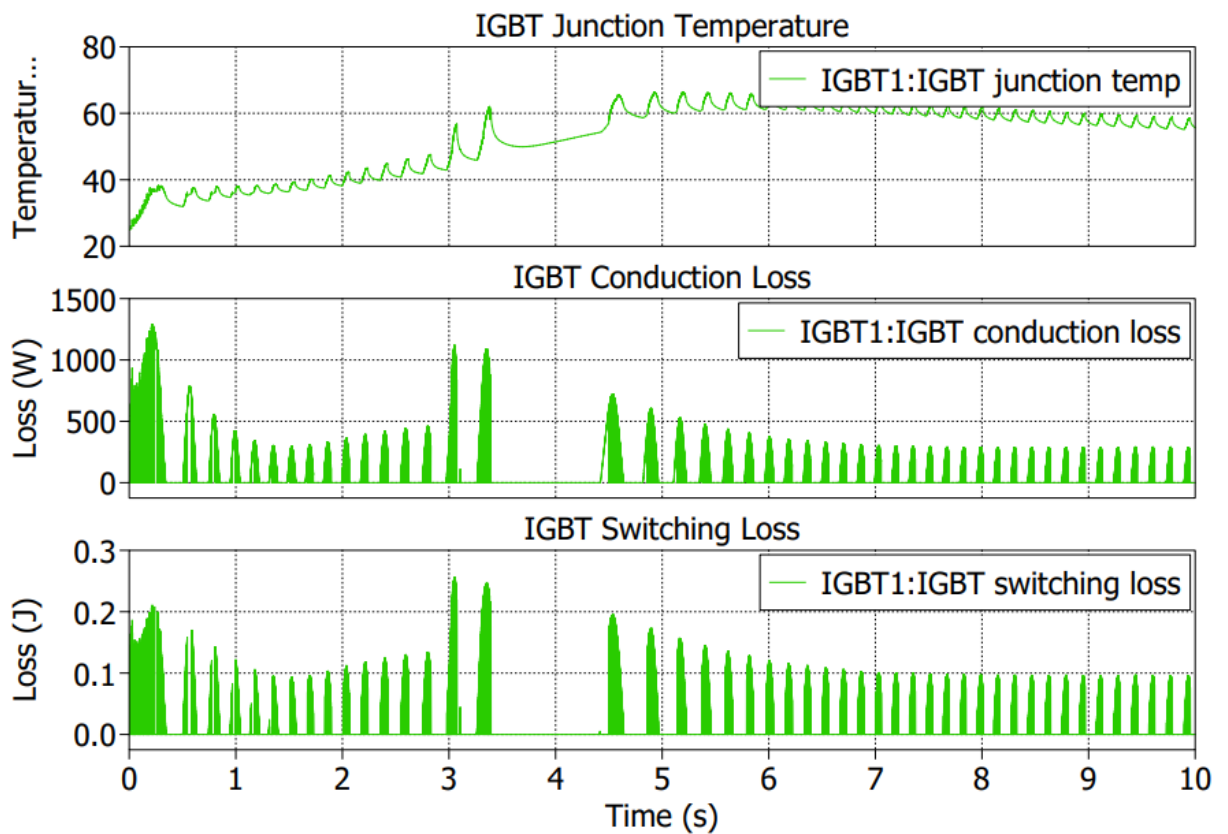


Рисунок 3.31 – Залежність зміни температури ,°C, втрата провідності, комутаційні втрати для швидкості вітру 0,9 м/с

На рис.3.31 при швидкості вітру 11 м/с також спостерігається піковий час на 3,5-4,5 с, після якого відбувається налагодження роботи двигуна, та вихід на заданий режим роботи. Проте як бачимо є пікове зростання температури до 70°C на 6с, яке в свою чергу у цьому інтервалі приводить до підвищення втрата провідності, комутаційних втрат, а це впливає на час необхідний для встановлення нормального режиму роботи.

Далі розглянемо режим фіксованої швидкості для нашого вітрогенератора це 2,5м/с : У цьому режимі вітрогенератор працює на постійній швидкості обертання ротора. Зазвичай, цей режим менш ефективний, ніж режим змінної швидкості, але все ще може бути використаний для стійкого заряджання акумулятору. Отримані залежності представлено на рис.3.32 -рис.3.36.

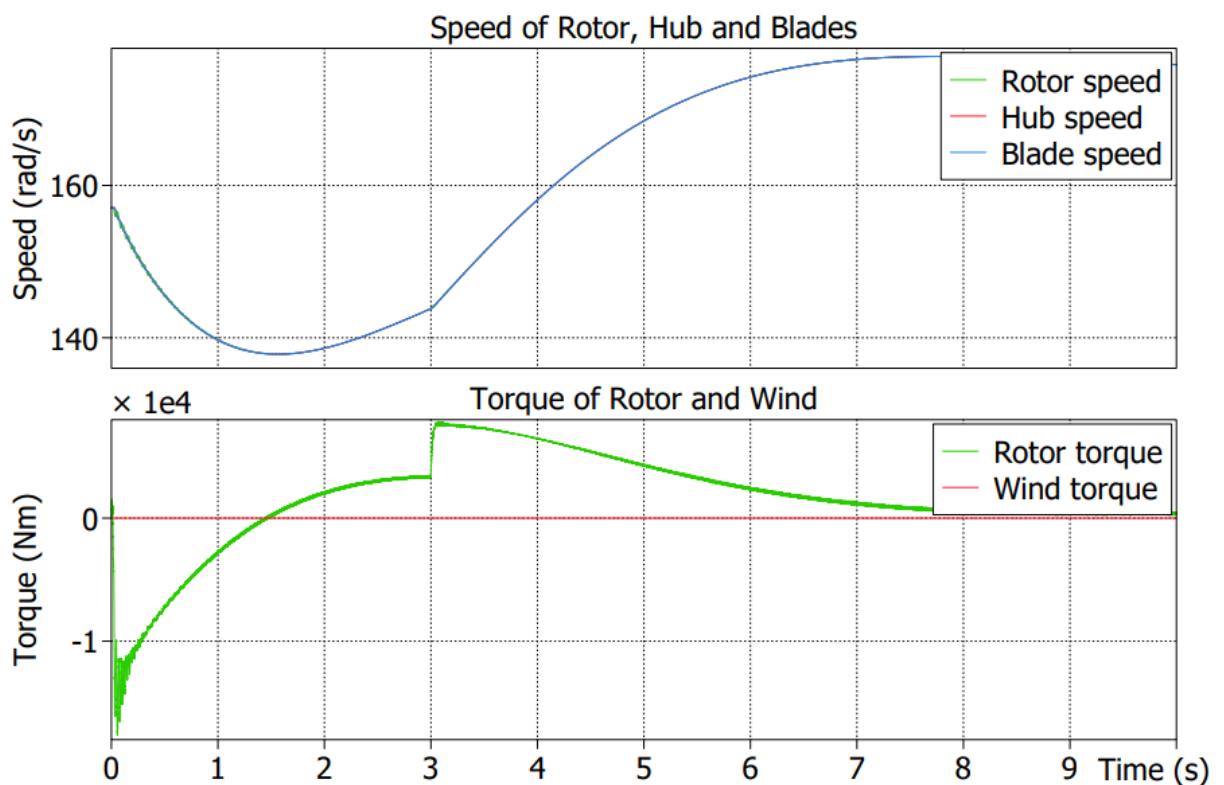


Рисунок 3.32 – Залежність зміни швидкості обертання (лопатей, втулки, валу) та крутний момент ротора і вітру з часом для швидкості вітру 2,5 м/с

Визначимо характер зміни поведінки швидкості обертання: 1- ротор; 2 – втулки; 3 – лопатей (рис.3.32). На початку моделювання ми спостерігаємо що для швидкості вітру 2,5 м/с швидкість обертання лопатей зменшується нижче 140 рад/с , а потім з 1,7 с зростає до 180 рад/с зростає пропорційно за 8с. Момент обертання валу з часом на швидкості 2,5 м/с на 3 секунді після старту має скачкообразне зростання з 0,5 до 1Нм, тому електричний момент ротора і крутний момент вітру переходить у збалансований стан обертання приблизно на 8 с [37, 46-47].

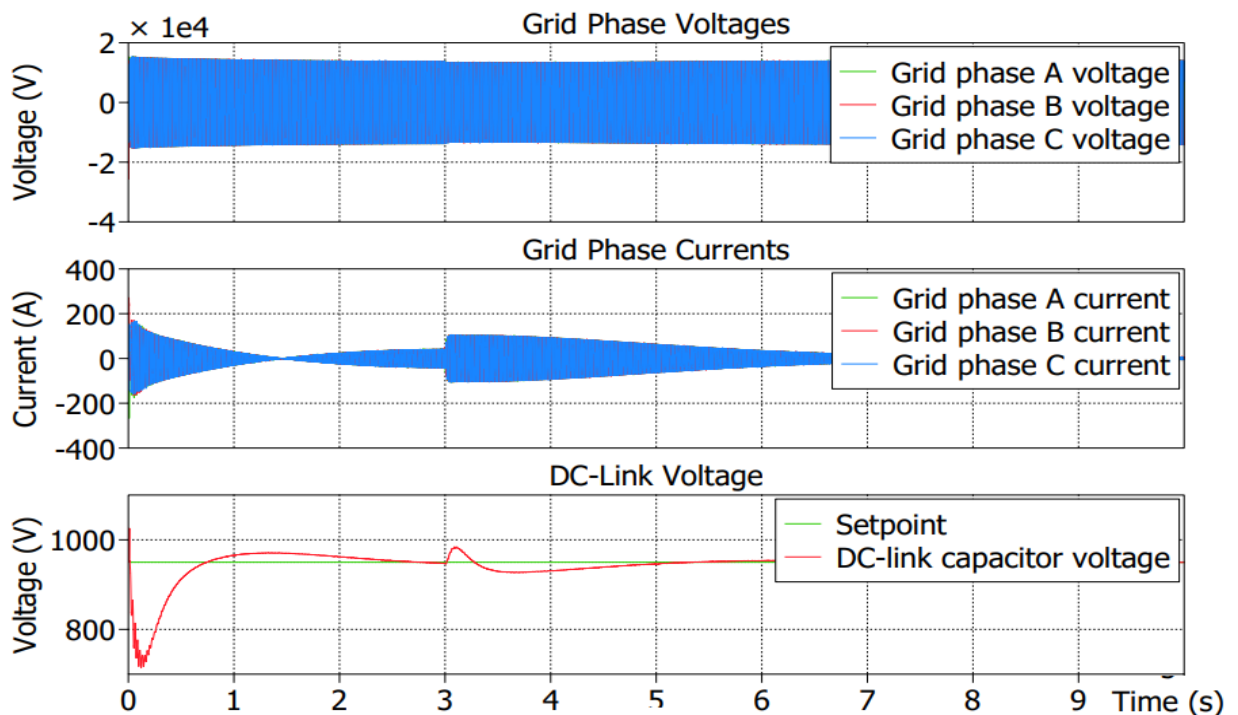


Рисунок 3.33 – Залежність зміни напруги та сили струму в часі для швидкості вітру 2,5 м/с

Та як бачимо з рис.3.28 напруга для А, В, С фаз на всьому інтервалі дослідження є величиною змінною по синусоїдальному закону в межах від 1,8 до -1,8 В, а ось сила струму має цікаву залежність (2) для А, В, С фаз і приблизно через 1,5 с після старту спостерігаємо затухаючі коливання величини сили струму, які далі відновлюються до гармонічних коливань і амплітудне значення сили струму зростає до 150 А і призводить до отримання піку сили струму через 3 с [37, 46-47] .

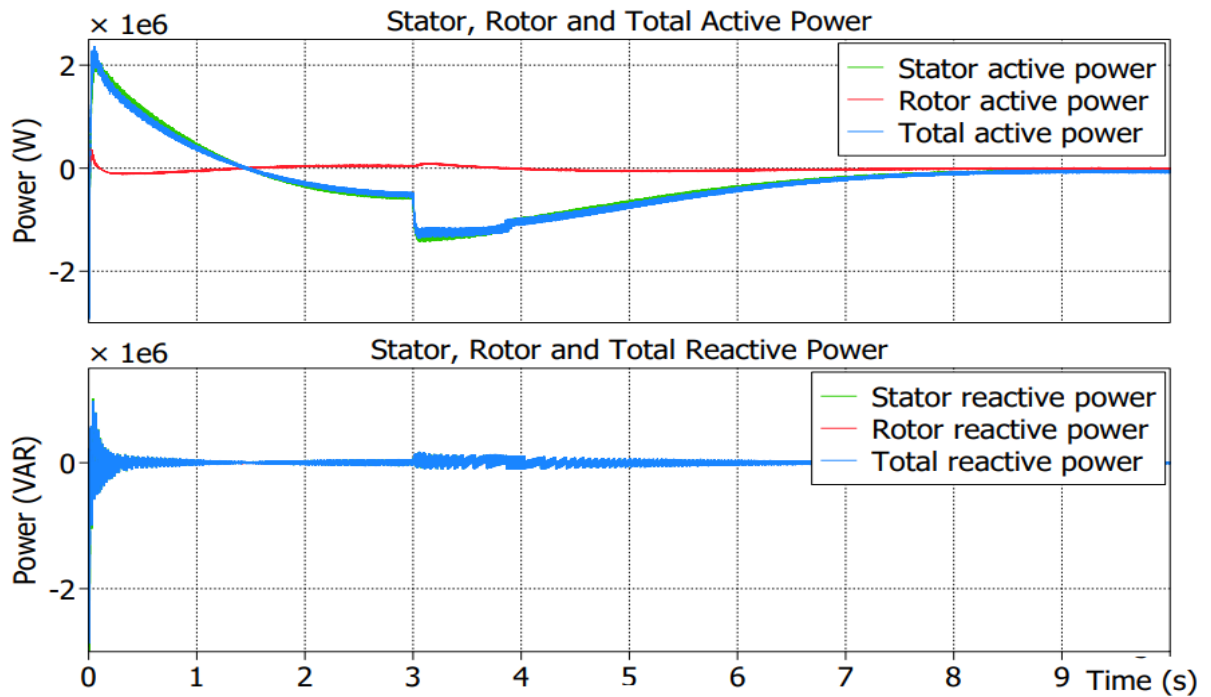


Рисунок 3.34 – Залежність зміни активної, реактивної, повної потужності з часом для статора та ротора для швидкості вітру 2,5 м/с

На рис.3.34 при швидкості вітру 2,5 м/с також спостерігається піковий час в 3 с, після якого відбувається налагодження роботи вітрогенератору, та вихід на заданий режим роботи [46-47] .

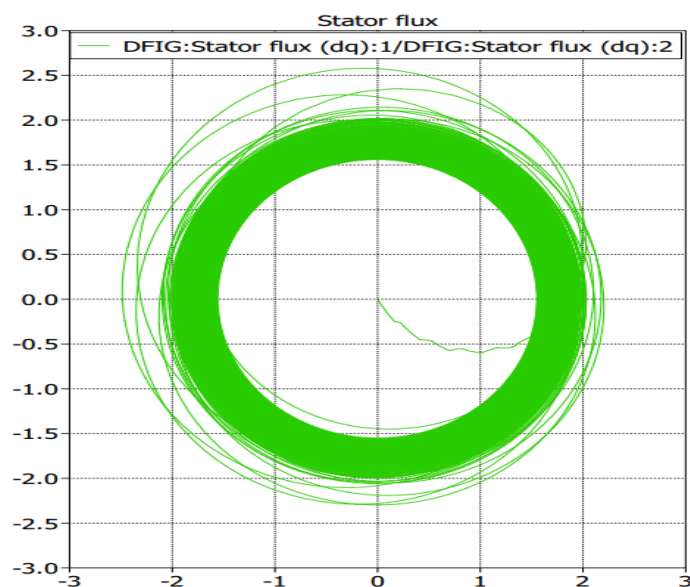


Рисунок 3.35 – Модель зміни магнітного потоку для статора

На рис.3.31 величина радіусу внутрішнього діаметра магнітного потоку має величину 1,6 і як бачимо зростає в порівнянні з пуском.

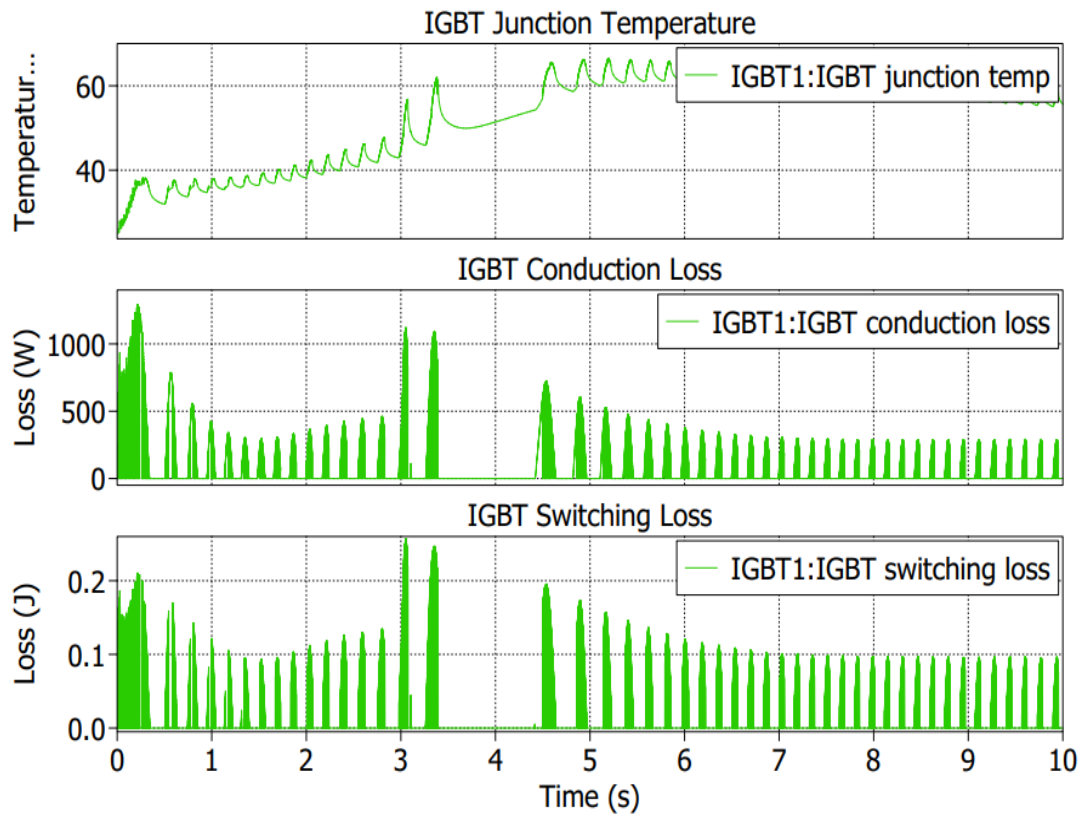


Рисунок 3.36 – Залежність зміни температури, °C, втрата провідності, комутаційні втрати для швидкості вітру 2,5 м/с.

На рис.3.36 при швидкості вітру 2,5 м/с також спостерігається піковий час на 3,5-4,5 с, після якого відбувається налагодження роботи двигуна, та вихід на заданий режим роботи. Проте як бачимо є пікове зростання температури до 67°C на 4,5 с, яке в свою чергу у цьому інтервалі приводить до підвищення втрата провідності, комутаційних втрат, а це впливає на час необхідний для встановлення нормального режиму роботи.

3.5 Моделювання за допомогою MATLAB SIMULINK роботи енергосистеми з отриманою енергією

Вибір та використання конкретного режиму роботи вітрогенератора залежить від ряду факторів, так ефективно використання вітроенергії:

дозволяє оптимізувати використання вітроенергії відповідно до потреб енергосистеми та забезпечити стабільне електропостачання.

Таким чином, після отримання за допомогою вітрогенератора електричної енергії, її або зберігають в батареї, або направляють до споживачів, тому змодельуємо один з режимів роботи вітрогенератора, коли отримана енергія відразу поступає до споживачів за допомогою електромережі. Середовище Simulink, дозволяє створювати моделі енергосистем. У даній роботі воно буде також застосовано (рис 3.37).

Пропонується розглянути системи у наступному випадку

1. Режим навантаження $0.25 S_{ном}$
2. Режим навантаження $0.5 S_{ном}$
3. Режим навантаження $1.0 S_{ном}$

Починаємо з активного навантаження. На рис. 3.38 – рис.3.41 представлено графік напруги та струму навантаження для сторони вищої та нижчої напруги, при цьому навантаження складає 0.25 від номінального (40 KBT).

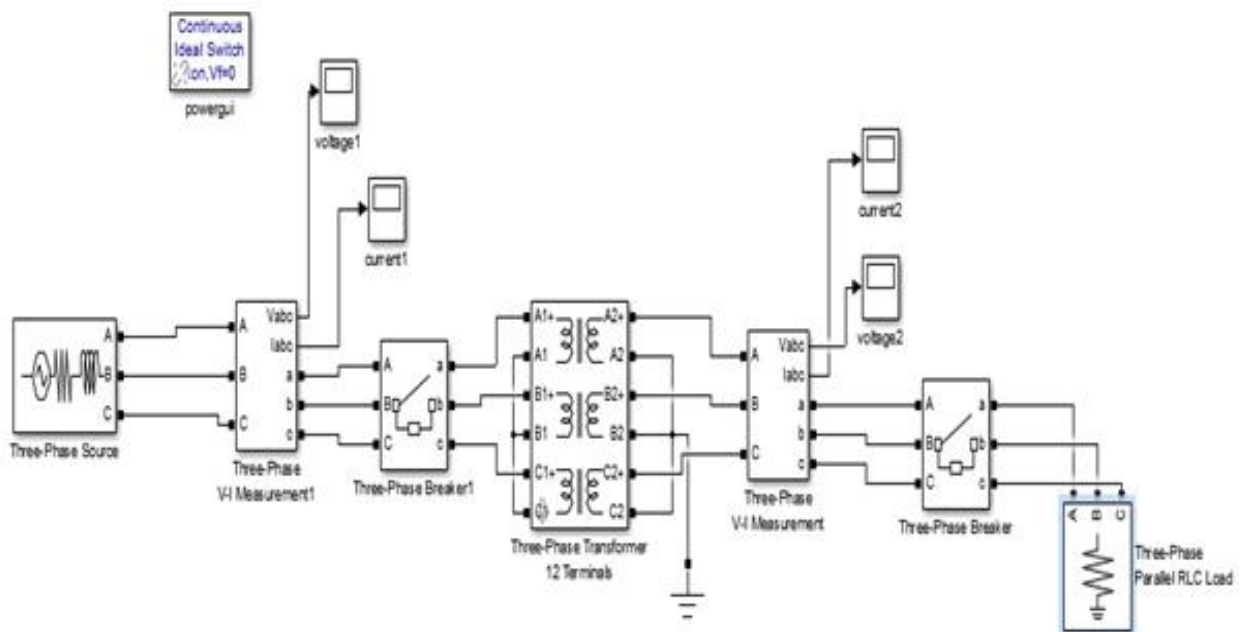


Рисунок 3.37 – Загальний вигляд системи, побудованої в Simulink, в режимі активного навантаження

Як вже було сказано, струм та напруга відображаються у амплітудному значенні, тому :

$$U_1 = 8460 \div 1,41 = 6000 \text{ В}$$

$$I_1 = 5.452 \div 1,41 = 3,86 \text{ А}$$

$$U_2 = 562 \div 1,41 = 399.072 \text{ В}$$

$$I_2 = 81.78 \div 1,41 = 58 \text{ А}$$

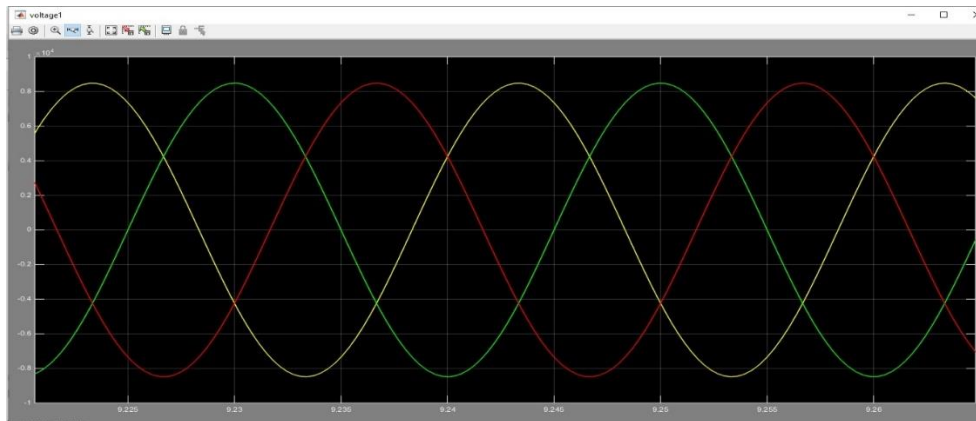


Рисунок 3.38 – Графік напруги на стороні ВН при навантаженні 0.25 від номінального (40 кВт)



Рисунок 3.39 – Графік струму на стороні ВН при навантаженні 0.25 від номінального (40 кВт)

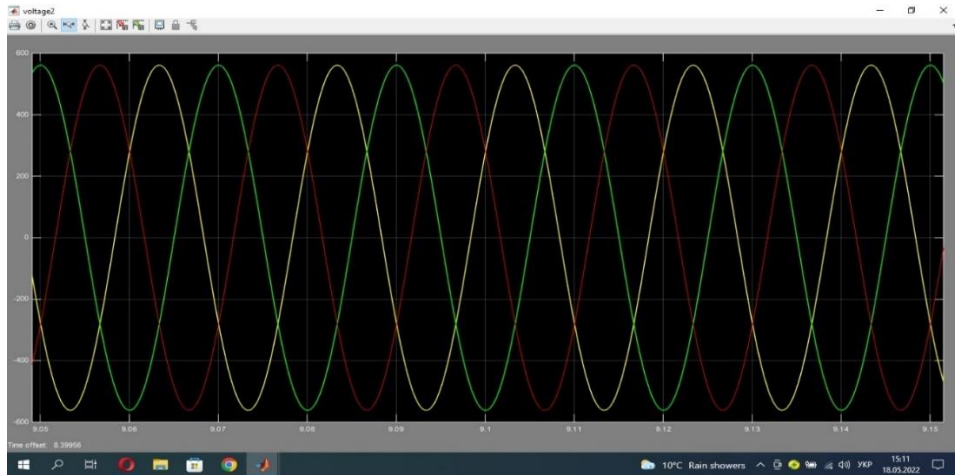


Рисунок 3.40 – Графік напруги по НН при навантаженні 0.25 від номінального

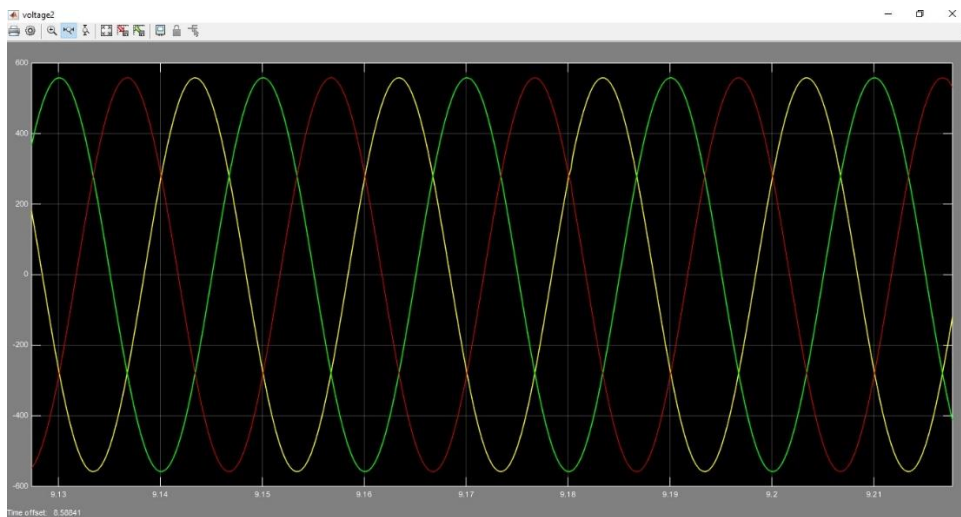


Рисунок 3.41 – Графік струму навантаження по НН при навантаженні 0.25 від номінального (40 КВт)

На рис.3.42 – рис.3.45 представлено графіки напруги та струму навантаження для сторони вищої та нижчої напруги, при цьому навантаження складає 0.5 від номінального (80 КВт).

Перехід від амплітудного до середньоквадратичного значення:

$$U_1 = 8460 \div 1,41 = 6000 \text{ В}$$

$$I_1 = 10,9 \div 1,41 = 7,73 \text{ А}$$

$$U_2 = 561,3 \div 1,41 = 398,144 \text{ В}$$

$$I_2 = 163,56 \div 1,41 = 116 \text{ А}$$

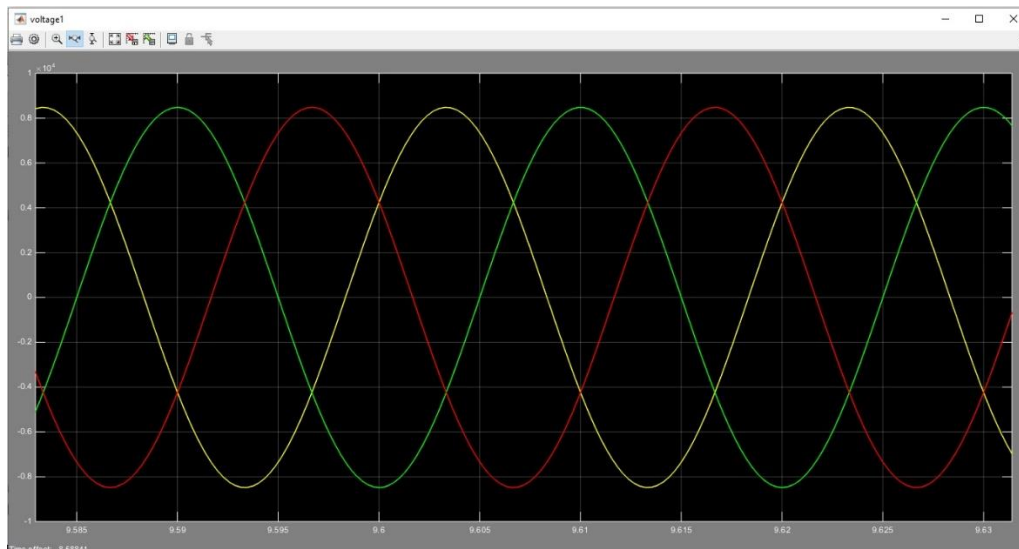


Рисунок 3.42 – Графік напруги на стороні ВН при навантаженні 0.5 від номінального (80 кВт)

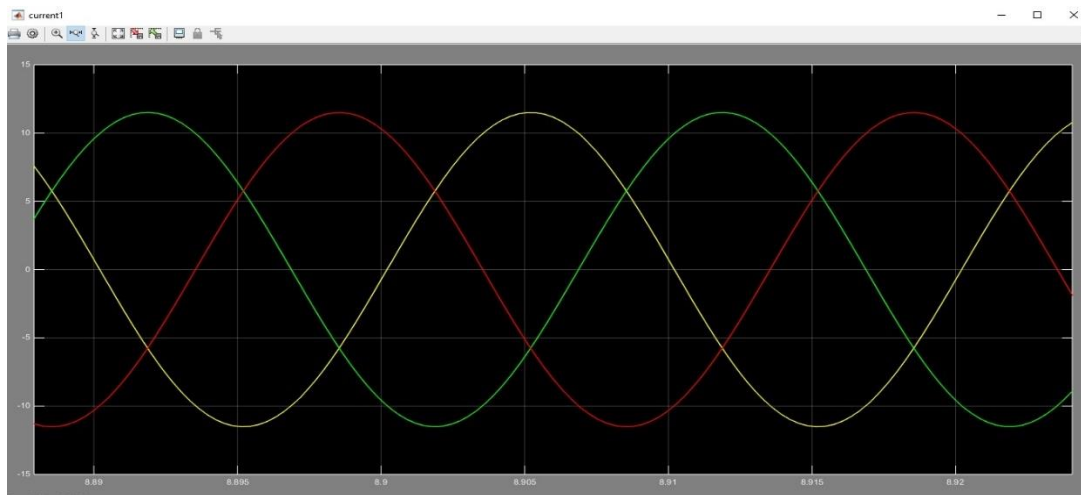


Рисунок 3.43 – Графік струму на стороні ВН при навантаженні 0.5 від номінального (80 кВт)

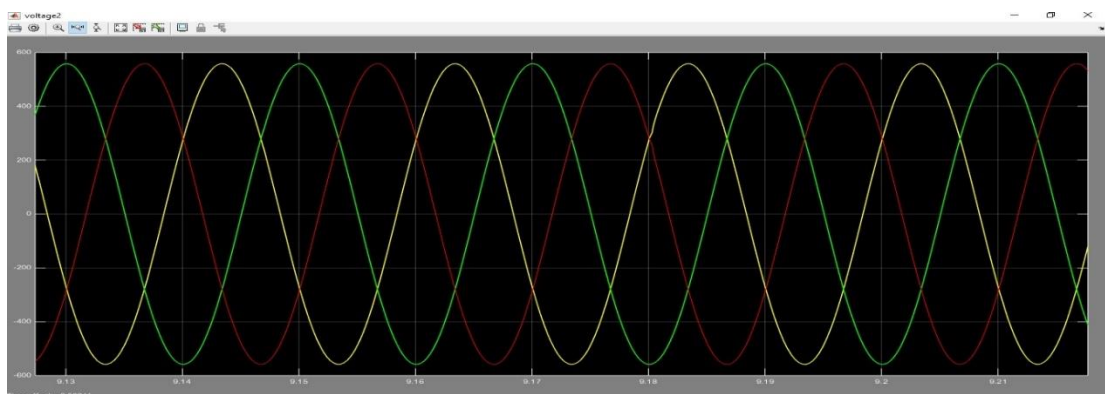


Рисунок 3.44 – Графік напруги на стороні НН при навантаженні 0.5 від номінального (80 кВт)

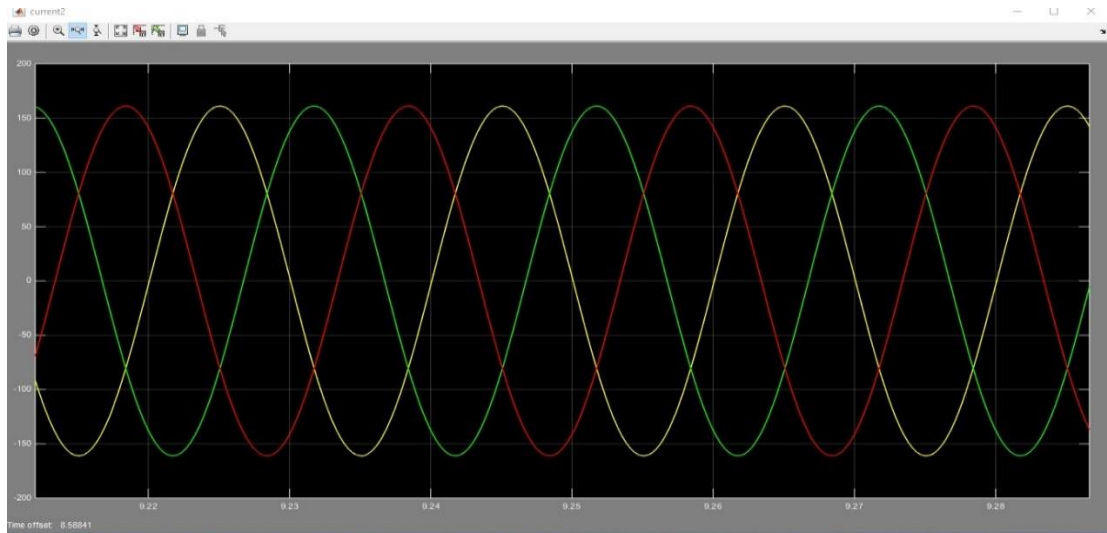


Рисунок 3.45 – Графік струму на стороні НН при навантаженні 0.5 від номінального (80 кВт)

На рис.3.46 – 3.49 представлено графіки напруги та струму навантаження для сторони вищої та нижчої напруги, при цьому навантаження складає 1.0 від номінального (160 кВт)

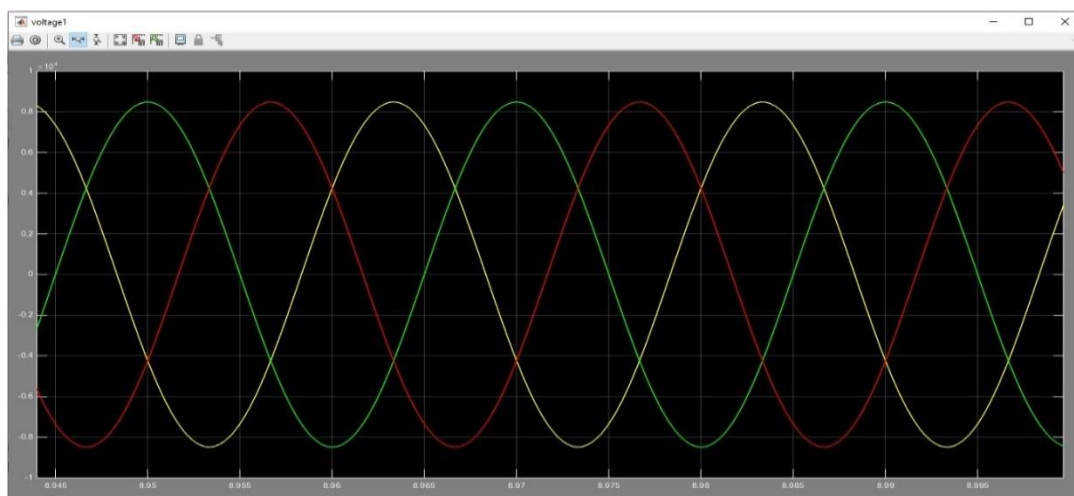


Рисунок 3.46 – Графік напруги на стороні вищої напруги при навантаженні 1.0 від номінального (160 кВт)

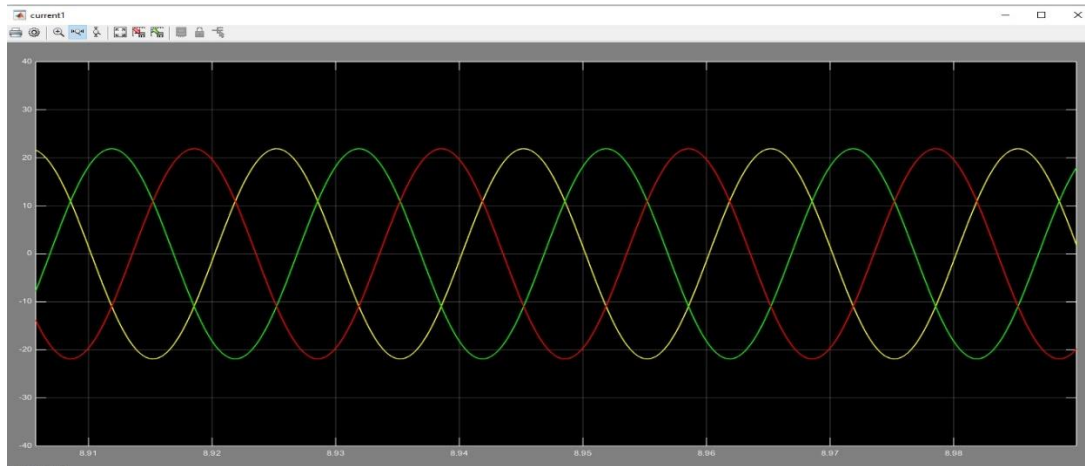


Рисунок 3.47 – Графік струму навантаження на стороні вищої напруги при навантаженні 1.0 від номінального (160 кВт)

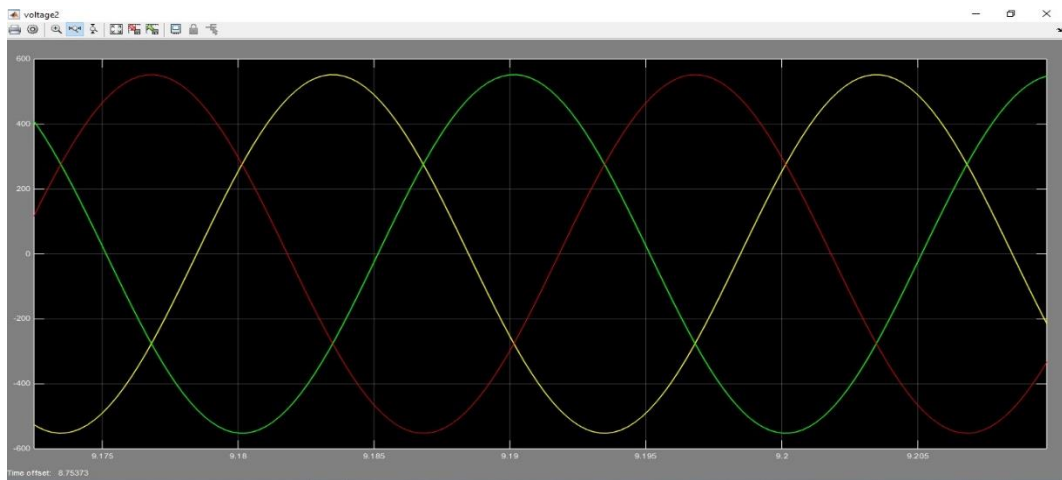


Рисунок 3.48 – Графік напруги на стороні нижчої напруги при навантаженні 1.0 від номінального (160 кВт)

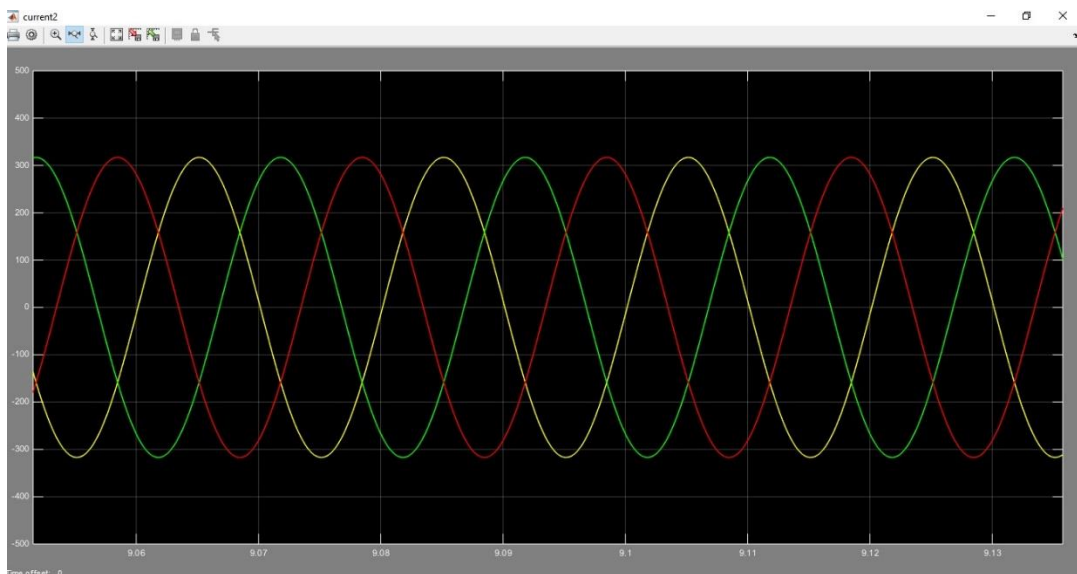


Рисунок 3.49 – Графік струму навантаження на стороні нижчої напруги при навантаженні 1.0 від номінального (160 кВт)

Переводимо з амплітудного в середньоквадратичне значення

$$U_1 = 8460 \div 1,41 = 6000 \text{ В}$$

$$I_1 = 21.8 \div 1,41 = 15.46 \text{ А}$$

$$U_2 = 560.0 \div 1,41 = 396.288 \text{ В}$$

$$I_2 = 327 \div 1,41 = 232 \text{ А}$$

3.6 Висновки до розділу

В результаті аналізу отриманих шляхом імітаційного моделювання графічних залежностей швидкості обертання турбіни DFIG-генератора, обертового моменту на валу ротора, активної і реактивної потужності при швидкості вітру 5 м/с та 8 м/с та 11, 15 м/с встановлено:

- характерними моментами часу процесу запуску установки з DFIG-генератором є: $t=0$ – старт системи, $t=1,5$ с – компенсація пружності системи та зовнішнього тертя, $t=3$ с – компенсація інерційності системи та її перехід у збалансований стан, $t=8$ с – перехід системи в усталений режим роботи;
- в період компенсації пружності системи та зовнішнього тертя кутова швидкість турбіни падає зі 167 до 140 рад/с при збільшенні крутного моменту з $-18 \text{ кН}\cdot\text{м}$ до $0...2 \text{ кН}\cdot\text{м}$;
- в момент переходу системи в збалансований стан спостерігається стрибок обертового моменту на величину до $2,3 \text{ кН}\cdot\text{м}$, після чого спостерігається збільшення кутової швидкості та зменшення обертового моменту турбіни із їх стабілізацією при переході установки в усталений режим роботи;
- в період компенсації пружності системи та зовнішнього тертя спостерігається стрибок потужності турбіни до $2,3 \text{ МВт}$. В момент переходу

турбіни у збалансований стан спостерігається спад потужності установки із наступною її стабілізацією.

Вітрогенератор може працювати в різних режимах, залежно від швидкості вітру, наявності електричного навантаження та інших факторів.

Розглянуто при початковій швидкості 0,9 м/с запуск вітрогенератора. У цьому режимі вітрогенератор активується, починає обертатися та генерувати електроенергію. Для даної моделі вітрогенератора VT-3, цей режим характеризується низькою продуктивністю.

Розглянуто режим фіксованої швидкості для нашого вітрогенератора це 2,5м/с: який є менш ефективний, ніж режим змінної швидкості (5... 8м/с), але все ще може бути використаний для стійкого заряджання акумулятору.

Проведено моделювання режиму роботи вітрогенератора, коли отримана енергія відразу поступає до споживачів за допомогою електромережі для режимів навантаження: $0.25S_{ном}$, $0.5S_{ном}$, $1.0 S_{ном}$. Представлено графік напруги та струму навантаження для сторони вищої та нижчої напруги.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель вітроенергетичної установки з урахуванням характеристик вітрогенератора типу VE-3. Модель включає віртуальний індукційний генератор з подвійним живленням, що входить до складу бібліотеки SimPowerSystem, а також блоки із програми Simulink пакету програм Matlab. Ці блоки імітують вплив вітру та рух механічної частини вітрогенератора, бо модель системи включає в себе механічну модель лопатей, втулки та валу, зворотний перетворювач, включаючи обчислення теплових втрат, магнітну модель трифазного трансформатора, а також лінію електропередачі та мережу. Така модель може бути використана для перевірки працездатності та проектування системи керування вітрогенератора.

Дослідження процесів в середині вітрогенератора, за допомогою моделей дозволяють здійснювати порівняння параметрів їх роботи при різних режимах та заданих швидкостях вітру. Результати моделювання дозволяють отримувати необхідну інформацію для впровадження заходів по компенсації реактивної потужності. Складена модель дозволяє отримувати шляхи вдосконалення вітрогенератора та системи отримання електричної енергії розподілу її для споживачів, в залежності від навантаження.

Проведено теоретичний аналіз принципу роботи вітроустановки з індукційним генератором та математичне моделювання впливу швидкості вітру на основні параметри роботи генератора. Проаналізовано зміни в часі активної та реактивної потужності, які викликають зміни в поведінці обертального моменту та швидкості обертання для вітрогенератора.

Отримано графічні залежності зміни в часі активної та реактивної потужності, які викликають зміни в поведінці обертального моменту та швидкості обертання лопатей при швидкості вітру 5-8 м/с та 11, 15 м/с у вітрогенератора приблизно через 3 с після старту електричний момент

асинхронної машини і крутний момент вітру переходить у збалансований стан обертання, та приблизно на 7 с виходять в усталений режим з швидкістю обертання 177 рад/с. Відзначимо, що швидкості вітру більше 15 м/с вітряна турбіна все ще може працювати безпечно.

Теоретичні та паспортні дані, виміряні шляхом зміни величини вітру, коли швидкість вітру досягає 0,9 м/с, показали, що вітрогенератор з вертикальною віссю може запускатися та працювати нормально.

Розглянуто за допомогою моделювання при початковій швидкості 0,9 м/с запуск вітрогенератора. У цьому режимі вітрогенератор активується, починає обертатися та генерувати електроенергію. Для даної моделі вітрогенератора VT-3, цей режим характеризується низькою продуктивністю.

Розглянуто режим фіксованої швидкості для нашого вітрогенератора це 2,5 м/с: який є менш ефективний, ніж режим змінної швидкості (5... 8 м/с), але все ще може бути використаний для стійкого заряджання акумулятору.

Вітряні турбіни з вертикальним підйомом повністю адаптовані до мінливого середовищі на різних висотах і можуть працювати безпечно та ефективно, забезпечувати постійний потік чистої енергії і навіть стати експортерами енергії, які відіграють позитивну роль у зниженні енергетичного тиску та покращенні стану навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вимогами до оформлення випускових кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти. [Online]. Available: <https://elin.donntu.edu.ua/sciences.html>. Accessed on: May 10, 2024.
2. S. Gupta and A. Shukla, "Improved dynamic modelling of DFIG driven wind turbine with algorithm for optimal sharing of reactive power between converters," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 51, 2022, p. 101961. DOI: 10.1016/j.seta.2022.101961. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138822000133>.
3. Карта вітрів України. [Online]. Available: <https://stat.nonews.co/ukraine/maps/wind/>. Accessed on: May 10, 2024.
4. L. Xiong, P. Li, F. Wu, M. Ma, M. W. Khan, and J. Wang, "A coordinated high-order sliding mode control of DFIG wind turbine for power optimization and grid synchronization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 105, pp. 679-689, 2019. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.09.008.
5. A. Shukla and S.N. Singh, "Clustering based unit commitment with wind power uncertainty," *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 89-102, 2016. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.040.
6. A. Shukla and S.N. Singh, "Clustering based unit commitment with wind power uncertainty," *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 89-102, 2016. [Online].: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415011437>.
7. A.B. Patel and R. Chilipi, "Development of constant switching frequency model predictive control for DFIG-based wind energy conversion system in standalone and grid connected operation," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 64, p. 103739, 2024. DOI: 10.1016/j.seta.2024.103739.
8. S. Gupta, V. Manchanda, P. Sachdev, R.K. Saini, and M. Joy, "Study of incidence and risk factors of surgical site infections in lower segment caesarean section cases of tertiary care hospital of north India," *Indian Journal*

- of Medical Microbiology, vol. 39, pp. 1-5, 2021. DOI: 10.1016/j.ijmmb.2020.11.005.
9. Y. Permynov, E. Monakhov, and L. Volkov, "Design permanent magnet windgenerator of increased power (600÷3600) kW," *Vidnovluvana Energetika*, vol. 2020, no. 1, pp. 42-51, 2020. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85184227769&doi=10.36296%2f1819-8058.2020.1%2860%29.42-51&partnerID=40&md5=78b7c9e24a515945a52795c90f732be2>.
 10. S. Kudrya, Yu. Perminov, and V. Budyonnyi, "O metodakh rascheta magnitnikh system s postoyanimi magnitami" [About calculation methods of the magnetic systems with permanent magnets], *Vidnovluvana energetika*, vol. 4, no. 19, pp. 40-43, 2009.
 11. J. Liu, Z. Yang, J. Zhao, J. Yu, B. Tan, and W. Li, "Explicit data-driven small-signal stability constrained optimal power flow," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 37, no. 5, pp. 3726-3737, Sept. 2022.
 12. S.M. Brahma, M. Chaudhary, and S.J. Ranade, "Some findings about equivalency wind farms with Type 1 and Type 2 induction generators," in *North American Power Symposium (NAPS)*, Boston, MA, USA, Aug. 2011, pp. 1-6.
 13. V. Din, "Issledovanie i proektirovanie avtonomnoi malomasshtabnoi vetro-solnechnoi gibridnoi ehlektrostantsii sistema generatsii," *Universitet Nan'khua – Nanhua University*, 2022. Available: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1023450690.nh&DbName=CMFDTEMP>.
 14. P.W. Carlin, S. Laxson, and E.B. Muljadi, "The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology," *Technical Report NREL/TP-500-28607*, National Renewable Energy Laboratory, U.S.A., 2001.
 15. A.S. Anikin, A.S. Martyanov, and N.A. Martyanov, "Comparative analysis of wind turbines control strategies," in *Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015)*, 2015, pp. 607-614.

16. Osama E.B., Kandil T., Ahmed M. A., "Direct Active and Reactive Power Control for DFIG using Instantaneous Rotor Current Control," *Wseas Transactions on Power Systems*, vol. 13, pp. 227-234, 2018.
17. M.H. Dawson, L. Barnet, G. Asuquo, D. Weems, M. Schledorn, and M. Farmer, "Variable Length Wind Turbine Blade," Final Report DE-FG36-03GO13171, 2006, p. 47.
18. A.S. Martyanov, E.A. Sirotkin, and E.V. Solomin, "Adaptive control over the permanent characteristics of a wind turbine," in *Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015)*, 2015, pp. 640-646.
19. A. Martyanov and E. Solomin, "Modelling of Wind Turbine Performance Measurement," *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, vol. 2, pp. 18-25, 2014.
20. І.В. Кузьо та В.М. Корендій, "Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності," *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 679, pp. 61–68, 2010.
21. G.L. Johnson, *Wind energy systems*. Manhattan: Electronic edition, 2006. – 449 p.
22. M. Stielbier, *Wind energy systems for electric power generation*. Berlin: Springer, 2008. 193 p.
23. В.М. Корендій, Р.В. Зінько, "Аналіз переваг і недоліків горизонтально-осьових вітроустановок," 2012, с. 53-58. [Online]. Available: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4790/10.pdf>.
24. В. С. Кривцов, А. М. Олійников, та А. І. Яковлев, *Невичерпна Енергія. Вітроенергетика*. Харків: ХАІ, 2014. 158 с.
25. А.А. Бубенчиков, Є.Ю. Артамонова, Р.А. Дайчман, Л.А. Файфер, Ф.В. Катерів, та А.А. Бубенчикова, "Застосування вітроенергетичних установок з концентраторами вітрової енергії в регіонах з малим

- вітровим навантаженням," Міжнародний науково-дослідний журнал, vol. 5-2 (36), pp. 31-35, 2015.
26. В. В. Козирський, М. І. Трегуб, та А. В. Петренко, "Обґрунтування принципів адаптивного регулювання навантаження сільськогосподарських автономних вітроелектричних установок," Науковий вісник Національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК», К., 2013, вип. 166, ч. 3, с. 22–31.
 27. J.-L. Menet, N. Bourabas, "Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation," Popular Mechanics, 2014. [Online]. Available: http://educyclopedia.karadimov.info/library/23_1400_jeanlucmenet_01.pdf.
 28. K. Rogowski, R. Maronsky, "CFD computation of the Savonius rotor," Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, pp. 43-53. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>
 29. Ю. К. Жолудєва, М. В. Мальцев, "Математична модель вітрогенератора," Науковий альманах, №4-3 (30), с. 63-67, 2017.
 30. W.F. Pickard, A.Q. Shen, N.J. Hansing, "Parking the power: Strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 1934–1945, 2015.
 31. B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, "Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization," Energy Conversion and Management, vol. 50, no. 4, pp. 885-892, 2009. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.01.011.
 32. V.M. Andreev, A.G. Zabrodsky, S.O. Kognovitsky, "Integrated power plant with an energy storage on the basis of the hydrogen cycle," International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology, vol. 2, no. 46, pp. 99–105, 2017.
 33. J. Wang, D. Bo, Q. Miao, Z. Li, X. Wu, D. Lv, "Maximum power point tracking control for a doubly fed induction generator wind energy conversion

- system based on multivariable adaptive super-twisting approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, 2021, p. 106347, DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106347.
34. B.S. Richards, G.L. Park, T. Pietzsch, A.I. Schafer, "Renewable energy powered membrane technology: Brackish water desalination system operated using real wind fluctuations and energy buffering," *Journal of Membrane Science*, vol. 468, pp. 224–232, 2014.
 35. T. Ghennam, E.-M. Berkouk, "Back-to-back three-level converter controlled by a novel space-vector hysteresis current control for wind conversion systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 4, pp. 444-455, 2010. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.10.009.
 36. D. Song, J. Liu, Y. Yang, J. Yang, M. Su, Y. Wang, N. Gui, X. Yang, L. Huang, Y.H. Joo, "Maximum wind energy extraction of large-scale wind turbines using nonlinear model predictive control via Yin-Yang grey wolf optimization algorithm," *Energy*, vol. 221, 2021, p. 119866. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119866.
 37. І.А. Шаповал, В.М. Михальський, М.Ю. Артеменко, С.Й. Поліщук, та В.В. Чопик, "Комплекси генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі машини подвійного живлення. Монографія," Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2020, 241 с.
 38. G. M. Joselin, S. Iniyan, E. Sreevalsan, та S. Rajapandian, "A review of wind energy technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, pp. 1117-1145, 2007. DOI: 10.1016/j.rser.2005.08.004. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/223644531_A_review_of_wind_energy_technologies_Renew_Sustain_Energy_Rev.
 39. О.М. Любименко, О.Ю. Колларов, Д.О. Остренко, "Моделювання роботи вітрогенератора з підтримкою максимального значення потужності, при різних зовнішніх факторах, за допомогою інтелектуальних мереж," у Зб. тез доповідей XVII міжнародної науково-

технічної конференції «Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання», 8-10 жовтня, м. Харків, ІПМБ НАНУ ім. А. Підгорного, НАНУ, ХРНТОЭ, Українська інженерно-педагогічна академія, 2019, с. 24–25.

40. В.І. Мілих та Т.П. Павленко, "Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей," Харків, ФОП Панов А. М., 2016, 272 с.
41. О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, та Т.А. Мазур, "Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник," Львів, Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2013, 608 с.
42. А. В. Журахівський та А. Я. Яцейко, "Оптимізація режимів електроенергетичних систем: навч. посіб., друге вид., виправ.," Львів, Видавництво Львівської політехніки, 2010, 140 с.
43. "Вертикальні вітрогенератори Україна," [Електронний ресурс], доступно: <http://altenergo.biz/vitrogeneratori/>, дата звернення: трав. 2, 2024.
44. S. Wu та S. Sheina, "Study on Installation of the Vertical Axis Wind Turbines on the Upper Floors of High-Rise Buildings," *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*, vol. 2, no. 2, pp. 19–28, 2023. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-2-19-28.
45. В. В. Гайдайчук та В. П. Носенко, "Динаміка вітроенергетичних установок під дією вітрових та інерційних навантажень," *Опір матеріалів і територія споруд*, № 82, с. 31-38, 2008.
46. О. М. Любименко, О. А. Штепа, та П. В. Белицький, "Вплив швидкості вітру на роботу вітряних турбін з DFІG генератором на вітряних електростанціях," *Наукові праці ДонНТУ, серія: "Машинобудування і машинознавство"*, №1(15), с. 21-27, 2023. [Online]. Доступно: <https://mash.donntu.edu.ua/%e2%84%961-2023/>. DOI: 10/31474/2308-5131-2023-1-15-21-28.

47. О. М. Любименко, О. А. Штепа, "Імітаційне комп'ютерне моделювання процесу отримання електроенергії," у «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології: зб. доповідей Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, відп. ред. Г. В. Ступак, ДВНЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2022, с. 35-37. [Online]. Доступно: <https://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/33810/1/Liubymenko-%20Shtepa-35-37.pdf>.
48. О. В. Побігун, Б. М. Лижичка, та Н. В. Фоменко, "Вітроенергетичні установки як альтернатива використання нафтогазових ресурсів," Нафтогазова енергетика, № 2(13), 2010.

ДОДАТОК А. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО РОБОТИ

Перелік зауважень нормо контролера до роботи

Сторінка	Позначення	Зміст зауваження

Дата _____

підпис(ПІБ)_____