

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання _____
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.311

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

« ____ » _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітня програма Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології

на тему: «Впровадження розподіленої генерації та її вплив на якість електричної енергії»

Виконав: студент II курсу, групи ОН-з21мп

_____ Федоровський Віталій Павлович _____
(прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Волошко А. В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Нормоконтроль к.т.н., доц. Шовкалюк М. М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

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

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»

В.о. завідувача кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

« ____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Федоровському Віталію Павловичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Впровадження розподіленої генерації та її вплив на якість електричної енергії»
науковий керівник дисертації Волошко А. В. д.т.н., проф. _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від 8 листопада 2023 р. №5199-с
2. Строк подання студентом дисертації 8 січня 2024 року
3. Об'єкт дослідження фактори впливу на параметри якості електроенергії при впровадженні розподіленої генерації
4. Предмет дослідження вплив провалів напруги в електричній мережі на продуктивність роботи вітрової електростанції
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).
 - Вплив впровадження ВДЕ на роботу електрообладнання.
 - Провали напруги в електричній мережі на продуктивність роботи вітрової електростанції.
 - Стартап-проект.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження (алгоритми розрахунків та діаграми)

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1) публікація тез доповіді «Вплив провалів напруги в електричній мережі на турбіну вітрової електростанції» в збірнику наукових праць ІХ Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –PEMS '2023» 2023 року

8. Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль

Шовкалюк М.М.

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2023	Вик.
2	Аналіз літературних джерел	04.09.2023	Вик.
3	Складання плану роботи	05.09.2023	Вик.
4	Можливість впровадження відновлюваних джерел енергії	06.09.2023- 21.09.2023	Вик.
5	Вплив впровадження ВДЕ на роботу електрообладнання	25.09.2023- 13.10.2023	Вик.
6	Вплив провалів напруги в електричній мережі на продуктивність роботи вітрової електростанції	16.10.2023- 11.11.2023	Вик.
7	Розробка стартап проекту	14.11.2023- 28.11.2023	Вик.
8	Оформлення дисертації	29.11.2023- 05.12.2023	Вик.
9	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	06.12.2023- 12.12.2023	Вик.
10	Передзахист МД	20.12.2023	Вик.
11	Захист дисертації	22.01.2024	Вик.

Студент

(підпис)

В. П. Федоровський

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

А. В. Волошко

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить 92 сторінку, 19 ілюстрацій, 17 таблиць та 71 джерело за переліком посилань.

Актуальність теми дослідження: Розподілена генерація (РГ) відповідає стратегічним цілям та пріоритетам державної політики України у сфері економічного, соціального та екологічного розвитку, зокрема, Національній економічній стратегії на період до 2030 року, яка передбачає модернізацію енергетичного сектору, розвиток інфраструктури, підтримку малого і середнього підприємництва, збільшення інвестицій та інновацій. РГ відповідає Закону України "Про альтернативні джерела енергії", який визначає правові, економічні та організаційні засади використання АДЕ, встановлює "зелений" тариф та інші заходи стимулювання.

Зв'язок роботи з науковими планами, темами. Магістерська дисертація виконана на кафедрі Електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського») та охоплює задачі, які відповідають:

- «Стратегії державної екологічної політики України на період до 2030 року» визначено цілі наукових робіт цієї галузі;

- Цілі 1 «Стратегії сталого розвитку України на період до 2030 року».

Мета дослідження. Розробка способу зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.

До завдань віднесені:

1. Аналіз необхідності впровадження ВДЕ.
2. Дослідження впливу впровадження ВДЕ на роботу електрообладнання.
3. Вплив симетричних і асиметричних провалів напруги на вітрові турбіни.
4. Розробка способу зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.
5. Підготовка висновків в щодо впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.

Об’єкт дослідження: процес зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.

Предмет дослідження: показники якості електричної енергії, технологічна схема.

Методи дослідження: Методика магістерської роботи передбачала аналіз науково-технічної літератури; інформаційно-пошукові дослідження; інженерно-економічні розрахунки та аналіз; графічне та наочне ілюстрування результатів дослідження. У магістерській дисертації використано наступне програмне забезпечення: MS Word, MS Excel, PLECS, MATLAB/Simulink.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Вперше запропоновано та обґрунтовано комплексний підхід до аналізу та оцінки впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції, який враховує особливості вітрового ресурсу, технічні характеристики вітроустановок, параметри електричної мережі та вимоги нормативних документів....

- Розроблено методику вибору та налаштування систем захисту та керування вітрової електростанції, яка забезпечує мінімізацію втрат електроенергії та збереження надійності роботи вітрової електростанції при провалах напруги.

- Експериментально досліджено та підтверджено ефективність запропонованого способу зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції на прикладі ...

Апробація результатів дисертації. Відбулася на IX Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS’2023».

Публікації. 1) публікація тез доповіді «Вплив провалів напруги в електричній мережі на турбіну вітрової електростанції» в збірнику наукових праць IX Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS’2023» 2023 року.

Ключові слова: розподілена генерація, альтернативні джерела енергії, якість електричної енергії, стандарти якості електричної енергії, smart grids, енергетичний потенціал, «зелений» тариф.

ABSTRACT

The master's thesis contains 92 pages, 19 illustrations, 17 tables and 71 sources in the list of references.

Relevance of the research topic: Distributed generation (DG) corresponds to the strategic goals and priorities of the state policy of Ukraine in the field of economic, social and environmental development, in particular, the National Economic Strategy for the period up to 2030, which envisages modernization of the energy sector, infrastructure development, support for small and medium-sized businesses, increase of investments and innovations. DG corresponds to the Law of Ukraine "On Alternative Energy Sources", which defines the legal, economic and organizational principles of using AES, establishes the "green" tariff and other measures of stimulation.

The connection of the work with scientific plans, topics. The master's thesis was performed at the Department of Power Supply of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (NTUU "KPI named after Igor Sikorsky") and covers the tasks that correspond to:

- "Strategy of the state environmental policy of Ukraine for the period up to 2030" defines the goals of scientific works in this field;
- Goal 1 of the "Strategy of Sustainable Development of Ukraine for the period up to 2030".

The purpose of the research. Development of a method for reducing the impact of voltage dips on the operation of a wind power plant.

The tasks include:

1. Analysis of the necessity of implementing RES.
2. Research of the impact of RES implementation on the operation of electrical equipment.
3. The impact of symmetrical and asymmetrical voltage dips on wind turbines.
4. Development of a method for reducing the impact of voltage dips on the operation of a wind power plant.

5. Preparation of conclusions on the impact of voltage dips on the operation of a wind power plant.

The object of research: the process of reducing the impact of voltage dips on the operation of a wind power plant.

The subject of research: the quality indicators of electric energy, the technological scheme.

Research methods: The methodology of the master's thesis envisaged the analysis of scientific and technical literature; information and search research; engineering and economic calculations and analysis; graphical and visual illustration of the research results. The following software was used in the master's dissertation: MS Word, MS Excel, PLECS, MATLAB/Simulink.

The scientific novelty of the obtained results:

- For the first time, a comprehensive approach to the analysis and evaluation of the impact of voltage dips on the operation of a wind power plant was proposed and substantiated, which takes into account the features of the wind resource, the technical characteristics of the wind installations, the parameters of the electric network and the requirements of the normative documents....

- A methodology for the selection and adjustment of the protection and control systems of the wind power plant was developed, which ensures the minimization of electric energy losses and the preservation of the reliability of the wind power plant operation during voltage dips.

- The effectiveness of the proposed method for reducing the impact of voltage dips on the operation of a wind power plant...

The approbation of the dissertation results. Took place at the IX International Scientific, Technical and Educational Conference “Energy Management: Status and Development Prospects – PEMS’2023”

Publications: 1) publication of the abstracts of the report “The impact of voltage sags in the electric grid on the wind turbine generator” in the collection of scientific papers of the IX International scientific, technical and educational-methodical

conference “Energy management: state and development prospects – PEMS’2023” in 2023.

Keywords: distributed generation, alternative energy sources, quality of electric energy, standards of quality of electric energy, smart grids, energy potential, “green” tariff.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АС – змінний струм;

DC – постійний струм;

DFIG - doubly-fed induction generator.

ВЕС – вітрова електростанція;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВДР – внутрішньодобовий ринок;

ГАЕС – гідроакumuлююча електростанція;

ЕРС – електрорушійна сила;

НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг;

СЕС – сонячна електростанція;

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.....	15
1.1 Необхідність впровадження ВДЕ	15
1.2 Типи ВДЕ.....	18
1.2.1. Сонячна енергетика	19
1.2.2. Гідроенергетика	20
1.2.3. Геотермальна енергетика	21
1.2.4. Біоенергетика.....	23
1.2.5. Вітроенергетика.....	24
1.3. Основні технічні характеристики ВДЕ	27
Висновки до розділу 1	29
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ВПРОВАДЖЕННЯ ВДЕ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	30
2.1 Якість електричної енергії.....	30
2.1.1 Номінальна напруга	32
2.1.2 Частота напруги.....	32
2.1.3. Коливання напруги	33
2.1.4. Напруга зворотної послідовності.....	33
2.1.5. Гармонічні спотворення напруги.....	35
2.2. Основні типи електрообладнання в електричній мережі і залежність їх характеристик від якості електричної енергії	37
2.3. Вітрові електростанції. Типи та основні технічні характеристики	39
2.4. Вплив вітрових електростанцій на якість електричної енергії.....	50
Висновок до розділу 2:.....	51
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОБОТИ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	52
3.1 Вплив провалів напруги в електричній мережі на турбіну вітрової електростанції	52
3.1.1 Силова схема.....	52
3.1.2 Контроль.....	55

3.1.3 Симуляція	55
3.1.3 Вплив провалів напруги на DFIG	56
3.2 Вплив симетричних і асиметричних провалів напруги на вітрові турбіни на основі концепції DFIG.....	58
3.2.1 Вплив провалів напруги на вітряну турбіну з асинхронним генератором подвійного живлення.....	60
3.2.1.1 Симетричні трифазні замикання.....	61
3.2.1.2 Вплив глибини провалу напруги на перехідну характеристику DFIG.....	63
3.2.1.3 Вплив глибини провалу на перехідні характеристики	65
Висновки до розділу 3:.....	66
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЄКТУ ВІТРОВОЇ СТАНЦІЇ	68
4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проекту.....	69
4.2 Обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проекту....	70
4.3 Оцінка конкурентної ситуації	71
4.4 Обґрунтування ресурсного забезпечення проекту.....	72
4.5 Фінансове обґрунтування стартап-проекту	72
4.5.1 Витрати на оплату праці.....	74
4.5.2 Обґрунтування основних фондів	76
4.5.3. Інші прямі витрати.....	76
4.5.4. Загальновиробничі витрати.....	77
4.5.5. Умовно-змінні витрати.....	77
4.5.6. Умовно-постійні витрати	78
4.5.7. Собівартість витрат.....	78
4.5.8. Обґрунтування рентабельності ідеї	79
4.5.9 Обґрунтування вартості виробництва електроенергії	79
4.5.10. Оцінка ефективності впровадження стартап-проекту та пропозиції інвестору.....	80
Висновки до розділу 4:.....	80
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	84

ВСТУП

Електроенергетика є важливою галуззю економіки, яка забезпечує функціонування всіх сфер життєдіяльності суспільства [1]. Розвиток електроенергетики пов'язаний з постійним зростанням попиту на електричну енергію, необхідністю підвищення енергоефективності та екологічної безпеки виробництва та споживання електроенергії, а також з викликами глобальних змін клімату та енергетичної безпеки. У цих умовах актуальним напрямком розвитку електроенергетики є впровадження розподіленої генерації (РГ) на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Розподілена генерація - це виробництво електричної енергії за допомогою невеликих потужностей (до 10 МВт), розташованих близько до місць споживання, з використанням різних джерел енергії, в тому числі ВДЕ, таких як сонячна, вітрова, гідро-, біо- та геотермальна енергія. РГ має ряд переваг перед централізованою генерацією, таких як зниження втрат електроенергії в мережах, підвищення надійності та якості електропостачання, зменшення залежності від імпорту енергоносіїв, забезпечення енергетичної автономії та диверсифікації джерел енергії, зниження викидів парникових газів та інших шкідливих речовин в атмосферу, створення нових робочих місць та підтримка місцевого розвитку.

Впровадження РГ супроводжується труднощами та викликами [2], пов'язаними з технічними, економічними, правовими, соціальними та інституційними аспектами. Однією з проблем є вплив симетричних і асиметричних провалів напруги на вітрові турбіни яка характеризується такими показниками, як напруга, частота, форма кривої напруги, спотворення гармонік, асиметрія, нестабільність, перехідні режими тощо. Якість електричної енергії визначає ефективність та надійність роботи електрообладнання, енергозбереження, безпеку людей та навколишнього середовища. Впровадження РГ може покращити або погіршити якість електричної енергії в залежності від ряду факторів, таких як тип, потужність та кількість джерел РГ, їх розташування,

спосіб підключення до мережі, параметри мережі, режими навантаження, наявність систем захисту та керування тощо.

Мета дослідження. Розробка способу зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.

Об'єкт дослідження: процес зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.

Предмет дослідження: показники якості електричної енергії, технологічна схема.

РОЗДІЛ 1. ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

1.1 Необхідність впровадження ВДЕ

Відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) називають ті, що постійно поновлюються в природі. До них належать сонячна, вітрова, геотермальна, припливна гідро-, та біоенергетика. Основними перевагами використання ВДЕ є [3]:

- зменшення викидів парникових газів, що спричиняють зміну клімату;
- забезпечення енергетичної безпеки за допомогою зниження залежності від імпорту енергоносіїв;
- стимулювання інноваційного розвитку;
- залучення інвестицій;
- створення робочих місць.

Впровадження відновлюваних джерел енергії є необхідним для України. Застосування ВДЕ допомагає зменшити залежність від імпорту енергоносіїв, забезпечити енергетичну безпеку, сприяє захисту навколишнього середовища, зниженню викидів парникових газів та боротьбі зі зміною клімату. ВДЕ стимулюють інноваційний розвиток, приваблюють інвестиції та створюють нові робочі місця.

За даними Держенергоефективності, Україна має великий технічний потенціал для вироблення енергії з ВДЕ, який становить понад 98 млн. т у. п. на рік [4]. У першому півріччі 2021 року в Україні збільшилася встановлена потужність об'єктів ВДЕ на 8,3%. Найбільша частка ВДЕ припадає на сонячні електростанції, які становлять 7166 МВт. Найбільші області України за встановленою потужністю ВДЕ є Дніпропетровська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька та Одеська.

Україна має всі необхідні умови для розвитку ВДЕ, такі як природні ресурси, територія, різноманітність енергетичного сектору, діючий «зелений» тариф та підтримка міжнародних партнерів. Однак для досягнення мети

виробляти 40% електроенергії з ВДЕ до 2035 року необхідно також вирішити ряд проблем, таких як, застарілість енергетичної інфраструктури, недостатність балансування та інтеграції з європейським енергетичним ринком.

ВДЕ стають більш доступними та конкурентоспроможними на світових ринках енергії, витісняючи викопне паливо швидше, ніж очікували уряди. Україна після стрімкого розвитку ВДЕ, зіткнулася з кризою через невизначеність щодо зеленого тарифу та наслідки пандемії. За даними Держенергоефективності [4], за перше півріччя 2021 року в Україні встановлена потужність ВДЕ зростає на 8,3%, див. рисунок 1.1.

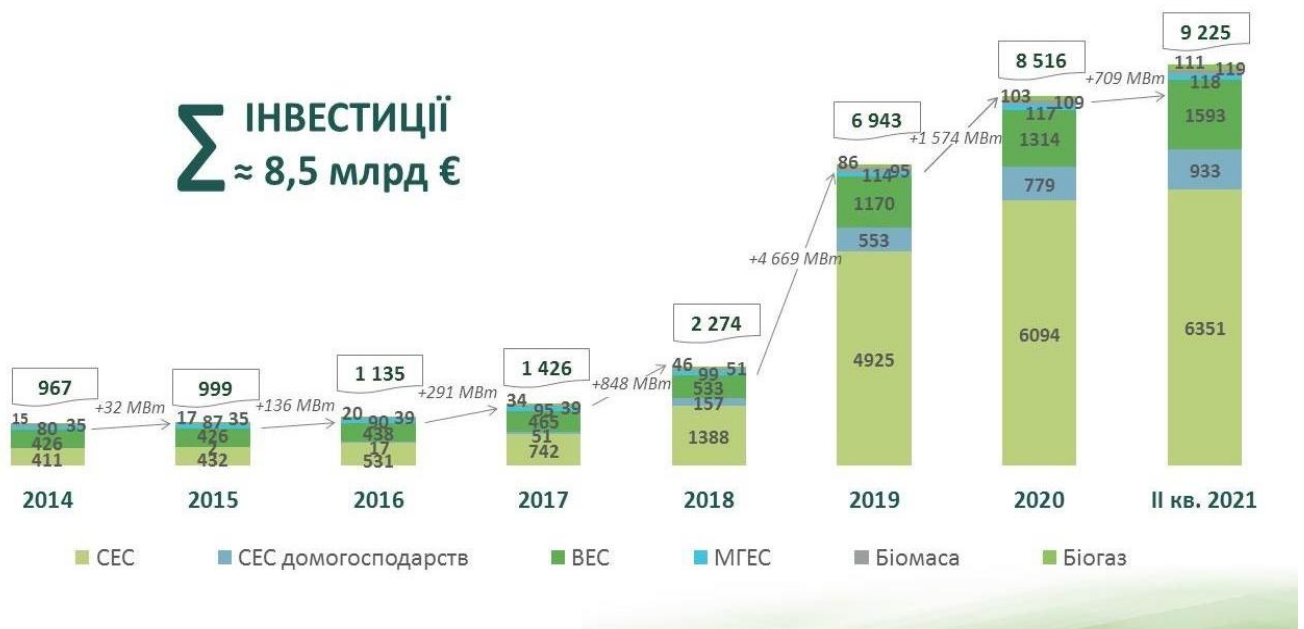


Рисунок 1.1 - Встановлена потужність об'єктів електроенергетики [4]

Основним драйвером ринку є домашні та комерційні СЕС під власне споживання, які дозволяють економити на електроенергії, ціна на яку постійно зростає. Поширюються Private PPA — договори купівлі-продажу електроенергії між приватними виробниками та споживачами, які не залежать від зеленого тарифу. Такі договори зацікавили не лише великі підприємства, а й водоканали та комунальні установи. Однак, для повноцінного розвитку ВДЕ в Україні необхідно впровадити нові механізми підтримки, які були передбачені Меморандумом про взаєморозуміння між урядом та інвесторами у 2020 році. Це стосується зокрема

зелених аукціонів та Net Metering — системи, за якою споживачі можуть продавати надлишок виробленої електроенергії в мережу. Також важливо враховувати вплив Європейського Зеленого Курсу та механізму СВМ, який передбачає додаткове оподаткування продуктів, вироблених з використанням «брудної» енергії. ВДЕ може стати стимулом для декарбонізації української економіки та підвищення її конкурентоспроможності на європейському ринку.

Міжнародні тенденції. З початку 2020 року ціни на сировину та обладнання для ВДЕ зросли через пандемію та інші фактори. За даними звіту Lazard [5], вітрова та сонячна енергія все ще є найдешевшими джерелами енергії у світі. Міжнародне енергетичне агентство повідомляє, що у 2021 році було встановлено рекордну кількість ВДЕ потужностей [6]. Агентство очікує, що через наступних п'яти років відновлювана енергія збільшиться більш ніж на 60% [7]. У 2020 році «зелена» енергія в ЄС вперше перевищила «викопну». Такий розвиток можливий завдяки державним програмам, які сприяють відмові від викопного палива та підтримці зеленої генерації. Наприклад, Іспанія виділила 215 мільйонів доларів на проекти з ВДЕ [7], а Португалія надала 10 мільйонів євро субсидій фермерам, які хочуть встановити СЕС. Deloitte прогнозує, що головними трендами для ВДЕ році будуть:

1. Розвиток технологій нового покоління. Використання штучного інтелекту для оптимізації енергетичних процесів.
2. Впровадження нових бізнес-моделей (зокрема бізнес-моделі для систем зберігання енергії та розширення ВДЕ проєктів на нові ринки).
3. Розвиток інфраструктури для ВДЕ проєктів.
4. Вдосконалення ланцюгів постачання.
5. Впровадження принципів циркулярної економіки (раціональне використання ресурсів та переробка вторинної сировини).

Бізнеси та приватні господарства відмовляються від залежності від державних монополій та знижують витрати завдяки власній генерації. Ринок не розвивається так швидко, як міг би. Причини цьому — відсутність механізмів підтримки та зручних програм кредитування. Ще один фактор, який гальмує ріст

відновлюваної енергетики є перехресне субсидування — штучне заниження цін на електроенергію для населення. Така політика призводить до деградації ринку електроенергії та прирікає його на накопичення внутрішніх боргів. За даними науковців, потенціал ВДЕ може задовольнити достатнє та надійне електропостачання у всьому світі до 2050 року. Це підтверджують результати моделювання Технологічного університету Лапенранта (Фінляндія) [6]. Така перспектива спонукає державних та приватних інвесторів мобілізувати мільярди доларів на вдосконалення технологій відновлюваної енергетики. Особлива увага приділяється технологіям довготривалого зберігання електроенергії з відновлюваних джерел, таким як зелений водень та системи накопичення.

Необхідність замінити залежність Європи від викопного палива відновлюваними джерелами енергії ще ніколи не була такою гострою.

На опалення та охолодження припадає половина споживання енергії в ЄС [8]. Майже три чверті цієї енергії надходить від спалювання дорогого, забруднюючого викопного палива.

По всій Європі великі та малі громади працюють над переведенням своїх систем централізованого теплопостачання на використання відновлюваної енергії.

В джерелі [8] описано досвід Угорщини та Латвії у використанні ВДЕ для опалення. Раніше ці держави повністю залежали від викопного газу. Їх результати доводять, що системи централізованого теплопостачання, які працюють на сонячній або геотермальній енергії є перспективою.

Російська агресія в Україні та виробництво енергії з викопних ресурсів стали жорстоким нагадуванням про те, що перехід на відновлювані джерела енергії також є питанням енергетичної безпеки.

1.2 Типи ВДЕ

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) - джерела, що постійно поновлюються в природі. До них належать, сонячна, вітрова, гідроенергетика, геотермальна-, припливна- та біоенергетика [9].

1.2.1. Сонячна енергетика

Сонячна енергія - це енергія, яка отримується з сонячного світла. Її можна захоплювати “активно” або “пасивно”. Активне захоплення сонячної енергії використовує технологію перетворення сонячних променів на електричний струм. Основними видами обладнання є фотоелектричні елементи (або сонячні батареї) та дзеркала, які фокусують сонячне світло в певній точці. Пасивне захоплення сонячної енергії не використовує жодного обладнання. Замість цього, воно отримує енергію з того, як сонячне світло природно змінюється протягом дня. Наприклад, оптимально будувати будинки так, щоб їхні вікна були спрямовані на шляху сонячних променів. Це означає, що будинок отримає більше тепла від сонця. Для його опалення потрібно менше енергії з інших джерел.

Сонячна енергетика – є одним з видів розподіленої генерації, який полягає в перетворенні сонячного світла на електричну енергію за допомогою сонячних панелей. Розподілена генерація полягає у виробленні електричної енергії близько до місця її споживання, а не в централізованих електростанціях. Розподілена генерація має ряд переваг та недоліків, які потрібно враховувати при виборі сонячної енергетики.

Переваги сонячної енергетики як розподіленої генерації [10-15]:

- відновлюване джерело електричної енергії, яке не залежить від обмежених запасів палива, таких як вугілля, нафта або газ;
- відсутність шкідливих газів, які спричиняють глобальне потепління та зміну клімату;
- зменшення залежності від імпорту палива та підвищення енергетичної безпеки;
- можливість знизити втрати енергії, які виникають при транспортуванні та розподілі електричної енергії від централізованих електростанцій до споживачів, що підвищує ефективність та надійність електричної системи та допомагає збалансувати попит та пропозицію електричної енергії, особливо під час піків споживання;

- зниження витрат на енергоносії та збільшення енергетичної незалежності споживачів.

Недоліки сонячної енергетики як розподіленої генерації [10-15]:

- непостійність джерела енергії, яке залежить від погодних умов, часу доби та сезону, що вимагає наявності резервних джерел енергії або систем зберігання енергії, які можуть забезпечити стабільність та якість електричної енергії;

- необхідність великих капітальних витрат на придбання, встановлення та обслуговування сонячних панелей та іншого обладнання;

- необхідність дозволів та регуляторних норм для підключення до мережі, що супроводжує додаткові витрати;

- вплив на навколишнє середовище, такий як використання ресурсів, займання землі, вироблення відходів та емісія забруднюючих речовин

Сонячна енергетика є перспективною галуззю, сприяє сталому розвитку, енергетичній безпеці та боротьбі зі зміною клімату та потребує підтримки та стимулювання від уряду, бізнесу та громадян.

Вітрова енергія - це енергія, яка отримується з руху повітря. Її виробляють за допомогою Вітрових турбін, які перетворюють кінетичну енергію вітру на електричний струм. Вітрові турбіни можуть бути розташовані на суші або на морі, де вітер зазвичай сильніший та стабільніший. Вітрові турбіни можуть мати різні розміри та форми, в залежності від потреб та умов.

1.2.2. Гідроенергетика

Гідроенергетика - це один з видів розподіленої генерації, який полягає в перетворенні кінетичної та потенціальної енергії текучої води на електричну енергію за допомогою гідроелектростанцій. Розподілена генерація означає, що електрична енергія виробляється близько до місця її споживання, а не в централізованих електростанціях. Розподілена генерація має ряд переваг та недоліків, які потрібно враховувати при виборі гідроенергетики. За даними звіту про стан гідроенергетики за 2021 рік, гідроенергетика забезпечила світ чистою

енергією в обсязі 21,8 ГВт і зросла на 9% протягом року [16]. Гідроенергетика є поширеним джерелом відновлюваної енергії, яке забезпечує 19% електричної енергії у світі [17, 20]. У 2021 році глобальна встановлена потужність гідроенергетики зросла на 1,6% і склала 1330 ГВт [21]. Протягом 2020 року було введено в експлуатацію проекти на загальну потужність 21 ГВт, що більше, ніж 15,6 ГВт у 2019 році [18]. Майже дві третини глобального зростання припали на Китай, який побудував 13,8 ГВт нової потужності. Серед інших країн, які додали нову потужність, лише Туреччина (2,5 ГВт) внесла більше 1 ГВт. Китай залишається світовим лідером за загальною встановленою потужністю гідроенергетики з понад 370 ГВт [19]. Бразилія (109 ГВт), США (102 ГВт), Канада (82 ГВт) та Індія (50 ГВт) утворюють решту першої п'ятірки.

Переваги гідроенергетики як розподіленої генерації [22]:

- гідроенергетика є відновлюваним джерелом енергії, яке не залежить від обмежених запасів палива, таких як вугілля, нафта або газ;
- зменшення залежності від імпорту палива та підвищує енергетичну безпеку;
- зниження втрат енергії, які виникають при транспортуванні та розподілі електричної енергії від централізованих електростанцій до споживачів, що підвищує ефективність та надійність електричної системи;
- створення балансу попиту та пропозиції електричної енергії, під час піків споживання.

Недоліки гідроенергетики як розподіленої генерації [22]:

- залежність від погодних умов, сезону та рівня води в джерелах;
- великі капітальні витрати на будівництво, встановлення та обслуговування гідроелектростанцій та їх обладнання.

1.2.3. Геотермальна енергетика

Геотермальна енергетика у контексті розподіленої генерації - це виробництво електроенергії з використанням тепла, що генерується всередині

Землі, на місцевому рівні, незалежно від централізованої електромережі [23]. Геотермальна енергетика є відновлюваним ресурсом, який не викидає шкідливих речовин у навколишнє середовище.

За даними статистики, світова потужність геотермальної енергетики постійно зростає протягом останнього десятиліття і, у 2021 році, перевищила 15,6 ГВт. Станом на 2020 рік, Сполучені Штати Америки [24] були світовим лідером за кумулятивною встановленою потужністю геотермальної енергетики. У США геотермальна енергетика складає менше 1% від загальної енергетичної потужності країни, але має потенціал досягти більше 8% до 2050 року. Ефективне використання геотермальної енергії для виробництва електроенергії вимагає температури води понад 150°C [25] для приводу турбін. Або ж можна використовувати різницю температур між поверхнею та земним джерелом. Оскільки ґрунт більш стійкий до сезонних змін температури, ніж повітря, він може служити теплоаккумулятором/джерелом за допомогою геотермального теплового насоса всього на два метри під поверхнею. Переваги геотермальної енергетики [26, 27]:

- екологічність;
- відновлюваність;
- потенціал, можливість забезпечення від 0,0035 до 2 ТВт енергії;
- стабільність генерації електричної енергії;

Недоліки геотермальної енергетики:

- значні капітальні вкладення для буріння свердловин, будівництва трубопроводів, установки обладнання та підключення до електромережі;
- обмежена географічна можливість розташування електростанцій - геотермальна енергетика залежить від наявності гарячих резервуарів під землею, які розташовані не у всіх регіонах світу. Найбільш продуктивні геотермальні джерела знаходяться вздовж границь тектонічних плит, де відбувається сейсмічна активність;

- потенційний вплив на навколишнє середовище - можливість викиду парникових газів, таких як вуглекислий газ та сірководень, з глибинних резервуарів, що сприяє глобальному потеплінню.

Діаграму зростання світової потужності геотермальної енергетики зображено на рисунку 2.1.

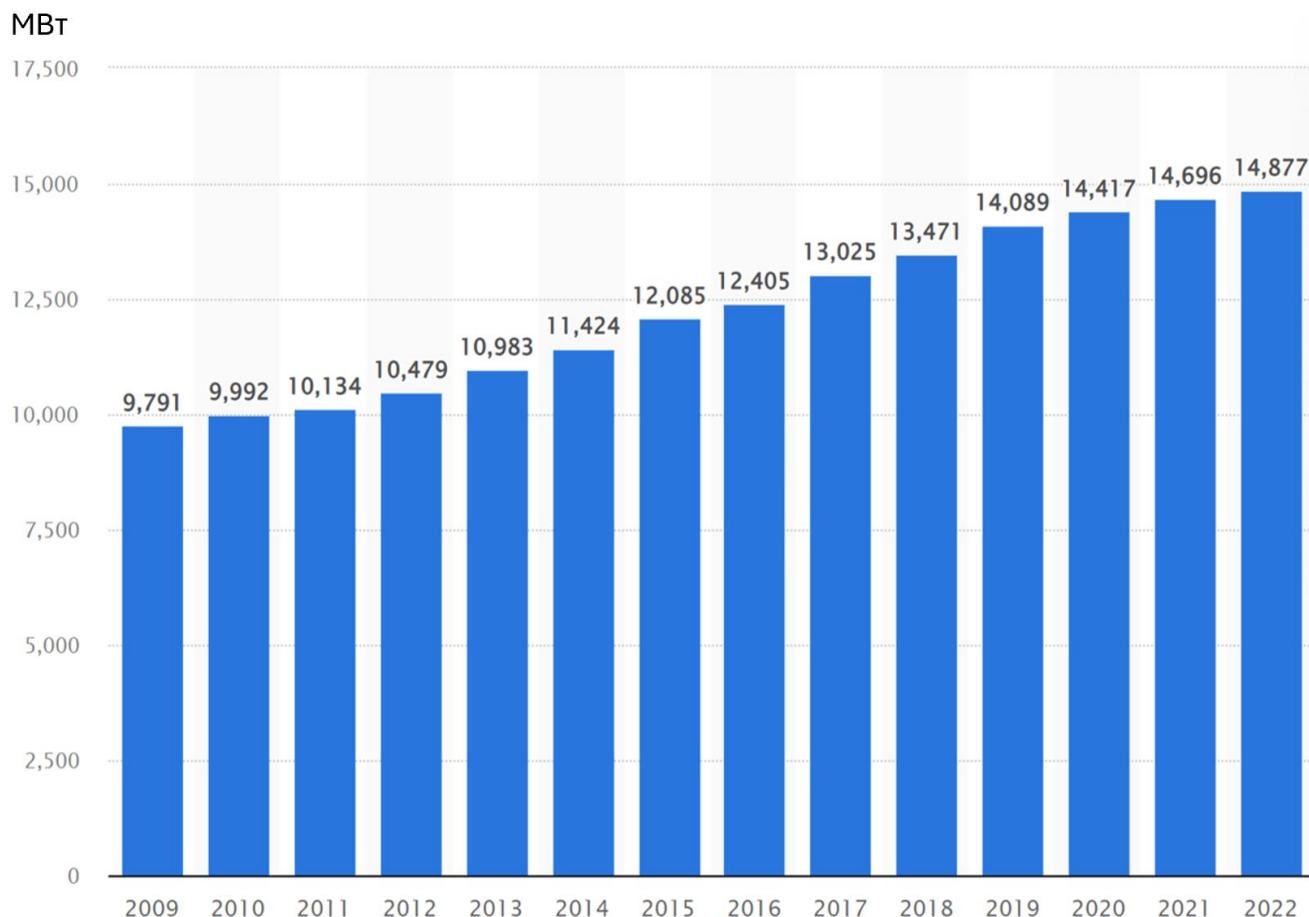


Рисунок 1.2 - Потужність об'єктів геотермальної енергетики [23]

1.2.4. Біоенергетика

Біоенергетика - це галузь енергетики, яка використовує біомасу як паливо для виробництва тепла, електрики або транспортного палива. Біомаса - це органічна речовина рослинного або тваринного походження. Біоенергетика є складовою розподіленої генерації, оскільки дозволяє виробляти енергію близько

до місця споживання, зменшуючи втрати в електромережах та залежність від імпортованих енергоносіїв.

За даними Bioenergy Europe, в 2019 році в Європі було вироблено 228,3 МВт-год електроенергії з біомаси, що становить 5,8% від загального виробництва електроенергії в регіоні [28]. В Україні, за даними UABIO, в 2019 році було вироблено 1,2 ТВт-год електроенергії з біомаси, що становить 0,4% від загального виробництва електроенергії в країні [29].

Переваги біоенергетики полягають в наступному [30]:

- зменшення викидів парникових газів, оскільки біомаса є відновлюваним джерелом енергії, яке не збільшує концентрацію вуглецю в атмосфері;
- сприяння енергетичній безпеці, через зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв, які є нестабільними або дорогими;
- створення нових робочих місць, розвиток виробничих потужностей, логістики, досліджень та інновацій;
- розвиток сільських громад, забезпечуючи додатковий дохід для сільськогосподарських виробників;
- використання відходів, які можуть забруднювати навколишнє середовище або потребувати дорогої утилізації.

Недоліки біоенергетики полягають в наступному [30]:

- потреба в великих площах землі для вирощування енергетичних культур, що конкурує з продовольчим землеробством або призводить до вирубування лісів;
- негативний вплив на біорізноманіття, при не дотриманні принципів сталого використання біомаси, які передбачають захист природних екосистем, збереження ґрунтів, води та повітря.

1.2.5. Вітроенергетика

Вітроенергетика - це вид відновлюваної енергії, який використовує кінетичну енергію вітру для виробництва електричної енергії за допомогою

Вітрових турбін або вітрогенераторів. За даними Світової вітроенергетичної асоціації, у 2020 році світова встановлена потужність вітроенергетики досягла 743 ГВт, що на 53 ГВт більше, ніж у 2019 році [31]. У 2020 році вітроенергетика забезпечила приблизно 6,5% світового споживання електроенергії [32].

Україна також активно розвиває вітроенергетику, яка є однією з пріоритетних галузей альтернативної енергетики в країні. За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, у 2020 році в Україні було встановлено 1 267 Вітрових турбін загальною потужністю 1674 МВт, що на 1000 МВт більше, ніж у 2019 році [32]. У 2020 році вітроенергетика виробила 4,5 млрд кВт-год електроенергії, що становить 3,3% від загального виробництва електроенергії в країні [33].

До переваг вітроенергетики віднесено:

- відновлюваність та невичерпність джерела енергії, яке не залежить від імпорту палива або коливань цін на нього;
- чистий та екологічний вид енергії, який не викидає парникових газів, твердих відходів або радіоактивних речовин у навколишнє середовище;
- безпечність та надійність джерела енергії, який не створює ризику аварій техногенного характеру;
- гнучка форма енергії, яка може бути розміщена на різних місцевостях, включаючи віддалені або недоступні регіони, де немає електромережі;
- економічно вигідна форма генерації енергії, яка має низькі витрати на експлуатацію і обслуговування, а також користується державною підтримкою у вигляді «зелених» тарифів або інших стимулів.

До недоліків вітроенергетики віднесено:

- непередбачуваність та нестабільність форми енергії, яка залежить від сили і напрямку вітру, які змінюються впродовж дня або року;
- низька за ефективністю на одиницю форма енергії, яка потребує великих площ для розміщення Вітрових турбін;
- вимагає додаткових систем регулювання або резервування, щоб забезпечити постійне постачання електроенергії за відсутності вітру.

- вплив на навколишнє середовище, який викликає негативні наслідки (візуальне, шумове або електромагнітне забруднення).

Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є важливим напрямком енергетичної політики України для збереження традиційних енергетичних та енергетичних ресурсів та зменшення викидів парникових газів. Однак, впровадження ВДЕ також ставить перед дослідниками та практиками ряд складних задач, пов'язаних зі стабільністю та надійністю електричної мережі, яка повинна адаптуватися до змінної та непередбачуваної природи ВДЕ. Особливо актуальними є задачі дослідження для впровадження ВДЕ в контексті провалів напруги в електричній мережі на продуктивність роботи вітрової електростанції, оскільки вітрова енергія є одним з найперспективніших та найбільш розвинутих видів ВДЕ в Україні.

Провали напруги в електричній мережі - це тимчасові зниження напруги в електричній мережі, які можуть бути спричинені різними факторами, такими як перевантаження, короткі замикання, атмосферні розряди, пошкодження ліній, помилки операторів тощо. Провали напруги можуть мати негативний вплив на продуктивність роботи вітрової електростанції, оскільки вони можуть призвести до зниження вихідної потужності, збоїв у роботі обладнання, втрати синхронізації з мережею, збільшення механічних навантажень на вітрогенератори, зменшення терміну служби компонентів тощо. Тому, дослідження та розробка ефективних методів захисту, контролю та управління вітрової електростанції в умовах провалів напруги є важливими для підвищення її надійності та ефективності.

Однією з можливих задач дослідження для впровадження ВДЕ в контексті провалів напруги в електричній мережі на продуктивність роботи вітрової електростанції є аналіз впливу провалів напруги на динамічні характеристики вітрової електростанції, такі як вихідна потужність, кут нахилу лопатей, швидкість обертання ротора, струми та напруги в генераторі, реактивна потужність тощо. Ця задача передбачає моделювання різних сценаріїв провалів напруги з урахуванням їх тривалості, глибини, форми, частоти, локації тощо, а також аналізу динамічної поведінки вітрової електростанції за допомогою

математичних та комп'ютерних методів. Ця задача дозволить визначити оптимальні параметри та режими роботи вітрової електростанції, які забезпечать її стабільність та безпеку в умовах провалів напруги, а також розробити відповідні алгоритми та пристрої для захисту, контролю та управління вітрової електростанції.

1.3. Основні технічні характеристики ВДЕ

Згідно аналізу літератури [34, 35] основні технічні характеристики ВДЕ поділено на групи.

Потенціал та ресурси - показники, які визначають кількість енергії, яку можна отримати з джерела на визначеній місцевості або регіоні. Потенціал - це теоретична максимальна кількість енергії, яка може бути вироблена з джерела, а ресурс - це практична кількість енергії, яка може бути використана з урахуванням технічних, економічних та екологічних обмежень. Потенціал та ресурси ВДЕ залежать від природних умов, таких як сонячна радіація, швидкість вітру, висота хвиль, температура ґрунту тощо, а також від рівня розвитку технологій, які дозволяють перетворювати енергію в корисну форму.

Ефективність та продуктивність - показники, які визначають ступінь використання енергії, яка надходить від джерела, для виробництва електроенергії, тепла або палива. Ефективність - це відношення кількості виробленої енергії до кількості спожитої енергії, а продуктивність - це відношення кількості виробленої енергії до кількості використаного ресурсу. Ефективність та продуктивність ВДЕ залежать від типу та якості обладнання, яке використовується для перетворення енергії, а також від умов експлуатації та обслуговування.

Надійність та доступність - показники, які визначають стабільність та регулярність постачання енергії від джерела до споживача. Надійність - це здатність джерела енергії працювати без збоїв та відмов, а доступність - це частка часу, коли джерело енергії здатне виробляти енергію на необхідному рівні. Надійність та доступність ВДЕ залежать від характеру та мінливості природних

процесів, які є джерелами енергії, а також від системи зберігання, транспортування та розподілу енергії.

Екологічність та соціальна відповідальність - показники, які визначають вплив джерела енергії на навколишнє середовище та суспільство. Екологічність - це ступінь забруднення або зниження якості навколишнього середовища внаслідок виробництва, використання або утилізації енергії, а соціальна відповідальність - це ступінь задоволення потреб та інтересів людей, які пов'язані з джерелом енергії. Екологічність та соціальна відповідальність ВДЕ залежать від впливу джерела енергії на клімат, біорізноманіття, здоров'я, безпеку, економіку, культуру, освіту тощо.

Потужність - це максимальна кількість електричної енергії, яку може виробляти вітрогенератор за певних умов вітру. Потужність залежить від розміру та форми лопатей, швидкості обертання ротора, типу генератора та інших факторів. Потужність вітрогенераторів сягає від декількох ват до декількох мегават.

Надійність - це здатність вітрогенератора працювати без збоїв та відмов протягом тривалого часу. Надійність вітрогенераторів залежить від якості матеріалів, конструкції, умов експлуатації, обслуговування та ремонту. Надійність вітрогенераторів може бути виміряна за допомогою таких показників, як середній час безвідмовної роботи, середній час відновлення, коефіцієнт готовності тощо.

Згідно аналізу літератури сформовано ідею, мету та завдання дослідження.

Ідея дослідження. Модель системи індукційного генератора з подвійним живленням (DFIG), в якій силовий електронний інтерфейс контролює струми ротора для досягнення змінної швидкості, необхідної для максимального захоплення енергії при змінному вітрі.

Мета дослідження. Розробка способу зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.

До завдань віднесені:

1. Аналіз необхідності впровадження ВДЕ.

2. Дослідження впливу впровадження ВДЕ на роботу електрообладнання.
3. Вплив симетричних і асиметричних провалів напруги на вітрові турбіни.
4. Розробка способу зменшення впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.
5. Підготовка висновків щодо впливу провалів напруги на роботу вітрової електростанції.

Висновки до розділу 1: 1. Зроблено аналіз впровадження відновлюваних джерел енергії, а саме: сонячної енергетики, гідроенергетики, геотермальної енергетики, біоенергетики, вітроенергетики.

2. Визначено головні переваги відновлювальних джерел енергії, а саме: екологічність, надійність, тощо.

3. Визначено головні недоліки використання ВДЕ, а саме: залежність від погодних умов, займання великих територій, тощо.

4. Для подальшого дослідження вибрано ВЕС в якості розподіленої генерації.

РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ВПРОВАДЖЕННЯ ВДЕ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

2.1 Якість електричної енергії

Якість електроенергії – це показники відповідності напруги, частоти та форми синусоїди мережі електропостачання встановленим параметрам. Нормовану якість електроенергії визначають як постійну напругу живлення, яка залишається в межах заданого діапазону, постійну частоту змінного струму, близьку до номінального значення. Постачальник електричної енергії повинен забезпечувати споживачів електроенергією відповідної якості. Спотворення параметрів якості електроенергії виникає при роботі споживачів з нелінійними характеристиками та неправильним завантаженням фаз. Якість електроенергії є сумісною між тим, що виходить з електричної розетки, і навантаженням, яке до неї підключено [36]. Термін використовується для опису електроенергії, яка приводить в рух електричне навантаження, і здатності навантаження функціонувати належним чином. Без належної потужності електричний пристрій (або навантаження) може працювати неправильно, передчасно вийти з ладу або взагалі не працювати. Існує багато причин, через які електроенергія може бути низької якості, і багато інших причин такої низької якості електроенергії.

Електроенергетика включає в себе виробництво, передачу, та розподіл електроенергії до кінцевого споживача. Струм розподіляється по системі електропроводки кінцевого споживача, поки не досягне навантаження. Складність системи розподілу електроенергії від точки виробництва до точки споживання в поєднанні з коливаннями погоди, виробництва, попиту, типу навантаження та інших факторів створює можливості для погіршення якості електроенергії.

Джерела низької якості електроенергії можна поділяють на дві групи [37, 38]:

- фактичні навантаження, обладнання та компоненти
- системи передачі та розподілу.

Низька якість, як правило, спричинена перешкодами в лінії живлення, такими як імпульси, пориви, падіння та перепад напруги, дисбаланс напруги та струму, миттєві переривання та спотворення гармонік. Класифікація якості електроенергії Міжнародної електротехнічної комісії (ІЕС) включає втрату балансу потужності як джерело перешкод. Причиною низької якості електроенергії є гармоніки та реактивна потужність. Напівпровідникове керування потужністю змінного струму за допомогою швидкодіючих вимикачів є основним джерелом гармонік, тоді як нелінійні навантаження сприяють надмірному споживанню реактивної потужності від джерела. Це призводить до таких наслідків, як тривалі простої виробництва, збоїв в роботі приладів і скорочення терміну експлуатації обладнання [37].

Параметри якості електроенергії згідно ДСТУ EN 50160:2014 [38] - це сукупність властивостей електроенергії, які визначають ступінь її придатності для використання за призначенням. Цей стандарт установлює терміни та значення для основних характеристик напруги в точках приєднання користувачів до електричних мереж змінного струму низької, середньої та високої напруги загального призначення в нормальних умовах експлуатування. Основні параметри якості електроенергії за цим стандартом включають:

- значення номінальної напруги та її відхилення від номінального значення;
- частоту напруги та її відхилення від номінального значення;
- коливанням напруги (показник флікера (мерехтіння));
- складову зворотної послідовності напруги;
- гармонічні спотворення напруги;
- випадкові події з напругою, такі як переривання, провали, перенапруги, перепади тощо.

Для кожного параметра стандарт визначає норми або орієнтовні значення, в межах яких можна знайти очікувані характеристики напруги в будь-якій точці живлення електричних мереж загального призначення.

2.1.1 Номінальна напруга

Номінальна напруга - це напруга, за якої електрообладнання або електрична мережа призначені для роботи. Відхилення напруги є показником відхилення фактичної напруги в усталеному режимі роботи системи електропостачання від її номінального значення. Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги дорівнюють відповідно ± 10 і $\pm 15\%$ від номінального значення напруги, тобто при номінальній напрузі 230 В, нормально допустиме відхилення напруги становить ± 23 В, а гранично допустиме - $\pm 34,5$ В.

2.1.2 Частота напруги

Частота напруги - це кількість повних коливань напруги за одиницю часу, яка вимірюється в герцах (Гц). В Україні номінальна частота напруги дорівнює 50 Гц. Відхилення частоти - це відмінність фактичної частоти напруги від її номінального значення. Відхилення частоти може бути спричинене нерівномірним навантаженням, змінами в режимах роботи електростанцій, перехідними процесами в електричних мережах тощо. Відхилення частоти впливає на якість роботи електрообладнання, зокрема на швидкість обертання електродвигунів, на точність синхронізації мереж та генераторів тощо.

Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, нормально допустимі і гранично допустимі значення відхилення частоти дорівнюють відповідно $\pm 0,2$ Гц і $\pm 0,4$ Гц від номінального значення частоти. Це означає, що частота напруги в електричних мережах загального призначення повинна знаходитися в межах від 49,6 Гц до 50,4 Гц в нормальному режимі роботи і в межах від 49,4 Гц до 50,6 Гц в граничному режимі роботи. Якщо частота напруги виходить за межі гранично допустимих значень, то це вважається порушенням якості електроенергії.

2.1.3. Коливання напруги

Коливання напруги - це зміни ефективного значення напруги електропостачання відносно її номінального значення, які виникають в усталеному режимі роботи системи електропостачання. Коливання напруги створюються через зміну навантаження, перемикання в електричних мережах, роботу нелінійних споживачів тощо. Коливання напруги можуть впливати на якість роботи електрообладнання, а саме на енергоефективність, надійність, довговічність, тепловий режим тощо.

Флікер є зоровим явищем, яке полягає в сприйнятті людиною мерехтіння світлового потоку ламп при коливаннях напруги. Флікер може бути вимірний за допомогою приладів, які оцінюють ступінь мерехтіння за шкалою від 0 до 1, де 0 означає відсутність мерехтіння, а 1 - максимальне мерехтіння . Флікер викликає незадоволення, дискомфорт, роздратування, втому, головний біль, порушення концентрації у людей, які піддаються його впливу .

Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, нормально допустимі і гранично допустимі значення коливань напруги та флікера в електричних мережах загального призначення залежать від рівня напруги, частоти сигналу та тривалості спостереження . Наприклад, для мереж низької напруги (230/400 В) нормально допустимі значення коливань напруги дорівнюють $\pm 10\%$ від номінального значення напруги, а гранично допустимі - $\pm 15\%$. Нормально допустиме значення флікера дорівнює 0,35, а гранично допустиме - 0,65. Якщо коливання напруги та флікер виходять за межі гранично допустимих значень, то це вважається порушенням якості електроенергії.

2.1.4. Напруга зворотної послідовності

Складова зворотної послідовності напруги - це компонент напруги, який має протилежний напрямок вектору від складової прямої послідовності напруги . Складова зворотної послідовності напруги виникає внаслідок асиметрії

навантаження, перехідних процесів, коротких замикань тощо. Складова зворотної послідовності напруги впливає на роботу електрообладнання, а саме на стабільність обертання асинхронних двигунів, на нагрівання трансформаторів, на ізоляцію, тощо.

Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, нормально допустимі і гранично допустимі значення складової зворотної послідовності напруги в електричних мережах загального призначення залежать від рівня напруги, частоти сигналу та тривалості спостереження. Наприклад, для мереж низької напруги (230/400 В) нормально допустиме значення складової зворотної послідовності напруги дорівнює 2% від номінального значення напруги, а гранично допустиме - 3% .

Для зменшення складової зворотної послідовності напруги необхідно виявити і усунути причини її виникнення, а також застосувати заходи для компенсації її впливу на електрообладнання. Для цього використовують наступні методи:

- балансування навантаження, що полягає в рівномірному розподілі навантаження між фазами, щоб зменшити асиметрію напруги і струму в мережі;
- компенсація реактивної потужності, що полягає в зменшенні реактивної складової струму в мережі, для підвищення коефіцієнту потужності і зменшення втрат напруги в лініях (для цього використовують конденсаторні батареї, синхронні компенсатори, статичні джерела реактивної потужності тощо);
- застосування пристроїв, які можуть відсікати, перетворювати або стабілізувати напругу в мережі, щоб знизити рівень гармонік, перехідних процесів, коливань тощо.

До пристроїв, що стабілізують напругу в мережі належать:

- фільтри різних типів (активні, пасивні, гібридні);
- трансформатори з різними з'єднаннями обмоток (зірка, трикутник, зігнута зірка тощо);
- стабілізатори напруги різних класів (сервоприводні, електронні, ферорезонансні тощо).

2.1.5. Гармонічні спотворення напруги

Гармонічні спотворення напруги є відхиленням форми хвилі напруги від синусоїдальної за рахунок наявності в ній додаткових складових вищих частот, які є кратними основній частоті. Гармонічні спотворення виникають через роботу нелінійних споживачів, а саме випрямлячів, інверторів, комп'ютерів, енергозберігаючих ламп тощо, перехідні процеси в електричних мережах, резонансні явища тощо. Гармонічні спотворення напруги впливають на якість роботи електрообладнання. Збільшуються втрати потужності, нагрівання струмоведучих частин, пошкодження ізоляції, перешкоди в системах керування та захисту, помилки в вимірюваннях тощо.

Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, нормально допустимі і гранично допустимі значення гармонічних спотворень напруги в електричних мережах загального призначення залежать від рівня напруги, порядку гармоніки та тривалості спостереження. Наприклад, для мереж низької напруги (230/400 В) нормально допустиме значення гармонічної складової напруги другого порядку дорівнює 2% від номінального значення напруги, а гранично допустиме - 3% . Нормально допустиме значення сумарної гармонічної складової напруги дорівнює 8% від номінального значення напруги, а гранично допустиме - 10% .

Для того, щоб зменшити гармонічні спотворення напруги, використовують наступні методи:

- використання гармонічних фільтрів;
- використання компенсаторів гармонік;
- використання трансформаторів зі спеціальним підключенням обмоток.

Фільтри гармонік можуть відсікати гармонічні складові напруги певних порядків, щоб покращити форму хвилі напруги. Гармонічні фільтри бувають пасивними, активними або гібридними. Пасивні фільтри складаються з реактивних елементів, які створюють резонансні кола на частотах гармонік. Активні фільтри використовують електронні схеми, які генерують струми,

протилежні гармонічним струмам в мережі. Гібридні фільтри поєднують в собі пасивні і активні фільтри для підвищення ефективності фільтрації.

В таблиці 2.1 вказано допустиму величину гармонік, включно до 25-ї.

Таблиця 2.1 - Величини напруг окремих гармонік до 25-го порядку в точках приєднання від номінальної напруги [38]

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Непарні гармоніки, які не діляться на 3		Непарні гармоніки, які діляться на 3			
Звичайний номер h	U_h у % U_n	Звичайний номер h	U_h у % U_n	Звичайний номер h	U_h у % U_n
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Компенсатори гармонік є пристроями які компенсують гармонічні складові напруги шляхом введення додаткових складових напруги, які знижують рівень гармонік в мережі. Компенсатори гармонік поділяють на статичні та динамічні. Статичні компенсатори використовують конденсатори, реактори і резистори, які підключаються до мережі за допомогою тиристорів. Динамічні компенсатори використовують інвертори, які перетворюють постійну напругу в змінну напругу з потрібною формою хвилі.

Використання трансформаторів з різними з'єднаннями обмоток є методом, який дозволяє зменшити гармонічні спотворення напруги шляхом вибору оптимального з'єднання обмоток трансформатора, яке забезпечує найменше передавання гармонік від первинної до вторинної обмотки.

2.2. Основні типи електрообладнання в електричній мережі і залежність їх характеристик від якості електричної енергії

Основні типи електрообладнання в електричній мережі згідно [38] класифікують за такими критеріями:

- за призначенням:
 - для генерації:
 - генератори;
 - сонячні панелі;
 - паливні елементи;
 - для передач:
 - лінії електропередач;
 - кабельні лінії;
 - розподільчі пристрої;
 - для розподілу:
 - розподільчі пристрої;
 - підстанції,
 - комутаційні апарати;
 - для перетворення:
 - трансформатори;
 - інвертори;
 - випрямлячі;
 - перетворюючі агрегати;
 - для захисту:
 - пристрої релейного захисту;
 - комутаційна апаратура;
 - захисне заземлення;
 - блискавкозахист.
 - споживач електричної енергії.
- за рівнем напруги:

- низьковольтне (до 1 кВ);
- середньої напруги (від 1 кВ до 35 кВ),
- високої напруги (від 110 кВ),
- за типом струму:
 - постійного струму (DC);
 - змінного струму (AC);
 - змішаний (AC+DC).

Якість електроенергії негативно впливає на роботу електрообладнання призначеного для генерації, передачі, розподілу, перетворення, споживання та захисту. Для електрообладнання генерації електроенергії, електроенергія неправильної якості викликає перевантаження, перегрівання, вібрацію, пошкодження ізоляції, нестабільність частоти, зниження продуктивності тощо [40, 41].

Для ліній електропередачі, невідповідна якість електроенергії викликає втрати потужності, перехідні перешкоди, короткі замикання, перенапруги, резонансні явища, електромагнітні завади тощо [41, 42].

Для електрообладнання розподілу електроенергії, такого як підстанції, негативним впливом якості електроенергії є надмірне навантаження, несправність комутаційної апаратури, помилки в керуванні та захисті, зниження надійності тощо [43].

Для трансформаторів, невідповідна якість електричної енергії викликає нерівномірний розподіл напруги, спотворення гармонік, перенапруги, перехідні процеси, пошкодження ізоляції, збільшення втрат потужності тощо.

Для електричних машин зниження параметрів якості електроенергії викликає зниження ефективності, перегрівання, вібрацію, пошкодження ізоляції, нестабільність обертання, збільшення струму пуску тощо.

Для електрообладнання захисту, такого як вимикачі, реле, запобіжники, невідповідна якість електроенергії викликає спрацьовування захисту без причини, невідповідність характеристик захисту, зниження чутливості захисту, збої в сигналізації та вимірюваннях тощо.

2.3. Вітрові електростанції. Типи та основні технічні характеристики

Вітрова енергія використовується для отримання корисної роботи. Сьогодні енергія вітру використовується для виробництва електроенергії. Електрична енергія виробляється повністю за допомогою вітрових турбін, які об'єднані у вітрові електростанції та підключені до електричної мережі.

Глобальна атмосфера може розглядатися як тепловий двигун, в якому повітряні маси переносяться через різні теплові потенціали. Цей тепловий двигун приводиться в дію сонцем. Вода є найважливішим енергоносієм в атмосфері, оскільки вона існує в атмосфері в усіх трьох станах: пара, краплі і лід. Тому її прихована теплота при зміні стану агрегації з однієї фази в іншу є домінуючим впливом на погоду. Земля є сферою, тому при наближенні від екватора до полюсів загальне опромінення сонцем зменшується все більше і більше. Відповідно, в атмосфері в екваторіальних зонах є надлишок енергії, а в районі полюсів - дефіцит. Для вирівнювання цього дисбалансу тепло переноситься повітряним потоком від екватора до південної і північної півкуль. Це робиться за допомогою обміну повітряних мас глобальних вітрових систем.

В кожній півкулі є три різні зони: тропічні широти, помірні широти і полярні широти. Тропічні широти по обидва боки від екватора знаходяться між поясом низького тиску (тропічний пояс безвітря) і субтропічним поясом високого тиску. Цей регіон також називається поясом Коней і знаходиться вздовж 30° широти. У межах цього регіону формується циркуляція: гаряче тропічне повітря піднімається на екваторі і тече в вищих шарах атмосфери в бік полюсів, при цьому воно все більше і більше відхиляється на схід через обертання землі. Близько 30° широти повітря опускається і тече назад до екватора в нижніх шарах атмосфери, спричиняючи пасатні вітри. Дві системи пасатних вітрів зустрічаються в тропіках, замикаючи контур циркуляції вітрів.

Згідно поданої вище інформації, зроблено висновок про доцільність використання вітру, який є перспективним джерелом для виробництва електроенергії.

У 2022 році вітер виробив понад 2000 ТВт-год електроенергії, що становило понад 7% світової електроенергії [44]. Світова встановлена потужність вітрової енергії перевищила 800 ГВт [45]. Для досягнення цілей Паризької угоди щодо обмеження кліматичних змін, аналітики розрахували, що вітрова енергетика повинна розширюватися понад 1% від загального виробництва електроенергії на рік [46].

Енергія вітру вважається стійким, відновлюваним джерелом енергії та має набагато менший вплив на навколишнє середовище порівняно зі спалюванням викопного палива. Енергія вітру є мінливою, тому для забезпечення надійного постачання електроенергії їй потрібні накопичувачі або інші джерела енергії, які можна диспетчеризувати. Наземні (берегові) вітрові електростанції мають більший візуальний вплив на ландшафт, ніж більшість інших електростанцій на вироблену енергію [47]. Вітрові електростанції, розташовані в морі, мають менший візуальний вплив та вищі коефіцієнти потужності, хоча вони дорожчі [48]. Енергія вітру є одним з найдешевших джерел електроенергії на одиницю виробленої енергії. Нові наземні вітрові електростанції дешевші, ніж нові вугільні або газові станції.

Регіони у більш високих північних або південних широтах мають найвищий потенціал вітрової енергії. [49]. Загалом в деяких регіонах регіонів виробництво вітрової енергії є вищим у нічний час та взимку, коли вихід сонячної енергії низький. Тому комбінацію вітрової та сонячної енергетики прийнято в багатьох країнах [50].

Завдяки оцінці вітрових ресурсів можна оцінити потенціал вітрової енергії в усьому світі, за країною чи регіоном або для конкретного місця. Глобальний атлас вітру, наданий Технічним університетом Данії у партнерстві зі Світовим банком, надає глобальну оцінку потенціалу вітрової енергії [52]. На відміну від «статичних» атласів вітрових ресурсів, які усереднюють швидкість вітру та щільність потужності за кілька років, інструменти, забезпечують моделювання швидкості вітру та вихідної потужності різних вітрових турбін у часі, тобто моделі з погодинною роздільною здатністю. Загальна кількість економічно

видобутої енергії вітру значно перевищує нинішнє споживання енергії людини з усіх джерел [53]. Сила вітру змінюється, і середнє значення для певного місця вказує на кількість енергії, яку може виробити вітрогенератор. Щоб оцінити перспективні об'єкти для вітрових електростанцій, функція розподілу ймовірностей часто підлаштовується під спостережувані дані швидкості вітру.

Глобальну карту швидкості вітру в Україні зображено на рисунку 2.1 [51].

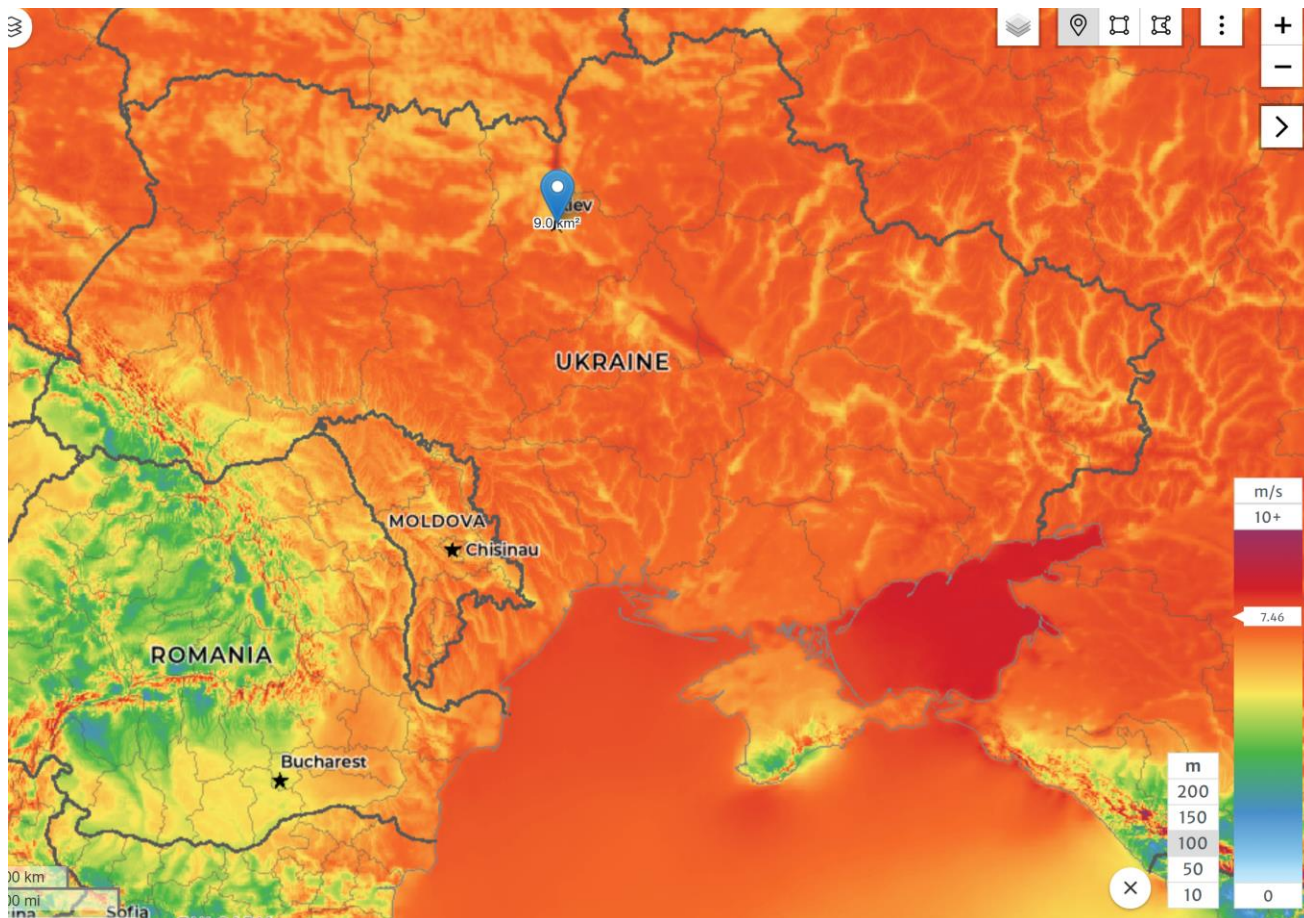


Рисунок 2.1 - Швидкість вітру в м. Київ на 30.11.2023

Більш детальні оцінки потенціалу вітрових ресурсів, що стосуються конкретної ділянки, можна отримати від спеціалізованих комерційних постачальників, і багато великих вітрових розробників мають власні можливості моделювання.

Згідно даних графіку, рисунок 2.2 [51] в порівнянні з іншими випадками швидкості вітру в Києві доцільно використати вітрові турбіни потужністю 3450 кВт.



Рисунок 2.2 – Розрахунок потужності для вітрової установки, згідно географічного розташування та параметрів вітру

Гістограма показує дані вимірювань, тоді як крива є розподілом моделі Релея для тієї самої середньої швидкості вітру. Таким чином, потужність вітру пропорційна третій степені швидкості вітру; доступна потужність збільшується у вісім разів, коли швидкість вітру подвоюється. Зміна швидкості вітру в 2,1544 рази збільшує потужність вітру на один порядок (помножити на 10).

Глобальна кінетична енергія вітру становила в середньому приблизно $1,50 \text{ МДж/м}^2$ за період з 1979 по 2010 рік, $1,31 \text{ МДж/м}^2$ у Північній півкулі та $1,70 \text{ МДж/м}^2$ у Південній півкулі. Атмосфера діє як тепловий двигун, поглинаючи тепло при вищих температурах і виділяючи тепло при нижчих. Процес відповідає за виробництво кінетичної енергії вітру зі швидкістю 206 Вт/м^2 , таким чином підтримуючи циркуляцію атмосфери проти тертя.

У вітрової електростанції окремі турбіни з'єднані між собою системою збору електроенергії середньої напруги (здебільшого $34,5 \text{ кВ}$) [54] і мережею зв'язку. Загалом, відстань $7D$ (у 7 разів більше діаметра ротора вітрової турбіни) встановлюється між кожною турбіною в повністю розробленій вітрової електростанції. На підстанції цей електричний струм середньої напруги підвищується за допомогою трансформатора для підключення до високовольтної системи передачі електроенергії.

Офшорна вітрова енергетика — це вітрові електростанції у великих водоймах, зазвичай у морі. Ці установки можуть використовувати більш часті та сильні вітри, які доступні в місцях водного простору, і мають менший візуальний вплив на ландшафт, ніж наземні проекти. Однак витрати на будівництво та обслуговування значно вищі [58, 59].

Станом на листопад 2021 року вітрова електростанція Hornsea у Великобританії є найбільшою морською вітровою електростанцією у світі з потужністю 1218 МВт .

Близькі до берега офшорні вітрові електростанції можуть бути підключені до мережі змінного струму, а віддалені від берега – до мережі постійного струму [59].

Коли пропускна здатність ліній передачі не відповідає генеруючій потужності, вітрові електростанції змушені виробляти менше свого потенціалу або взагалі припинити роботу в процесі, відомому як скорочення. Хоча це призводить до того, що потенціал відновлюваної генерації залишається невикористаним, це запобігає можливому перевантаженню мережі або ризику.

Вітрова електростанція є сукупністю вітрових турбін в одному місці, призначених для виробництва електроенергії. Земля між турбінами може бути використана для сільськогосподарських або інших цілей. Деякі вітрові електростанції розташовують в морі. Майже всі великі вітрові турбіни мають однакову конструкцію — вітрова турбіна з горизонтальною віссю, що має обертовий ротор із 3 лопатями, прикріплений до гондoli на вершині високої трубчастої вежі. Будову вітрової станції типу Vestas V15 зображено на рисунку 2.3.

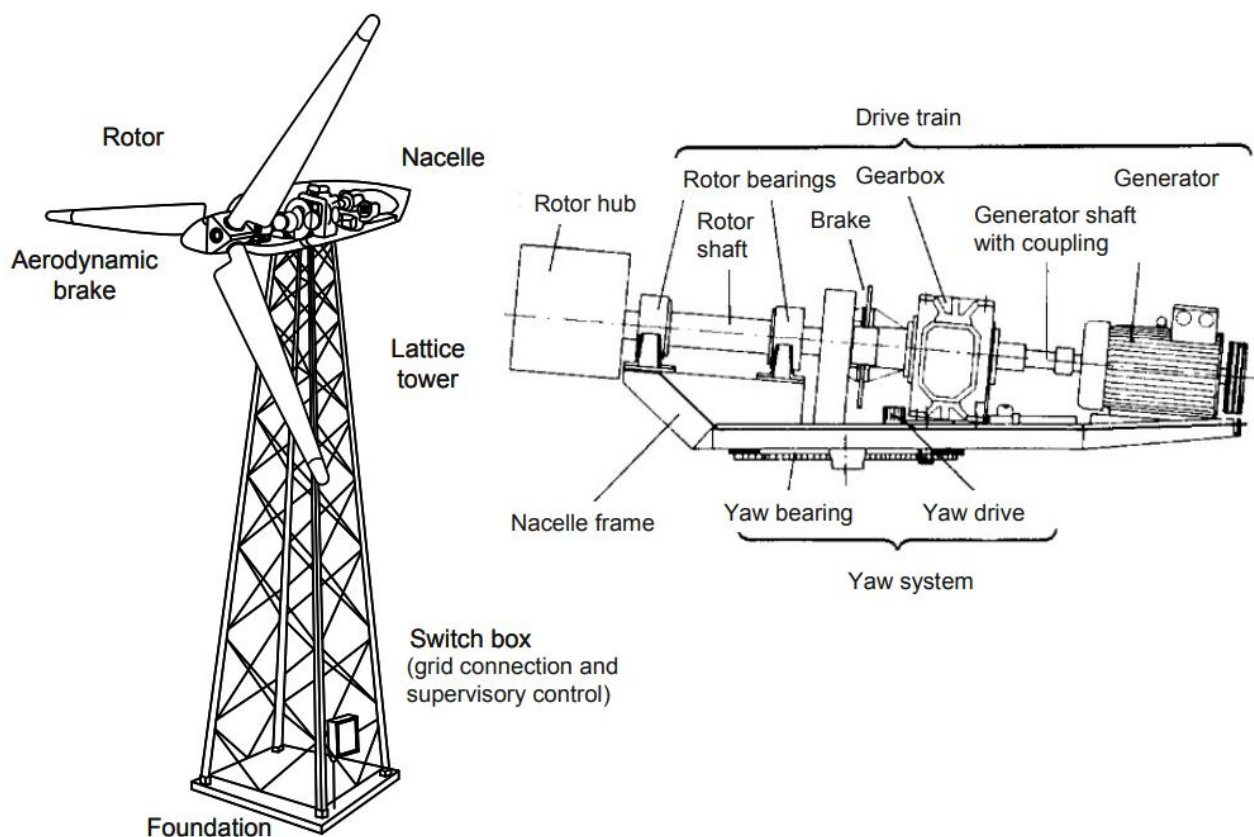


Рисунок 2.3 – Будова вітрової станції Vestas V15 [62]

У вітряках використовують електричні машини з подвійним живленням з неповномасштабними перетворювачами, асинхронні генератори з короткозамкнутим ротором або синхронні генератори (як з постійним, так і з електричним збудженням) з перетворювачами [57].

У 1919 році німецький фізик Альберт Бетц показав, що для гіпотетичної ідеальної машини для вилучення енергії вітру фундаментальні закони збереження маси й енергії дозволяють уловлювати не більше $16/27$ (59%) кінетичної енергії вітру [60]. До цієї межі Беца можна наблизитися в сучасних конструкціях турбін, які можуть досягати 70-80% від теоретичної межі Беца.

Аеродинаміка вітрової турбіни досліджується. Потік повітря на лопатях не такий самий, як потік повітря далеко від турбіни. Сама природа того, як енергія витягується з повітря, призводить до того, що повітря відхиляється турбіною. Це впливає на об'єкти або інші турбіни, розташовані нижче за течією, що називається «ефектом хвилювання». Крім того, аеродинаміка вітрової турбіни на поверхні ротора демонструє явища, які рідко спостерігаються в інших аеродинамічних областях. Форма та розміри лопатей вітряної турбіни визначаються аеродинамічними характеристиками, необхідними для ефективного вилучення енергії з вітру, і міцністю, необхідною для опору силам, що діють на лопаті [61]. Крім конструкції лопатей, конструкція повної вітроенергетичної системи повинна враховувати конструкцію втулки ротора установки, гондоли, конструкції башти, генератора, засобів керування та фундаменту.

Вітрові турбіни є перетворювачами кінетичної енергії потоку повітря в механічну енергію обертання. Для цієї мети підходять два аеродинамічні принципи: підйомна сила і опір. Ротори, що працюють на опорі, досягають лише, помірних коефіцієнтів потужності і не мають великого значення для технічних застосувань, за винятком анемометрів. Основною відмінною ознакою групи роторів, що працюють на підйомній силі, є орієнтація валу ротора. Вітряні турбіни з вертикальною віссю обертання мають перевагу в тому, що вони працюють незалежно від напрямку вітру, тому їм не потрібна система повороту для орієнтації на вітер. Але більші вітрові турбіни цього типу не зарекомендували

себе через недоліки, такі як динаміка і слабкий вітер близько до поверхні землі. Співвідношення між потужністю вітрової електростанції та розміру турбіни показано на рисунку 2.4

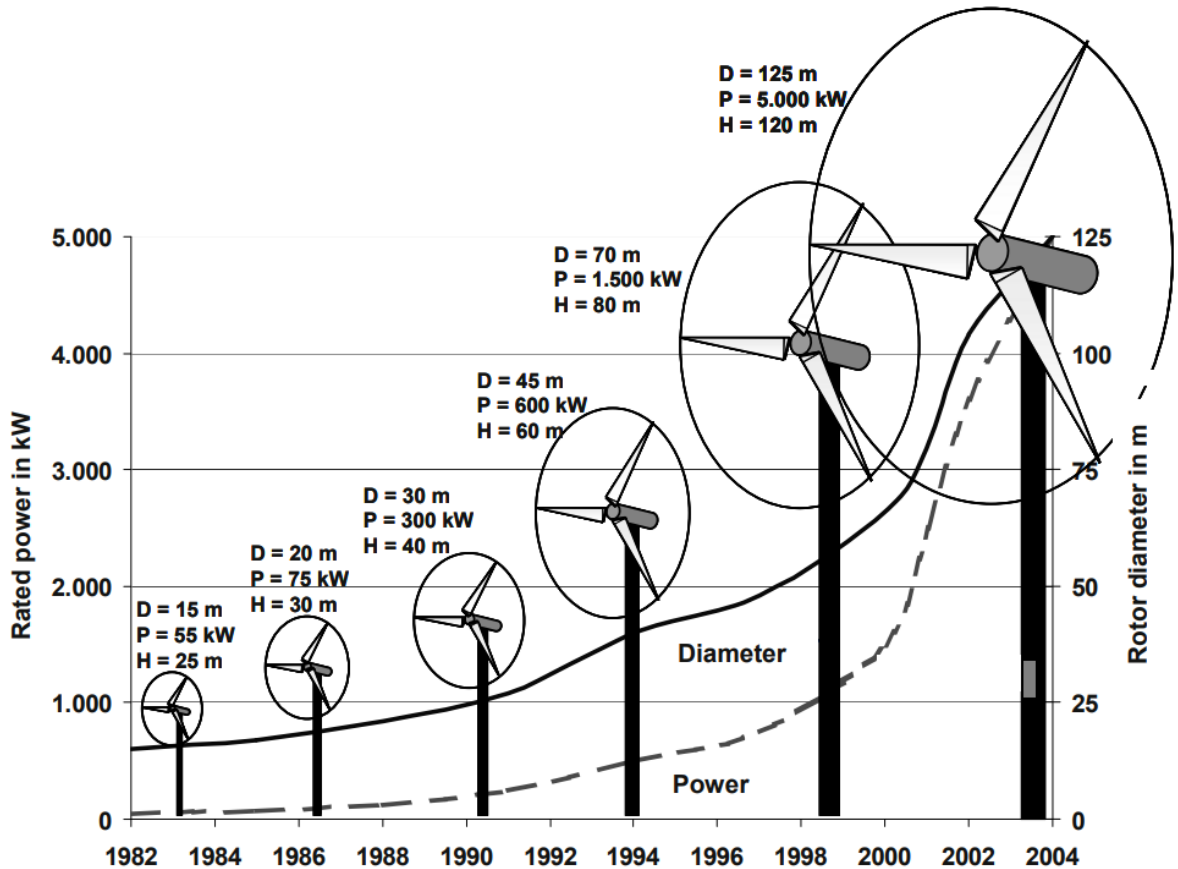


Рисунок 2.4 – Середнє співвідношення між розміром вітрової турбіни та потужністю вітрогенератора [62]

Діаметр ротора був близько 15 м у 1980 році, але сьогодні він перевищує 100 м для машин потужністю від 3 МВт. Спочатку швидкість обертання вітрової турбіни була пов'язана з частотою мережі як для синхронного (SG), так і для асинхронного генератора (ASG, тобто індукційний генератор). Турбіна може видавати максимально можливу кількість енергії тільки за умови, що її швидкість обертання адаптується до змінних швидкостей вітру. Це означає: подвоєння швидкості вітру вимагає подвоєння швидкості обертання турбіни.

Передавальний редуктор вітрових турбін має важливе значення. Він змінює частоту обертання вала до швидкості, необхідної для приведення в рух

робочої машини або генератора. Відповідно змінюється крутний момент. Розмір машини визначає необхідне передавальне відношення. Оскільки максимальне відношення швидкостей на кінці лопаті і відповідна швидкість кінця лопаті більш-менш задані, розмір ротора визначає швидкість ротора, яка, значно нижча, ніж швидкість приводної робочої машини або генератора. Швидкість ротора генератора визначається частотою мережі і кількістю полюсів, особливо для безпосередньо підключених до мережі асинхронних генераторів. Для інших робочих машин діапазон швидкостей впливає з діапазону найкращих ККД, оскільки повинна бути максимізована загальна ефективність системи.

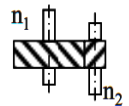
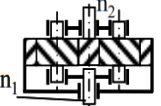
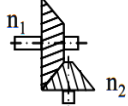
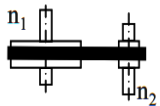
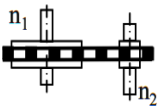
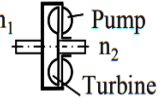
У вітрових станціях поширені трифазні альтернатори (генератори змінного струму). Навіть для спеціальних потреба, які вимагають постійного струму, конфігурація альтернатор/випрямляч з нижчою вартістю замінила генератор постійного струму. Коли трифазний генератор підключений безпосередньо в мережу, яка працює на фіксованій частоті (наприклад, 50 Гц в Європі, 60 Гц в США), кутова швидкість генератора є фіксованою - або майже фіксованою. У цій ситуації можливість виробництва енергії вітряною турбіною буде повністю використана лише для одного значення швидкості вітру. Завдяки високорозвиненій технології перетворювачів сьогодні можливо працювати зі змінною швидкістю генератора навіть для генераторів, підключених до мережі. Це дає краще використання вітряної турбіни; при поривистому вітрі воно також суттєво зменшує механічні напруження в лопатях і валу між турбіною і генератором.

Використовується ремінний привід для оптимізації характеристик крутного моменту-швидкості приводної центробіжної помпи відносно характеристик ротора вітряної турбіни. Ранні вітрові турбіни для виробництва електроенергії, що базувалися на датській концепції з прямим підключенням до мережі, були обладнані двома генераторами. При малій швидкості вітру ремінний привід за редуктором використовувався для передачі потужності до меншого генератора. Пізніше ця концепція була замінена генераторами з перемиканням полюсів. У 1980-х роках гідродинамічні перетворювачі і муфти

використовувалися в декількох великих прототипних вітряних турбінах (наприклад, MOD-0A, WTS-3 і WWG-0600) для гасіння піків навантаження і "ударів" в синхронному генераторі (наприклад, спричинених взаємодією лопаті ротора з хвостовиком башти або коливаннями приводного вала). Це можливо, тому що привідний і приводний вали гнучко з'єднані рідиною. Але недоліки полягають у менших ККД при частковому навантаженні і необхідності додаткових охолоджувачів мастила.

Кутовий редуктор потрібен у системах вітрового насосу, див. таблицю 2.2

Таблиця 2.2 – Типи редукторів вітрових електростанцій [62]

Transmission type	Spur gear	Planetary gear	Bevel gear	Belt drive	Chain drive	Hydrodynamic converter (coupling)
Scheme						
Transmission ratio at wind turbine application	$i = n_1:n_2 \leq 1:5$	$\leq 1:7$	$\leq 1:5$	$\leq 1:3$	$\leq 1:5$	variable
Transmission principle	Form fit	Form fit	Form fit	Friction	Form fit	Hydraulic power transmission
Application	All applications	Electricity generation, > 500 kW	Wind pumping system	Wind pumping system, Danish concept	Historical wind pumps, do yourself	Prototype with synchronous generator
Overload safety mechanism	No, to be realised externally	No, to be realised externally	No, to be realised externally	Yes, slip and slipping	No, to be realised externally	Yes, hydraulic slip in the fluid
Noise generation	high	smaller	high	small	high	small
Efficiency	high	highest	medium	medium	small	High at best point
Remark	Cost effective for smaller WT	Cost effective for big WT	90° angle between shafts	Slip reduces efficiency	Only for low rotational speed	Bad part load efficiency

У 1980-х роках гідродинамічні перетворювачі і муфти використовувалися в декількох великих прототипних вітряних турбінах (наприклад, MOD-0A, WTS-3 і WWG-0600) для гасіння піків навантаження і "ударів" в синхронному генераторі (наприклад, спричинених взаємодією лопаті ротора з хвостовиком башти або коливаннями приводного вала). Це можливо, тому що привідний і приводний вали гнучко з'єднані рідиною. Але недоліки полягають у менших ККД при частковому навантаженні і необхідності додаткових охолоджувачів мастила. Гідродинамічні перетворювачі більше не були потрібні, коли було винайдено АС-DC-АС перетворювачі для вітрових турбін зі змінною швидкістю, що дозволяють швидкості ротора бути незалежною від частоти мережі. Завдяки технічному прогресу гідродинамічні перетворювачі знову використовуються в деяких сучасних вітряних турбінах зі змінною швидкістю ротора, але відносно постійною швидкістю генератора.

На рисунку 2.6 показано способи підключення вітрової електростанції до мережі

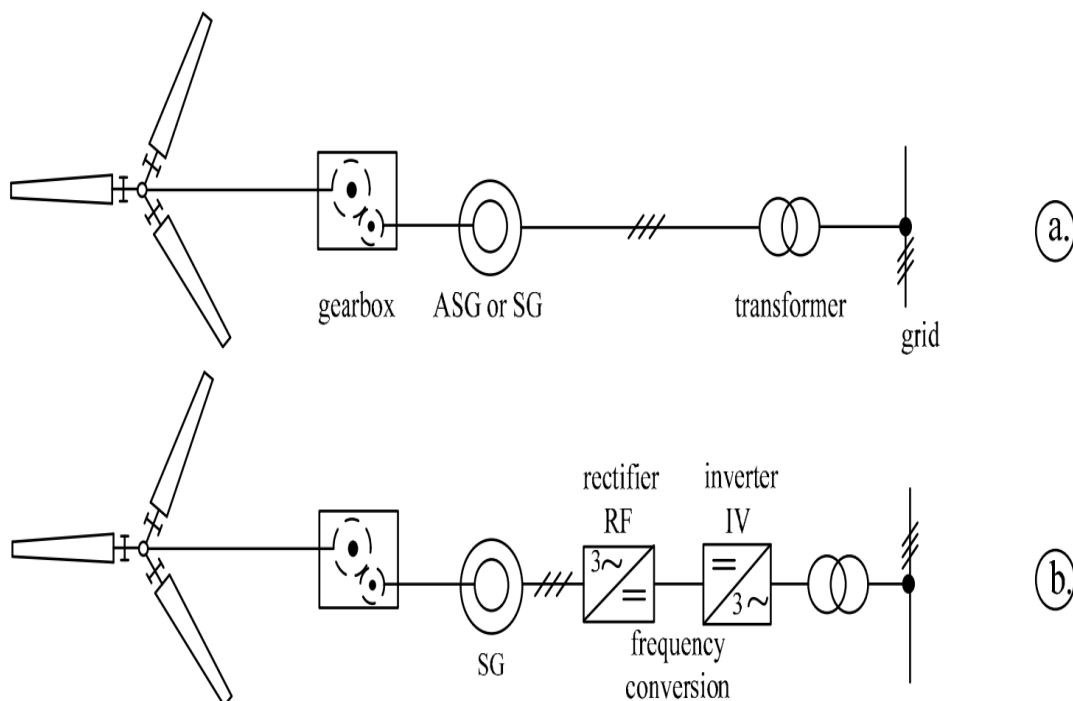


Рисунок 2.6 – Структурна схема підключення вітрової станції до мережі: а) - пряме підключення, б) – підключення через перетворюючий агрегат

2.4. Вплив вітрових електростанцій на якість електричної енергії

Основні впливи вітрових електростанцій на якість електроенергії поділено на такі групи:

- вплив на напругу і частоту;
- вплив на гармоніки і інтергармоніки;
- вплив на комутаційні явища.

Вітрові електростанції викликають зміни напруги і частоти в мережі через їхню змінну вихідну потужність, яка залежить від швидкості і напрямку вітру. Це призводить до коливань напруги, флікера, зниження або підвищення напруги, зміни фази, зміни частоти тощо. Для зменшення цих впливів використовуються методи регулювання напруги і частоти, а саме, системи статичного компенсування реактивної потужності (STATCOM), системи фактора потужності (PF), системи керування напругою (VSC) тощо.

Вітрові електростанції генерують гармоніки і інтергармоніки в мережі через їхні перетворювачі частоти, які використовуються для забезпечення змінної швидкості обертання ротора або для підключення до мережі з різною частотою. Гармоніки і інтергармоніки спотворюють форму хвилі напруги і струму, викликаючи додаткові втрати енергії, перегрівання обладнання, перешкоди для релейного захисту, збої в електроніці тощо. Для зменшення цих впливів використовуються різні методи фільтрації гармонік, такі як пасивні або активні фільтри, трансформатори з роздільними обмотками, багатофазні перетворювачі тощо.

Додатковим впливом вітрових електростанцій є трансїєнтні явища в мережі через їхні перемикання, підключення або відключення, зміни навантаження, короткі замикання, атмосферні розряди тощо. Трансїєнтні явища призводять до перенапруг, струмових ударів, електромагнітних перешкод, пошкодження ізоляції, збоїв в роботі обладнання тощо. Для зменшення цих впливів використовуються методи захисту від перенапруг, такі як розрядники, дроселі, конденсатори, регулятори напруги, системи заземлення тощо.

Висновок до розділу 2: вітрові електростанції мають вплив на якість електроенергії, яка подається в електричну мережу або споживачам, залежно від різних факторів. Для забезпечення високої якості електроенергії необхідно враховувати ці впливи і застосовувати відповідні методи регулювання, фільтрації, захисту та моніторингу. Для цього існують різні стандарти і нормативи, які визначають вимоги до якості електроенергії і процедури її вимірювання і оцінки.

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОБОТИ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1 Вплив провалів напруги в електричній мережі на турбіну вітрової електростанції

Вітрові енергетичні турбіни (ВЕТ) спроможні надавати допоміжні послуги енергосистемі в частині регулювання частоти, напруги та балансу потужності що призводить до необхідності аналізу режимів роботи енергосистеми.

Стандартом МЕК 61400-27-1 для аналізу режимів роботи енергосистем пропонується 4 типи стандартних моделей ВЕТ. Ми розглядаємо тип 3 моделі ВЕТ. Це вітряна турбіна із змінною швидкістю обертання з асинхронним генератором, у якому статор приєднується до мережі безпосередньо, а фазний ротор перед випрямний перетворювач потужності. Цей тип називається вітряною турбіною з асинхронним генератором подвійного живлення. Частота обертання роторів генераторів не залежить від частоти електричного струму загальної електричної мережі. Для дослідження впливу симетричних провалів напруги (тип А) була розроблена модель системи індукційного генератора з подвійним живленням (DFIG) яка є популярною системою. В ній силовий електронний інтерфейс контролює струми ротора для досягнення змінної швидкості, необхідної для максимального захоплення енергії при змінному вітрі.

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.

3.1.1 Силова схема

Електрична схема живлення складається з DFIG, статор якого безпосередньо підключений до мережі через трансформатор, а обмотка ротора підключена через контактні кільця до зворотного перетворювача. З боку мережі

перетворювач підключений до третинної обмотки трансформатора, який подає вироблену електроенергію в мережу середньої напруги 10 кВ через кабель довжиною 20 км. Лінія передачі моделюється за допомогою компонента лінії з розподіленими параметрами, рисунок 3.1

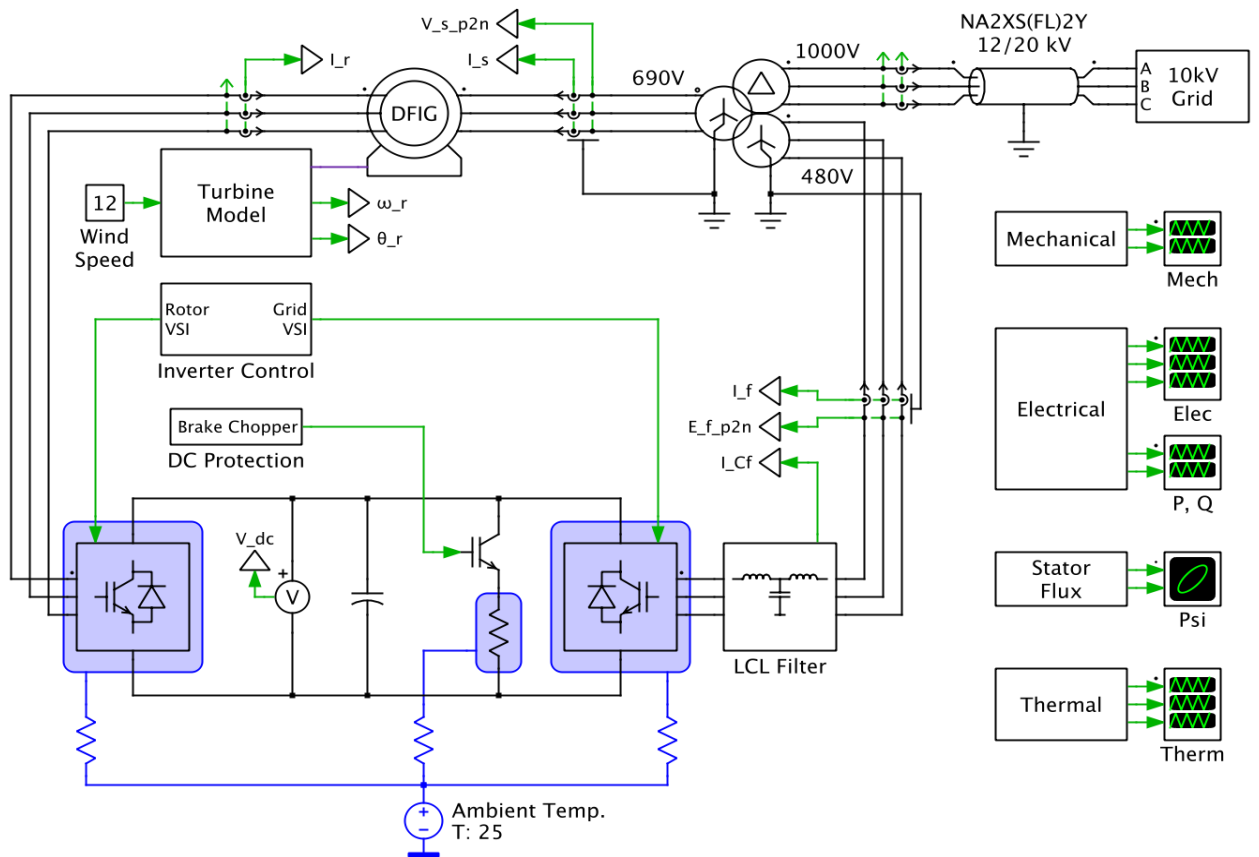


Рисунок 3.1 – Структурна схема лінії передачі

Механічна трансмісія. Ротор машини, коробка передач, втулка та лопаті гвинта разом складають механічну частину вітрової турбіни. Вони пружно пов'язані один з одним, що вносить в систему резонансні коливання, рисунок 3.2

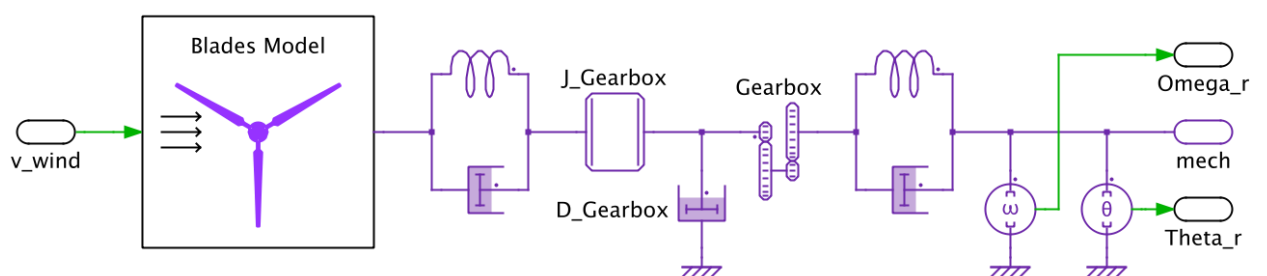


Рисунок 3.2 – Схема використання трансмісії ВЕС

Значення крутного моменту вітру, що прикладається до лопатей турбіни, отримується з оглядової таблиці, де значення змінюється в залежності від вітру та швидкості обертання валу (перетвореного на бік високої швидкості коробки передач).

Схема магнітного трансформатора. Трансформатор із трьома обмотками складається з примітивних компонентів із бібліотеки магнітних компонентів PLECS. Порівняно зі звичайною моделлю, що використовує чисто електричну еквівалентну схему, структура серцевини є більш інтуїтивно зрозумілою для розуміння, і можна моделювати складні нелінійні ефекти, такі як насичення та гістерезис у триланковому ядрі, рисунок 3.3

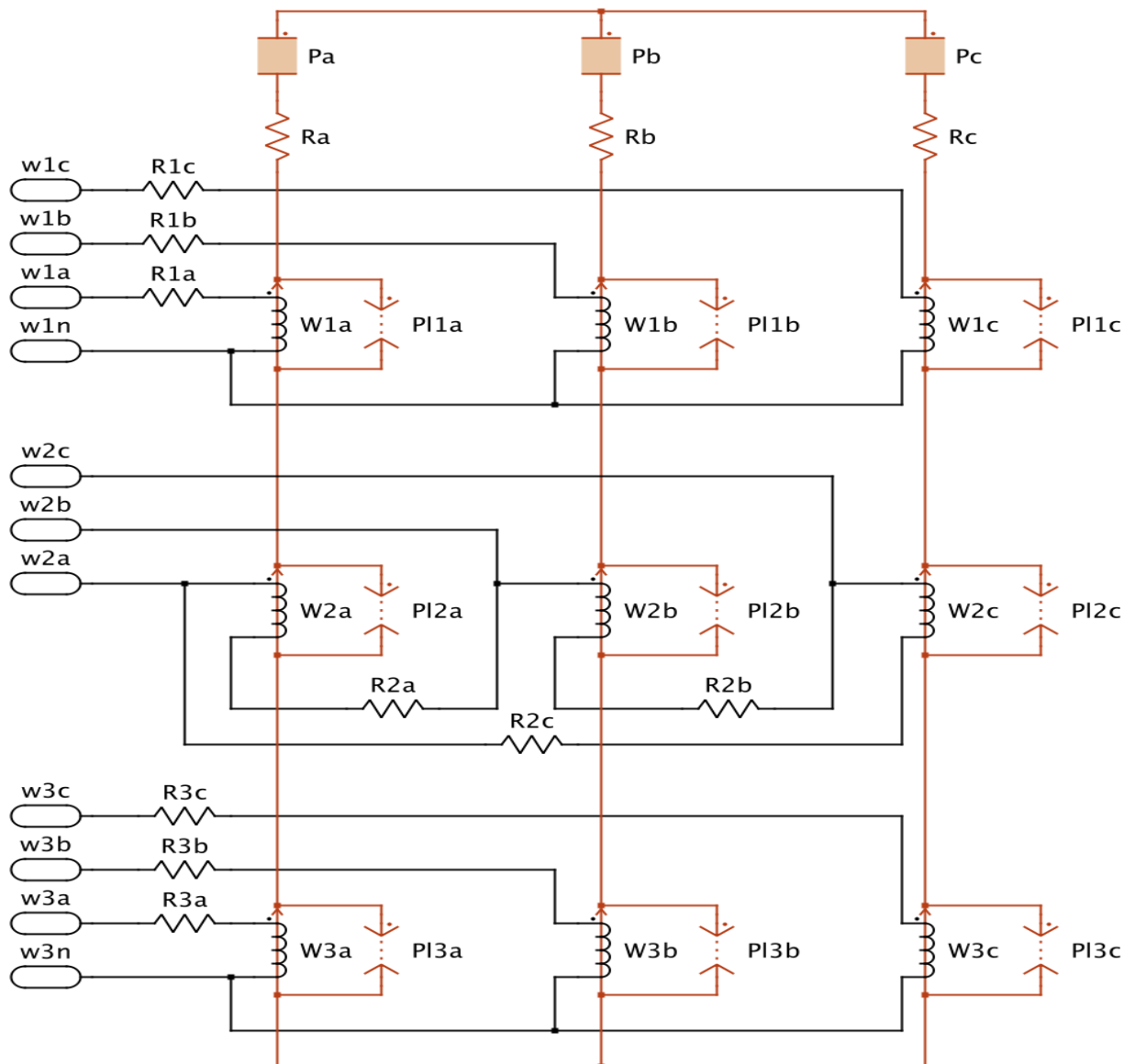


Рисунок 3.3 – Схема магнітного трансформатора

3.1.2 Контроль

Поворотний перетворювач містить окремі частини з боку машини та з боку мережі, які з'єднані одна з одною через конденсатор ланцюга постійного струму. Перетворювач на стороні машини регулює крутний момент DFIG і, таким чином, швидкість обертання за допомогою структури подвійного контуру, де зовнішній контур швидкості генерує опорний сигнал для внутрішнього контуру струму. Контроль струму здійснюється в обертовій системі (d-q) з орієнтацією потоку статора. Крім того, перетворювач на стороні машини також регулює надходження реактивної потужності DFIG. Перетворювач на стороні мережі передає активну потужність від перетворювача на стороні машини в мережу через фільтр LCL і підтримує напругу ланцюга постійного струму на рівні 950 В постійного струму. Для ПІ-регуляторів застосовуються методи активного демпфування, прямого зв'язку, а також інтегратора проти закручування, а перетворювачі працюють за допомогою модуляції просторового вектора ШІМ (SVPWM).

Теплова модель перетворювача може бути змодельована в конфігурації «Усереднена модель» або «Модель із перемиканням тепла». У моделі усередненого перетворювача немає гармонійних компонентів, присутніх у частоті перемикання, і спрощення забезпечує покращену швидкість моделювання. У комутаційній моделі можна досліджувати втрати провідності та втрати на комутацію IGBT, а також вплив системи охолодження.

3.1.3 Симуляція

Коли запускається моделювання, DFIG працює на синхронній швидкості. При $t = 3$ с опорний сигнал швидкості стрибає зі 157 рад/с до 175 рад/с (швидкість ковзання -10%), щоб відстежити пікову вихідну потужність 2 МВт. Потім, незабаром після того, як система переходить в новий збалансований стан, на жорсткій мережі 10 кВ відбувається провал напруги при $t = 12$ с. Ця несправність змодельована як граничний стан, що відповідає найгіршому сценарію, як

визначено Німецьким мережевим кодексом 2007 року. В результаті несправності можна спостерігати перехідний процес із високочастотними коливаннями як в електричній, так і в механічній системах. Після відновлення напруги в мережі система повертається до стабільного стану.

3.1.3 Вплив провалів напруги на DFIG

Дослідження проводились в плані впливу провалу напруги в електричній мережі (тип провалу А). Згідно з чинними нормами, провалом напруги називають короткочасне (від півперіоду до кількох десятків секунд) різке зменшення величини середньоквадратичного значення напруги більш ніж на 10 % від номінального в деякій точці електричної мережі, з подальшим її відновленням до попереднього або близького до нього значення. Для провалу напруги згідно з [63] використовують такі основні характеристики (рисунок 3.4):

- глибина провалу, яку визначають за найменшим значенням напруги під час її провалу;
- амплітуда провалу, яка є відносним найменшим значенням напруги під час її провалу;
- тривалість провалу, яку визначають як час від моменту зменшення напруги нижче від 90 % до моменту, коли під час відновлення вона стає більшою від цього значення.

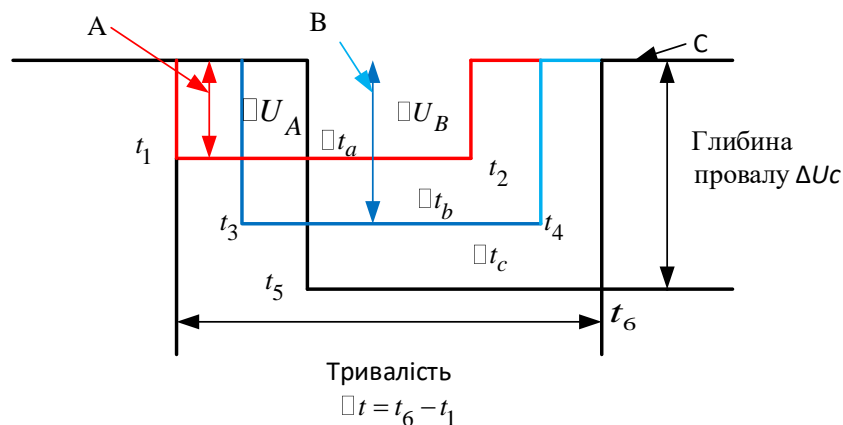


Рисунок 3.4 – Основні характеристики провалу напруги в трифазній системі

де $t_1, t_2, t_3; t_2, t_4, t_6$ - початок та кінець провалів фаз A, B, C відповідно,

t_a, t_b, t_c - тривалість провалів фаз,

$\Delta U_A, \Delta U_B, \Delta U_C$ - глибина провалів.

У трифазних системах електропостачання за початок провалу напруги приймають момент, коли напруга в одній з фаз падає нижче за порогове значення початку провалу напруги (ΔU_A), за закінчення провалу напруги приймають момент, коли напруга у всіх фазах зростає вище порогового значення закінчення провалу напруги (ΔU_C) (рисунок 3.5)

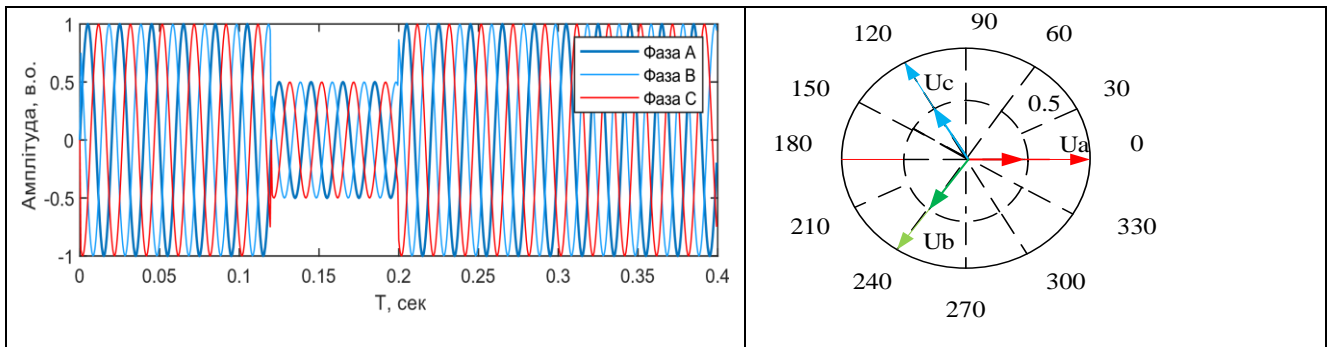


Рисунок 3.5 - Збалансований провал напруги типу А та його векторна діаграма

На рис. 3.6 показана принципова схема змодельованої мережі

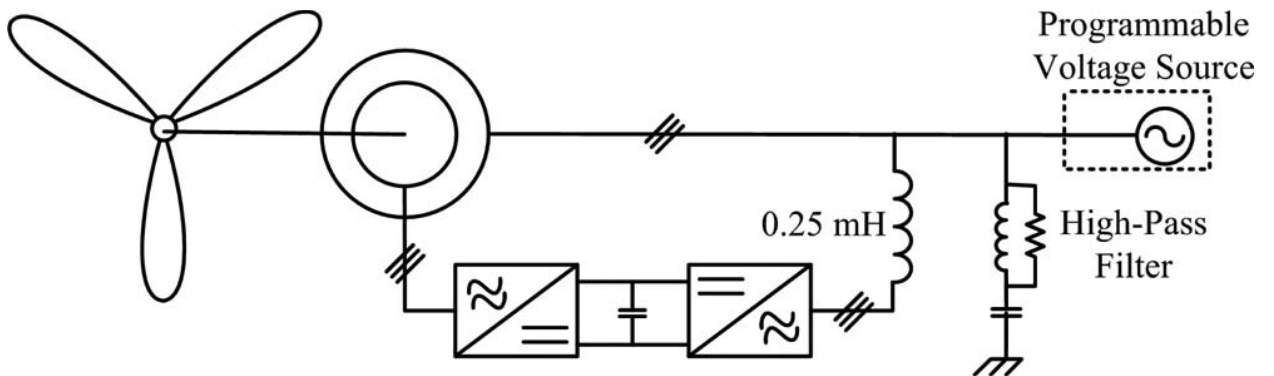


Рисунок 3.6 - Принципова схема змодельованої мережі

3.2 Вплив симетричних і асиметричних провалів напруги на вітрові турбіни на основі концепції DFIG

Концепція DFIG (електричної машини з подвійним живленням) має кілька переваг порівняно з генераторами з фіксованою швидкістю, включаючи максимальне захоплення потужності, знижені механічні навантаження на турбіну та знижений акустичний шум.

У минулому рівень поширення енергії вітру був надзвичайно малим порівняно зі звичайними системами генерації, а так звані мережеві кодекси не включали жодних вимог до підключення систем перетворення енергії вітру. Тому вітрогенератори було дозволено відключати від мережі під час несправності за допомогою активного опору. Однак такий підхід може спричинити серйозні проблеми зі стабільністю в електромережах із високим рівнем інтеграції систем вітрової генерації.

Щоб уникнути цієї проблеми, системні оператори багатьох країн мають нещодавно встановлено більш суворі вимоги до підключення вітряних генераторів, які інтегровані в систему передачі або розподілу мережі [63]. Зокрема, сучасні мережеві кодекси визначають профілі напруги-часу, для яких вітрові електростанції повинні залишатися підключеними до мережі, що зазвичай називають вимогами до проходження через несправність.

В Україні таким мережевим кодексом є Паспорт підприємства [64]. В якому встановлюються єдині вимоги щодо визначення необхідних умов і алгоритмів врахування потужних вітрових електростанцій (ВЕС) та сонячних електричних станій (СЕС) при налаштуванні протиаварійних автоматичних пристроїв, призначених для запобігання порушень стійкості у небезпечних перетинах ОЕС України на режим роботи яких вони мають вплив.

На рис. 3.7 наведені вимоги щодо роботи під час падінь напруги для ВЕС потужністю більше 2 МВт. Представлені вимоги повинні бути дотримані у разі симетричних та несиметричних коротких замикань, тобто вимоги повинні дотримуватись у випадку одно-, дво-, або трифазних коротких замикань:

- **Область А:** електростанція повинна залишатися підключеною до мережі і підтримувати нормальну генерацію.

- **Область В:** електростанція повинна залишатися підключеною до мережі. Електростанція повинна забезпечувати максимальне підтримання рівня напруги шляхом контрольованої генерації реактивної потужності, з метою сприяння стабілізації напруги у проектних межах, які дозволяються завдяки використанню наявних технологій.

- **Область С:** Дозволено відключення електростанції.

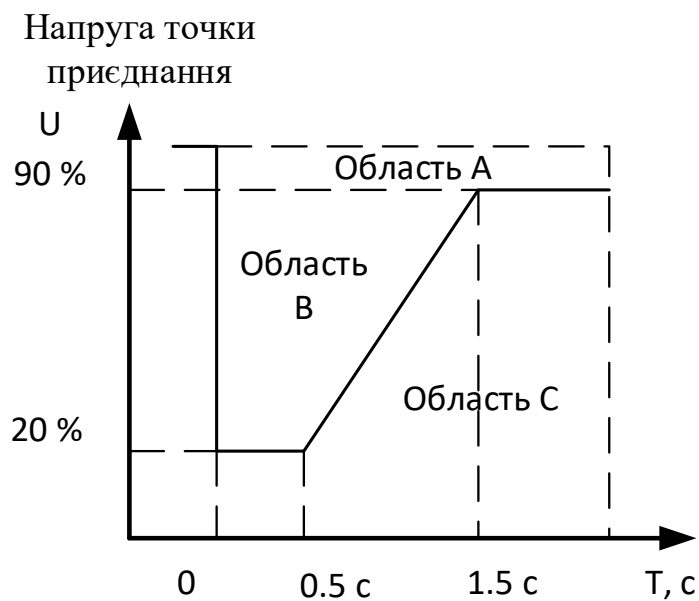


Рисунок 3.7 – Практичний приклад вимог системних операторів

Як видно із рис. 3.7, ВЕС повинна витримувати падіння напруги в точці приєднання до рівня 20 % від номінальної напруги (лінійна напруга основної гармоніки) як мінімум протягом 0.5 с без відключення. Досягнення таких вимог є серйозною технічною проблемою для виробників вітрогенераторів. Для досягнення цієї мети надзвичайно важливим є детальне розуміння специфікацій вимог системних операторів і того, що вони практично вимагають від терміналів вітрових генераторів.

Необхідно враховувати відповідні особливості та експлуатаційні обмеження енергетичних мереж, включаючи вплив конфігурації трансформаторів,

підводних кабелів змінного струму, які використовуються в морських вітрових електростанціях, і механізму усунення несправностей автоматичних вимикачів. Це допомогло б точно визначити реалістичні умови падіння напруги, які очікуються на клеммах вітрогенератора за різних типів несправностей. Після цього можна включити детальні моделі перехідних процесів вітрогенераторів для прогнозування еволюції електричних і механічних змінних за різних умов просідання.

3.2.1 Вплив провалів напруги на вітряну турбіну з асинхронним генератором подвійного живлення

На рис. 3.8 представлена структурна схема вітряної турбіни із змінною швидкістю обертання з асинхронним генератором, у якому статор приєднується до мережі безпосередньо, а фазний ротор - через випрямний перетворювач потужності [65].

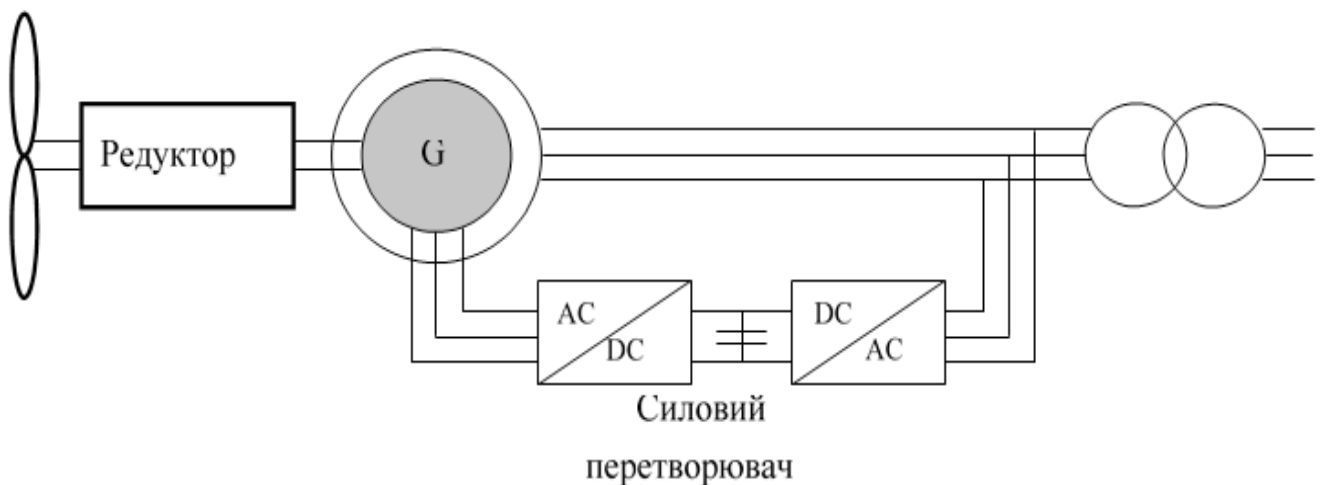


Рисунок 3.8 - Структурна схема вітряної турбіни із змінною швидкістю обертання з асинхронним генератором

3.2.1.1 Симетричні трифазні замикання

Робота DFIG при симетричних трифазних замиканнях досліджувалась шляхом накладання 60% провалу напруги типу А з нульовим стрибком фазового кута. Кут струму пошкодження встановлено на $\psi = 80^\circ$, і машина обертається з частотою $= -1,2$ в.о. Відомо, що найбільш критичними електричними параметрами під час просідання є напруга статора, струм ротора та напруга ланцюга постійного струму [3]–[6]. На рис. 3.9 показано результати моделювання з двома типами провалів (тип А та тип С). Осцилограми напруги статора показані на рис. 3.9 (а), (б) і збільшені в момент відновлення напруги на рис. 3.9 (в), (г).

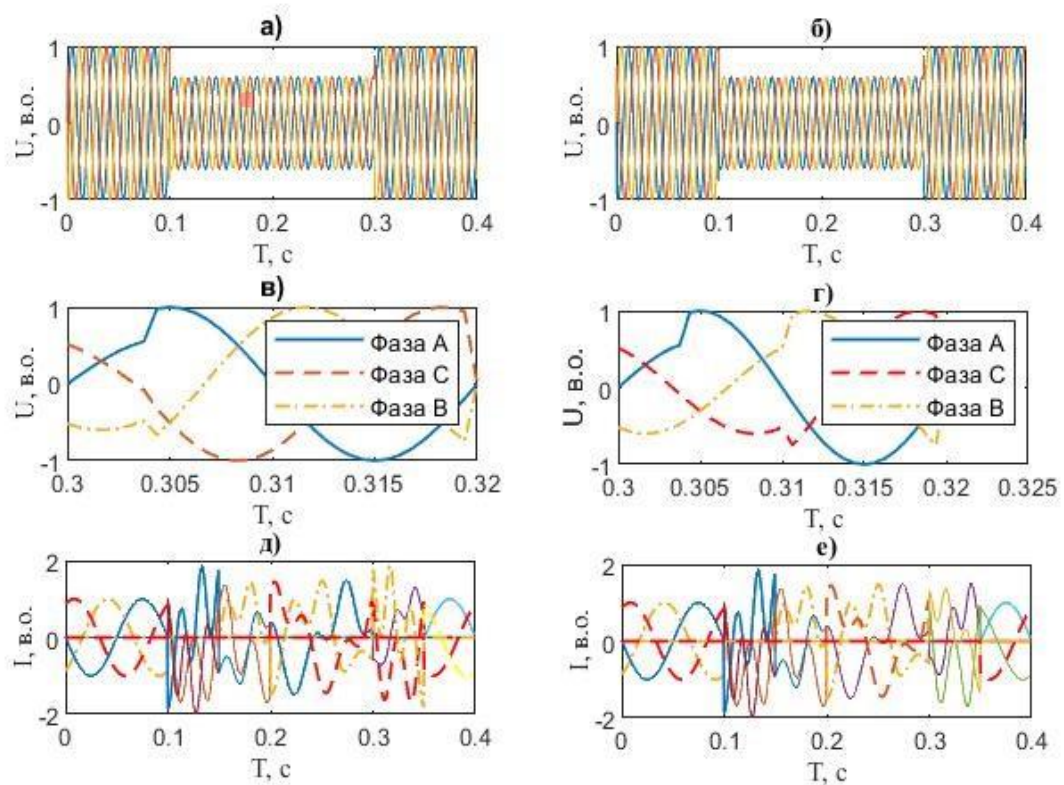


Рисунок 3.9 - Результати моделювання трифазних коротких замикань (тип А, С) з різними можливостями відновлення напруги

(а) - тип провалу А - напруга статора, (б) – тип провалу С - напруга статора. Статора, (в) – тип провалу А - напруга статора (збільшено навколо t_{fl}). (г) – тип провалу С - напруга статора (збільшено навколо t_{fl}), (д) – тип провалу А - струм ротора, (е) – тип провалу С - струм ротора.

Підсумовуючи результати дослідження узагальнено наступне:

1) Несправність викликає великий перехідний струм перевантаження 1,75 в.о. в обмотці ротора при $t = 0,1$ с, незалежно від типу відновлення. Це перевищення викликано через природну реакцію потоку статора (рис. 3.9 (д), (е)). Відповідна складова електрорушійної сили (ЕРС) фіксується відносно нерухомої рами; таким чином, він генерує компонент струму з $f = 1,2$ в.о. в обмотці ротора. Коли природна ЕРС спадає до нуля через 0,1 с, контрольованість струму в обмотці ротора відновлюється до значення перед несправністю. Зауважено, що під час замикання немає стабільних пульсацій, оскільки результуюче падіння напруги (тип А) не містить жодної складової зворотної послідовності.

2) Викиди струму ротора та постійного струму напруги в момент усунення несправності змінюється в залежності від типу відновлення напруги. Варто зазначити, що викиди при t_{f1} все ще менші, ніж початковий момент хвилі (t_i), оскільки збільшується здатність керуючих пристроїв передавати надлишкову потужність після моменту усунення несправності через повну доступність напруги мережі (рис. 3.9 (д), (е)).

3). Процес відновлення напруги призведе до менших викидів, якщо враховуються робочі протилежні вимикачі, а трифазні замикання вважаються очищеними при природному переході через нуль точки фазних струмів. Порівнюючи результати моделювання для типу А з типом С, стає ясно, що струм ротора зменшується з 1,7 до 1,1 в.о.

Аналіз послідовності компонентів потоку статора під час процесу відновлення напруги показує, що для провалів типу А повне відновлення напруги відбувається за один крок у кінцевій точці хвилі ($t_f 1$). Це може призвести до великої раптової зміни на 0,4 в.о. у примусовому потоці статора. Отже, для забезпечення безперервності траєкторії потоку статор-потік знадобиться велика природна складова потоку, і в обмотці ротора з'являться значні викиди. Однак для типу провалу С трифазне замикання буде усунено через два та три послідовні кроки відповідно.

На рис. 3.10 показано вплив кута струму пошкодження на напругу ланцюга постійного струму під час процесу відновлення напруги. Зрозуміло, що перевищення напруги ланцюга постійного струму збільшується на 10%, коли кут струму пошкодження змінюється від 85° до 45° .

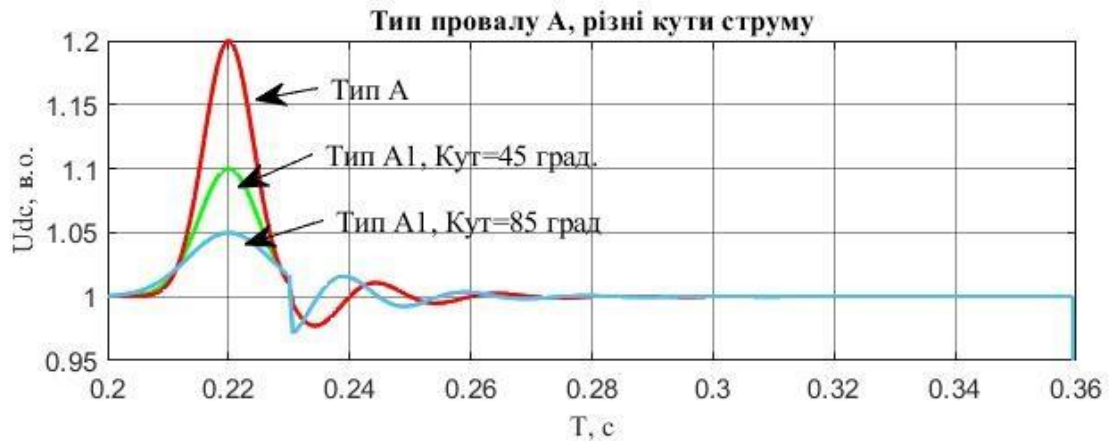


Рисунок 3.10 - Вплив кута струму пошкодження ψ на напругу ланцюга постійного струму під час процесу відновлення напруги

Таким чином, можна зробити висновок, що більш суворі умови відновлення напруги будуть виникати на вітрових електростанціях на базі DFIG, підключених до розподільчих систем або розташованих у морі. Варто також зазначити, що перевищення напруги ланцюга постійного струму за найгіршим сценарієм ($\psi = 45^\circ$) все ще менше, ніж нереалістичне перевищення напруги для відновлення на 1,15 в.о. (спостерігається в типі А).

3.2.1.2 Вплив глибини провалу напруги на перехідну характеристику DFIG

В роботі досліджено також вплив глибини провисання на перехідний процес поведінки DFIG, характерні моменти початкової точки на хвилі, які викликають найвищі піки струму ротора та напруги ланцюга постійного струму, в залежності від умов провисання.

Параметрами, що представляють інтерес для цього дослідження, є пікові (максимальні) значення струму ротора та напруги ланцюга постійного струму, визначені в відносних одиницях наступним чином:

$$I_{p, \max} = \frac{\max \left\{ |I_{pa}(t)|, |I_{pb}(t)|, |I_{pc}(t)| \right\}}{I_{p, \text{основний}}}, \quad (3.1)$$

$$U_{dc, \max} = \frac{\max \left\{ U_{dc}(t) \right\}}{U_{dc, \text{основний}}}, \quad (3.2)$$

Щоб перевірити вплив початкового моменту хвилі, система DFIG піддавалася різним типам провалів напруги 60% залишкової напруги та різні кути опору. Було помічено, що піки струму ротора та напруги ланцюга постійного струму мають періодичну поведінку в кожному півциклі основного періоду. Результати моделювання також показують, що початковий момент хвилі не впливає на пікові значення трифазних замикань (тип А), оскільки немає пов'язаної складової зворотної послідовності. Навпаки, вплив цього параметра є величезним для асиметричних провалів (тип С).

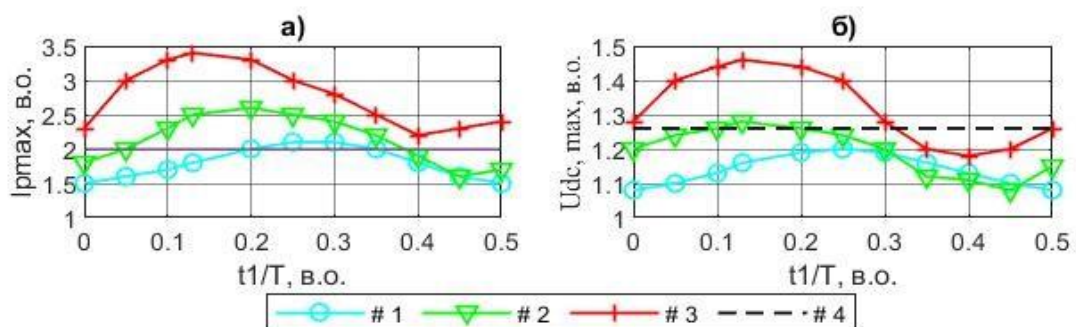


Рисунок 3.11 - Вплив початкового моменту хвилі на перехідну реакцію вітрових турбін на основі DFIG, що піддаються міжфазним замиканням:

а) – тип провалу А, б) – тип провалу С, крива #1 – кут $\alpha = 0^{\circ}$, крива #2 - $\alpha = -20^{\circ}$, крива #3 - $\alpha = -60^{\circ}$, крива #4 - типові запаси безпеки

Таблиця 3.1. Підсумкові результати моделювання для різних типів несправностей

Несправність (тип провалу)	$\alpha = 0^0$			$\alpha = -20^0$			$\alpha = -60^0$		
	$\theta_{ник} (^{\circ})$	$I_p (в.о.)$	$U_{dc} (в.о.)$	$\theta_{ник} (^{\circ})$	$I_p (в.о.)$	$U_{dc} (в.о.)$	$\theta_{ник} (^{\circ})$	$I_p (в.о.)$	$U_{dc} (в.о.)$
Тип А, 3ф.	--	1.9	2.3	--	2.1	1.3	--	2.95	1.61
Тип С, Ф - Ф	90 & 180	2.2	1.21	83 & 173	2.65	1.28	80 & 170	3.5	1.46

На рис. 3.11 показано пікові значення струму ротора та напруги ланцюга постійного струму в порівнянні з початковим моментом хвилі для 60% провалу напруги.. Типові запаси міцності також показані на рис. 3.11, що дорівнюють 2,0 і 1,25 в.о. для I_p і U_{dc} відповідно [65]. Комплексні результати моделювання для типів провисання А, С були підсумовані в таблиці 3.1. Основні спостереження полягають у наступному.

3.2.1.3 Вплив глибини провалу на перехідні характеристики

На рис. 3.12 показано лінійну залежність між глибиною провалу та піками струму ротора або напруги ланцюга постійного струму, тобто більш високі піки спостерігаються у міру збільшення глибини провалу. Ці результати моделювання також підтверджують достовірність спостережень, зроблених в останніх розділах: великі стрибки фазового кута мають значний шкідливий вплив на відповідь DFIG, і найбільш серйозні перевищення струму ротора та напруги ланцюга постійного струму спостерігатимуться для фази- міжфазне та трифазне замикання відповідно.

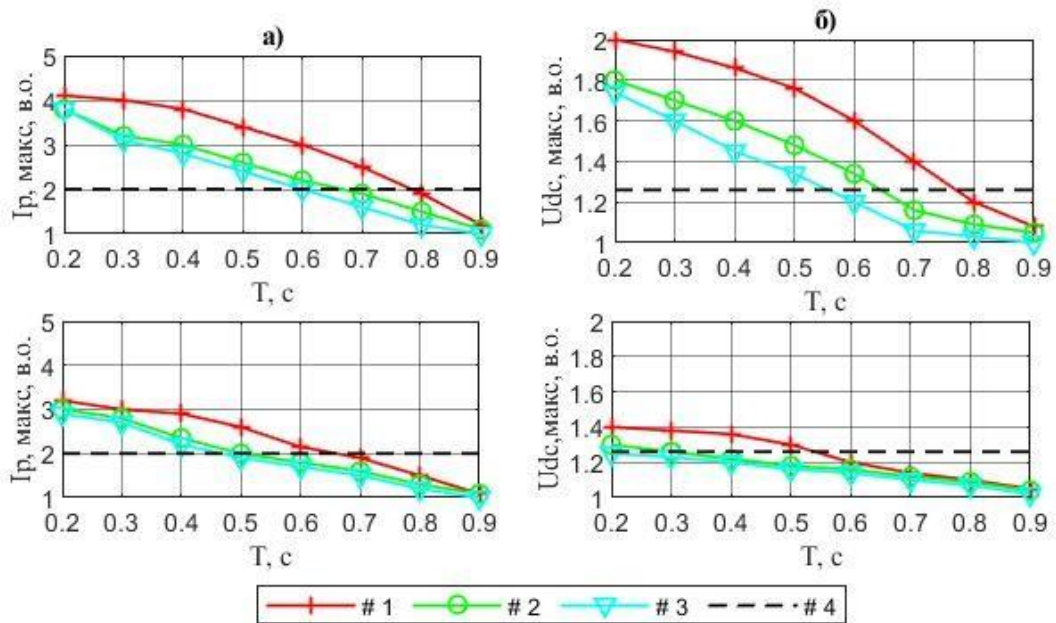


Рисунок 3.12 - Вплив глибини провисання на перехідну реакцію вітрової турбіни на основі DFIG, що піддається різним типам несправностей: а) – тип провалу А, б) – тип провалу С, крива #1 – кут $\alpha = -60^0$, крива #2 - $\alpha = -20^0$, крива #3 - $\alpha = 0^0$, крива #4 - типові запаси безпеки

Висновки до розділу 3:

Представлено новий аналіз перехідної поведінки вітрових турбін на основі DFIG за різних симетричних/несиметричних типів провалу напруги. Досліджено вплив стрибка фазового кута, процесу відновлення напруги та різних параметрів провалу (наприклад, глибини, типу, миттєвого моменту в точці хвилі та кута імпедансу). Проведено масштабні дослідження моделювання, які підтверджені теоретичними обґрунтуваннями.

Основний висновок зводиться до наступного.

1). Для симетричних провалів (тип А) природний відгук статорного потоку створює значні перехідні викиди струму ротора та напруги ланцюга постійного струму на початку та в кінці трифазних замикань. Однак, якщо врахувати експлуатаційні обмеження автоматичних вимикачів, повне відновлення напруги відбудеться через два-три послідовні кроки та менші перевищення в момент

усунення несправності (див. рис. 3.12). Для вітрогенераторів, підключених до розподільчої системи або які розташовані в морі, очікується, що викиди під час процесу відновлення збільшаться, оскільки кут струму пошкодження зменшується (див. рис. 3.10).

2). Для асиметричних провалів (тип С), наряду із стаціонарними коливаннями також спостерігаються перехідні викиди струму ротора і напруги ланцюга постійного струму. Найнесприятливіші моменти початкової точки на хвилі, з найбільшими перевищеннями, були виявлені для різних типів провалів. Це відповідає моменту, коли компоненти позитивної та негативної послідовностей вирівнюються в протилежних напрямках.

3) Складова зворотної послідовності напруги мережі зростає коли просідання напруги пов'язане з великими стрибками фазового кута. Це має значний шкідливий вплив на вітряні турбіни, розташовані в морі, оскільки перехідні перепади струму ротора та напруги ланцюга постійного струму можуть збільшитися на 45–60 % та 20–40 % відповідно. Крім того, виходить лінійна залежність між глибиною провисання та піками струму ротора або напруги ланцюга постійного струму, тобто очікуються більш високі піки зі збільшенням глибини (див. рис. 3.12).

Аналізуючи вищенаведене потрібно відмітити, що результати моделювання та теоретичні обговорення, представлені в дослідженні, можуть допомогти дослідникам, проектувальникам та інженерам для розробки вдосконалених схем керування для вітрових турбін на основі DFIG, щоб відповідати вимогам мережевого кодексу.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЄКТУ ВІТРОВОЇ СТАНЦІЇ

Метою розділу є розробка підприємницької моделі та впровадження науково-технічної розробки вітрогенератора, який використовує інноваційні технології для підвищення ефективності виробництва електроенергії з вітру. Початковий етап стартап-проєкту ґрунтується на попередніх розділах магістерської дисертації, де проаналізовано та класифіковано існуючі проблеми та недоліки поточних технологій та обладнання, які потребують поліпшення.

Завданням розділу є оцінка створення комплексу вітрових електростанцій, з'єднаних в одну та розробка бізнес-моделі стартапу до початку інвестиційного етапу. На основі ідеї стартапу сформовано інформаційну карту стартапу, див. таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Інформаційна карта та попередній аналіз стартап-проєкту для вітрової електростанції

Назва блоку	Характеристика
1	2
Загальна характеристика стартап-проєкту	
Назва стартап- проєкту	WindENERGY
Проблематика, яку вирішує стартап-проєкт	Проблема дефіциту електроенергії
Головні цілі та завдання проєкту	- Створення підприємства для виробництва електричної енергії з енергії вітру. - Забезпечення виробництва, перетворення та розподілу електричної енергії до кінцевого споживача.
Головні цільові групи, на які спрямований проєкт	Об'єкти промисловості, енергетична система України
Автори та команда стартап-проєкту	
Автори стартап- проєкту	Федоровський В.П.
Команда стартап- проєкту	Федоровський В.П., Волошко А.В.
Опис продукту стартап-проєкту	
Назва та коротка характеристика мінімального життєздатного продукту стартапу (Minimum viable product - MVP)	Електростанція загальною потужністю від 3,5 МВт

Продовження таблиці 4.1

Назва блоку	Характеристика
1	2
Стадія розробки стартапу	Етап ідеї
Технічні характеристики	Загальна запланована потужність – 14 МВт. Кількість виробленої електроенергії за рік – від 80 ГВт/рік
Супровід продукту	Компанія з обслуговування.
Забезпечення стартап-проекту	
Необхідні ресурси	Проектні, монтажні, логістичні, консалтингові організації
Потреба в інвестиціях	Сума капітальних інвестицій – від 20 000 000 \$
Результати стартап-проекту	
Термін реалізації стартап-проекту	2 роки до запуску проекту

4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проекту

Згідно з [70], на початку стартап – проекту доцільно проаналізувати його переваги та недоліки, див. таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Цілі основних етапів реалізації стартапу

Стадії розвитку стартап-проекту	Цілі етапів реалізації стартап-проекту
Початковий етап стартап-проекту (seed stage)	Прорахунок вартості проекту
Етап обґрунтування актуальності інноваційної ідеї	Пошук фінансування
Аналіз середовища	Аналіз ризиків підключення до енергосистеми, пошук земельної ділянки, проектних організацій та підрядників
Обґрунтування ресурсного забезпечення проекту	Визначення основних витрат на процеси будівництва, складання кошторисів
Етап фінансового забезпечення реалізації проекту	Викладення стратегії ціноутворення та вартості впровадження проекту.
Інвестиційний етап реалізації стартап проекту	Залучення інвесторів
Етап будівництва	Спорудження ВЕС запланованої потужності

4.2 Обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проекту

Обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проекту є важливим етапом підготовки бізнес-плану та презентації для потенційних інвесторів. Це дозволяє продемонструвати, що проект вирішує реальну проблему, має конкурентні переваги, та має перспективи розвитку та прибутковості.

Для обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проекту будівництва вітрової електростанції доцільно використати такі аргументи:

- вітрова енергія є одним з найбільш чистих та доступних джерел відновлюваної енергії, що дозволяє зменшити залежність від традиційних видів палива та забезпечити екологічну безпеку;

- вітрова енергія має високу енергоефективність, оскільки вітряки можуть виробляти електроенергію з мінімальними втратами та низькими витратами на обслуговування;

- вітрова енергія має великий потенціал для розвитку в Україні, оскільки в країні є достатньо вітряних регіонів, де можна будувати вітрові електростанції;

- вітрова енергетика сприяє створенню нових робочих місць, підвищенню соціально-економічного рівня регіонів, та підтримці місцевих громад.

Для інноваційності ідеї стартап-проекту будівництва вітрової електростанції доцільно:

- використовувати новітні технології та обладнання для вітряних турбін, що забезпечують високу продуктивність, надійність, та довговічність;

- використовувати сучасні методи проектування, будівництва, та експлуатації вітрових електростанцій, що дозволяють оптимізувати витрати, зменшити ризики, та підвищити ефективність;

- використовувати інтелектуальні системи управління та моніторингу вітрових електростанцій, що дозволяють автоматизувати процеси, аналізувати дані, та покращувати якість обслуговування;

- використовувати інноваційні моделі фінансування та співпраці з інвесторами, партнерами, та споживачами, що дозволяють залучати необхідні ресурси, розширювати ринки, та забезпечувати конкурентоспроможність.

Напрямки застосування та вигоди споживача приведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Актуальність та новизна ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Переваги та вигоди споживача
Створення комплексу ВЕС	Промисловість, забезпечення електроенергією власне виробництво, транспортування електроенергії в енергосистему країни	- прибуток; - зменшення витрат на електроенергію для власних підприємств; - надійне забезпечення електроенергією в моменти дефіциту в електромережі; - декарбонізація екосистем за рахунок «зеленої енергетики»

4.3 Оцінка конкурентної ситуації

Для оцінки конкурентної ситуації для ВЕС проведено SWOT-аналіз критеріїв стартапу, див. табл. 4.4

Таблиця 4.4 – SWOT-аналіз критеріїв стартапу

S (strength) – Сильні сторони	W (weaknesses) – Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> 1. відновлюваність джерела енергії; 2. дешеве джерело енергії; 3. сприяння економічного розвитку; 4. екологічність; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. нестабільність, залежність від погодних умов; 2. витрати на землю, зайняття великих площ; 3. екологічні наслідки (шум, вібрації, візуальне забруднення)
O (opportunities) – Можливості	T (threats) – Загрози
<ol style="list-style-type: none"> 1. зростання попиту на «зелену» енергію в світі; 2. підтримка уряду; 3. дешеве виробництво водню та інших енергоресурсів на основі ВЕС. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. конкуренція від традиційних джерел енергії, Надлишок конкурентів на світовому ринку 2. зміна клімату, що впливає на вітровий потенціал; 3. політична невизначеність, що може призвести до зміни регуляторної політики

4.4 Обґрунтування ресурсного забезпечення проєкту

Ресурси проєкту розподілено на наступні види:

- матеріальні ресурси - фізичні об'єкти, які використовуються в проєкті (вітрогенератори, трансформатори, кабелі, будівельні матеріали тощо);
- фінансові ресурси - грошові кошти, які виділяються на проєкт (капітал, кредити, субсидії, інвестиції тощо);
- людські ресурси – люди, які беруть участь в проєкті (менеджери, інженери, робітники, консультанти, експерти тощо);
- інформаційні ресурси - дані, знання, інформація, які використовуються в проєкті, такі як дослідження, аналізи, нормативні документи, стандарти тощо;

Для обґрунтування ресурсного забезпечення проєкту створення ВЕС необхідно виконати такі кроки:

- аналізувати цілі та завдання проєкту, щоб визначити очікувані результати, обсяг робіт, терміни виконання, якість продукту тощо;
- розробити структуру розподілу робіт, щоб розбити проєкт на логічні та управлінські елементи, які можна вимірювати, контролювати та відстежувати;
- оцінити необхідність ресурсів для кожного елемента, враховуючи їх характеристики, специфікації, норми витрат, доступність, ризики тощо;
- скласти ресурсний план проєкту, в якому вказати види, обсяги, джерела, вартість та час залучення ресурсів для кожного елемента структури розподілу робіт, а також загальні показники ресурсного забезпечення проєкту;
- забезпечити оптимізацію та раціоналізацію ресурсів, використовуючи методи планування, аналізу, балансування, розподілу, координації, контролю та коригування ресурсів з метою підвищення ефективності та економічності проєкту.

4.5 Фінансове обґрунтування стартап-проєкту

Фінансове обґрунтування стартап-проєкту для створення вітрової електростанції є процесом оцінки фінансової доцільності та привабливості.

Воно включає такі етапи:

- розрахунок витрат на створення та експлуатацію ВЕС, враховуючи вартість вітрогенераторів, трансформаторів, кабелів, будівельних робіт, земельної ділянки, транспортування, монтажу, підключення, обслуговування, ремонту, страхування тощо;

- розрахунок доходів від продажу електроенергії, враховуючи обсяг виробництва, ціну за кВт-год, тарифи, пільги, субсидії, контракти, індексацію тощо;

- розрахунок показників ефективності проекту, таких як чистий дисконтований дохід (NPV), внутрішня норма рентабельності (IRR), термін окупності (PP), коефіцієнт рентабельності (PI), коефіцієнт оновлення (CR) тощо.

- аналіз чутливості проекту до зміни вхідних параметрів, таких як вартість вітрогенераторів, ціна електроенергії, продуктивність вітру, ставка дисконтування, інфляція тощо;

- аналіз ризиків проекту та їх мінімізація, враховуючи можливі технічні, економічні, екологічні, правові, соціальні, політичні та інші фактори, що можуть негативно вплинути на реалізацію проекту;

Середня вартість вітрогенератора потужністю 3,5 МВт становить приблизно 4,5 млн євро. Таким чином, вартість чотирьох вітрогенераторів складе 18 млн євро. До цієї суми слід додати вартість трансформаторів, кабелів, будівельних робіт, земельної ділянки, транспортування, монтажу, підключення та інших витрат, пов'язаних зі створенням ВЕС. Ці витрати можуть складати від 20% до 40% вартості вітрогенераторів, в залежності від регіону, типу місцевості, розміру проекту та інших факторів. Якщо припустити, що ці витрати становлять 30% вартості вітрогенераторів, то вони складуть 5,4 млн євро. Таким чином, загальна вартість створення ВЕС з чотирма вітряними турбінами потужністю 3,5 МВт кожна складе приблизно 23,4 млн євро.

Щодо витрат на експлуатацію ВЕС, то вони включають витрати на обслуговування, ремонт, страхування, податки, збори та інші витрати, пов'язані з функціонуванням ВЕС. Ці витрати можуть складати від 1,5% до 3% від вартості

вітрогенераторів на рік, в залежності від технології, умов експлуатації, договорів та інших факторів. Якщо припустити, що ці витрати становлять 2% від вартості вітрогенераторів на рік, то вони складуть 360 тис. євро на рік. Таким чином, витрати на експлуатацію ВЕС з чотирма вітряними турбінами потужністю 3,5 МВт кожна складуть приблизно 360 тис. євро на рік.

В даному розділі розраховано витрати на створення підприємства з виробництва електричної енергії за допомогою ВЕС.

4.5.1 Витрати на оплату праці

Складено план розподілу працівників установи обслуговування обладнання вітрової електростанції за способом оплати праці. Використано ставки заробітної плати, згідно для подібних видів роботи, які знайдено на сайтах пошуку роботи. Для адміністративно-технічного персоналу обраховано погодинно-преміальну оплату праці

$$ЗП_{\text{погод-прем}} = TC \times t + П \quad (4.3)$$

де TC – тарифна ставка оплати праці, грн/год;

T – кількість відпрацьованих працівником годин, год;

$П$ – преміальні виплати за якісну напружену працю, грн.

$$ЗП_{\text{погод-прем}} = 100 \times 200 + 30\% = 26\,000 \text{ грн.}$$

Встановлено пряму відрядну оплату праці для виробничого персоналу, яка залежить від кількості та якості виконаних робіт [78]

$$ЗП_{\text{відр}} = P_i + Q_i + П, \quad (4.4)$$

де P_i – розцінка виконання i -тої операції, виду робіт, грн/од;

Q_i – обсяг виконаних робіт або одиниць продукції, од;

P – премії.

Заробітна плата для монтажника:

$$ЗП_{\text{відр}} = 40 \times 500 + 10\% = 22\,000 \text{ грн.}$$

Заробітна плата для налаштувальника:

$$ЗП_{\text{відр}} = 40 \times 500 + 10\% = 22\,000 \text{ грн.}$$

Заробітна плата для працівника сервісного обслуговування:

$$ЗП_{\text{відр}} = 40 \times 500 + 10\% = 22\,000 \text{ грн.}$$

У таблиці 4.5 наведено загальні дані про склад та заробітну плату працівників установи.

Таблиця 4.5 - Структура персоналу та ФОП, тис. грн

№ п/п	Посада	Форма оплати	К-сть працівників	Заробітна плата		
				за місяць	за квартал	за рік
Адміністративно-технічний персонал						
1.	Інженер з технічного обслуговування	Погодинно-преміальна	1	26 000	78 000	312 000
Всього				26 000	78 000	312 000
Соціальні відрахування до Пенсійного фонду (22%)				5 720	17 160	68 640
ФОП				31 720	95 160	380 640
Виробничий персонал						
1.	Монтажник	Відрядно-преміальна	3	22 000	66 000	59 400
2.	Налаштувальник		2	22 000	66 000	59 400
3.	Працівник сервісного обслуговування		1	22 000	66 000	59 400
Всього				66 000	198 000	792 000
Соціальні відрахування до Пенсійного фонду (22%)				29 040	87 120	348 480
ФОП				177 815	533 445	2 133 780

4.5.2 Обґрунтування основних фондів

За П(С)БО 7 “Основні засоби”, до основних фондів належать матеріальні активи, які використовуються підприємством у виробничому або іншому процесі. Для відображення зносу основних засобів застосовується прямолінійний метод амортизації, за яким амортизаційні відрахування рівномірно розподіляються протягом строку корисного використання об’єкта до його вибуття. У таблиці 4.6 показано суми амортизаційних відрахувань за 2024 рік за кожною групою основних засобів, грн.

Таблиця 4.6 - Вартість амортизаційних відрахувань основних фондів

Назва об’єкта основних фондів	Кількість, шт	Вартість на початок року, грн	Річна норма амортизації, %	Амортизаційні відрахування в поточному році, грн				
				I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	За рік
Автомобіль	1	150 400	4	7 520	7 520	7 520	7 520	30 080
Комплект професійного інструменту та обладнання	4	740 000	4	37 000	37 000	37 000	37 000	148 000
Вимірвальне обладнання	10	1 800 400	4	90 020	90 020	90 020	90 020	360 080
Будівлі	2	2 800 000	4	140 000	140 000	140 000	140 000	560 000
Всього	16	8 300 200	4	415 010	415 010	415 010	415 010	1 660 040

4.5.3. Інші прямі витрати

Інші прямі витрати узагальнено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Обґрунтування прямих витрат

Види послуг	Джерело даних	Вартість послуг, грн.	
		на місяць	на рік
1. Охорона	Угода	30 000	360 000

Продовження таблиці 4.7

2. Оренда земельної ділянки	Угода	70 000	840 000
Всього:		100 000	1 200 000

4.5.4. Загальновиробничі витрати

У таблиці 4.8 зведено загальновиробничі витрати.

Таблиця 4.8 – Загальновиробничі витрати

Види послуг	Джерело даних	Вартість послуг, грн.	
		на місяць	на рік
1. Ремонт устаткування	Угода	4500	54 000
2. Витрати на псування устаткування	Згідно ВН (3%)	4000	48 000
Всього:		8500	102 000

4.5.5. Умовно-змінні витрати

До умовно-змінних витрат віднесено витрати на утримання підприємства.

Умовно-змінні витрати підприємства наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Умовно-змінні витрати підприємства

Статті витрат	Джерела даних	Витрати, грн		
		На місяць	На квартал	На рік
ФОП виробничого персоналу	Табл. 4.6	177 815	533 445	2 133 780
Ремонт виробничого обладнання	Табл. 4.9	4 500	13 500	54 000
Всього:		761 815	2 285 445	9 141 780

4.5.6. Умовно-постійні витрати

Умовно-постійні витрати підприємства наведено в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Умовно-постійні витрати

Статті витрат	Джерела даних	Витрати, грн.		
		На місяць	На квартал	На рік
ФОП адміністративно-технічного персоналу	Табл. 4.5	31 720	95 160	380 640
Амортизаційні відрахування	Табл. 4.7	138 336	415 010	1 660 040
Охорона території	Табл. 4.8	30 000	90 000	360 000
Оренда земельної ділянки	Табл. 4.8	70 000	210 000	840 000
Всього:		270 056	810 168	3 240 672

4.5.7. Собівартість витрат

Для визначення вартості інноваційної ідеї необхідно враховувати два типи витрат: ті, що змінюються в залежності від обсягу виробництва (умовно-змінні), та ті, що залишаються сталими незалежно від обсягу виробництва (умовно-постійні). У таблиці 4.11 подані загальні дані щодо собівартості, які дозволяють провести розрахунки.

Таблиця 4.11 – Обґрунтування собівартості товару (послуги), грн

Статті витрат	Витрати, тис. грн		
	На місяць	На квартал	На рік
1. Умовно-змінні витрати	761 815	2 285 445	9 141 780
2. Умовно-постійні (накладні) витрати	270 056	810 168	3 240 672
3. Собівартість	1 031 871	3 095 613	12 282 452

4.5.8. Обґрунтування рентабельності ідеї

Підприємство виділяє частину свого прибутку на різні фонди, а саме: фонд розвитку виробництва (ФРВ) – 10%, фонд соціального розвитку (ФСР) – 10%, на преміальний фонд (ПФ) – 10%, на дивіденди засновникам – 65%.

Необхідний рівень прибутку інноваційної ідеї, який визначає ціну товару (послуги), показано в таблиці 4.12

Таблиця 4.12 – Визначення рентабельності товару (послуги)

Статті витрат	Джерело даних	Од. вимір.	Значення показників
1.1 Обсяг виробництва електроенергії в рік	Прогноз	грн	153 937 600
2. Необхідний прибуток	п.2.1+2.2+2.3+2.4+2.5+2.6+2.7	грн.	12 282 452
2.1. Кредитні засоби та їх обслуговування	Кредитна угода	грн.	141 655 148
2.2. Засоби ФРВ	Колективна угода	грн.	14 165 514,8
2.3. Засоби ФСР	Колективна угода	грн.	14 165 514,8
2.4. Засоби ПФ	Колективна угода	грн.	14 165 514,8
2.5. Грошові виплати власникам підприємства	Колективна угода	грн.	99 158 603,6
2.6. Фінансовий резерв	$(2.1+2.2+2.3+2.4+2.5)*0.05/0.95$	грн.	7 455 534,11
2.7. Податок на прибуток	$(2.1+2.2+2.3+2.4+2.5)*0.03$	грн.	201 299,4
3. Необхідний рівень рентабельності продукції	$п.2 / п.1.1 * 100\%$	%	7,9 %

4.5.9 Обґрунтування вартості виробництва електроенергії

Розраховано точку беззбиткового обсягу виробництва [71]

$$TF = \frac{FC \cdot 1,03}{P \cdot n}, \quad (4.5)$$

де P – ціна продажу виробу, грн /од;

FC – постійні витрати в собівартості продукції за рік, грн;

n – кількість місяців;

1,03 – врахування податку на зелену енергію від загальної вартості.

$$TR = \frac{12\,282\,452 \cdot 1,03}{5 \cdot 12} = 415\,557 \text{ кВт/міс.}$$

4.5.10. Оцінка ефективності впровадження стартап-проекту та пропозиції інвестору

Для оцінки успішності впровадження стартап-проекту використовувалися такі фінансові показники, як чиста сучасна вартість (NPV), відношення позики до вартості проекту та його цінності, простий період повернення, показник ефективності та чиста дисконтована вартість. Дані для розрахунку чистої сучасної вартості були взяті з таблиці 4.13

Таблиця 4.13 – Дані для розрахунку чистої приведеної вартості NPV стартап-проекту

Рік (період)	2024(0)	2025(1)	2026(2)	2027(3)	2028(4)
Виручка від реалізації, грн.	0	141 453 848	141 453 848	141 453 848	141 453 848
Витрати, грн.		12 483 752	12 483 752	12 483 752	12 483 752
Інвестиції, грн	919 142 652	0	0	0	0
Рік (період)	2029(5)	2030(6)	2031(7)	2032(8)	2032 (9)
Виручка від реалізації, грн.	141 453 848	141 453 848	141 453 848	141 453 848	141 453 848
Витрати, грн.	12 483 752	12 483 752	12 483 752	12 483 752	12 483 752
Інвестиції, грн	0	0	0	0	0

Висновки до розділу 4:

1. Проведено SWOT-аналіз стартап-проекту, де визначено його сильні та слабкі сторони.

2. У таблиці 4.14 підведено підсумки підготовки інноваційного стартапу та узагальнено основні техніко-економічні показники.

Таблиця 4.14 – Узагальнюючі техніко-економічні показники

Показники	Значення
Річні доходи	153 937 600
Річний випуск електроенергії, ГВт мін.	30
Капіталовкладення, грн.	919 142 652
Рентабельність,%	52,3
Період повернення капіталовкладень, років	8
Прибуток, грн/міс	99 158 603,6

ВИСНОВКИ

1. Зроблено аналіз впровадження відновлюваних джерел енергії, а саме: сонячної енергетики, гідроенергетики, геотермальної енергетики, біоенергетики, вітроенергетики. Визначено головні переваги відновлювальних джерел енергії, а саме: екологічність, надійність, тощо. Визначено головні недоліки використання ВДЕ, а саме: залежність від погодних умов, займання великих територій, тощо. Згідно аналізу зроблено висновок, що для подальшого дослідження доцільно розглянути вітрову енергетику в якості розподіленої генерації через більшу поширеність порівняно з геотермальною та біоенергетикою.

2. Вітрові електростанції мають вплив на якість електроенергії, яка подається в електричну мережу або споживачам, залежно від різних факторів. Для забезпечення високої якості електроенергії необхідно враховувати ці впливи і застосовувати відповідні методи регулювання, фільтрації, захисту та моніторингу. Для цього існують різні стандарти і нормативи, які визначають вимоги до якості електроенергії і процедури її вимірювання і оцінки.

3. Представлено новий аналіз перехідної поведінки вітрових турбін на основі DFIG за різних симетричних/несиметричних типів провалу напруги. Досліджено вплив стрибка фазового кута, процесу відновлення напруги та різних параметрів провалу (наприклад, глибини, типу, миттєвого моменту в точці хвилі та кута імпедансу). Проведено масштабні дослідження моделювання, які підтверджені теоретичними обґрунтуваннями.

Основний висновок зводиться до наступного.

А). Для симетричних провалів (тип А) природний відгук статорного потоку створює значні перехідні викиди струму ротора та напруги ланцюга постійного струму на початку та в кінці трифазних замикань. Однак, якщо врахувати експлуатаційні обмеження автоматичних вимикачів, повне відновлення напруги відбудеться через два-три послідовні кроки та менші перевищення в момент усунення несправності. Для вітрогенераторів, підключених до розподільчої

системи або які розташовані в морі, очікується, що викиди під час процесу відновлення збільшаться, оскільки кут струму пошкодження зменшується.

Б). Для асиметричних провалів (тип С), наряду із стаціонарними коливаннями також спостерігаються перехідні викиди струму ротора і напруги ланцюга постійного струму. Найнесприятливіші моменти початкової точки на хвилі, з найбільшими перевищеннями, були виявлені для різних типів провалів. Це відповідає моменту, коли компоненти позитивної та негативної послідовностей вирівнюються в протилежних напрямках.

В) Складова зворотної послідовності напруги мережі зростає коли просідання напруги пов'язане з великими стрибками фазового кута. Це має значний шкідливий вплив на вітряні турбіни, розташовані в морі, оскільки перехідні перепади струму ротора та напруги ланцюга постійного струму можуть збільшитися на 45–60 % та 20–40 % відповідно. Крім того, виходить лінійна залежність між глибиною провисання та піками струму ротора або напруги ланцюга постійного струму, тобто очікуються більш високі піки зі збільшенням глибини.

Аналізуючи вищенаведене потрібно відмітити, що результати моделювання та теоретичні обговорення, представлені в дослідженні, можуть допомогти дослідникам, проектувальникам та інженерам для розробки вдосконалених схем керування для вітрових турбін на основі DFIG, щоб відповідати вимогам мережевого кодексу.

4. Проведено SWOT-аналіз стартап-проекту, де визначено його сильні та слабкі сторони та підведено підсумки підготовки інноваційного стартапу з якими узагальнено основні техніко-економічні показники:

- Річні доходи – 153 937 600 грн;
- Річний випуск електроенергії – 30 ГВт min;
- Капіталовкладення – 919 142 652 грн;
- Рентабельність – 52,3 %;
- Період повернення капіталовкладень – 8 років;
- Прибуток – 99 158 603,6 грн/міс.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Енергетична безпека і чому це надважливо для України? - USAID Energy Security Project. USAID Energy Security Project. URL: <https://energysecurityua.org/ua/u-fokusi/shcho-take-enerhetychna-bezpeka-i-chomu-tse-nadvazhlyvo-dlia-ukrainy/> (дата звернення: 22.11.2023).
2. Чернюк А., Кирисов І., Черевик Ю. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні. Енергетика. С. 239–243 DOI URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/36>.
3. Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2020) - “Renewable Energy” Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/renewable-energy' [Online Resource]
4. Офіційний сайт Держагенства з енергоефективності. Потенціал відновлювальної енергетики України. URL: <https://www.sae.gov.ua> (дата звернення: 22.11.2023).
5. 2023 Levelized Cost Of Energy+. <https://www.lazard.com>. URL: <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/> (date of access: 22.11.2023).
6. Lazard Releases Annual Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage Analyses. URL: <https://www.nasdaq.com/press-release/lazard-releases-annual-levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-0> (date of access: 22.11.2023).
7. Новини компаній: Ринок ВДЕ. Підсумки року та перспективи 2022. Новини бізнесу, економіки, фінансів, ринків и компаній – НВ Бізнес. URL: <https://biz.nv.ua/ukr/markets/vidnovlyuvana-energetika-v-ukrajini-pidsumki-roku-ta-prognozi-2022-vde-50203541.html> (дата звернення: 22.11.2023).
8. Clean Heat - Bankwatch. Bankwatch. URL: https://bankwatch.org/clean-heat?gclid=EAIaIQobChMIkfqIjtvWggMVIZWDBx3J9AanEAAYASAAEgJtXvD_BwE (date of access: 22.11.2023).

9. Renewable Energy. Education | National Geographic Society.
URL: <https://education.nationalgeographic.org/resource/renewable-energy/> (date of access: 22.11.2023).
10. Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts
<https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts>.
11. What Are the Advantages and Disadvantages of Solar Energy?.
<https://earth.org/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-solar-energy/>.
12. Distributed Generation (DG) | Benefits, Types, & Environmental Impacts.
<https://www.carboncollective.co/sustainable-investing/distributed-generation-dg>.
13. Renewable Distributed Energy Generation: Solar Photovoltaic Power.
<http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/hock1>
14. The Pros and Cons Of Solar Energy (2023 Guide) – Forbes Home.
<https://www.forbes.com/home-improvement/solar/solar-energy-pros-and-cons/>.
15. Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts
https://19january2017snapshot.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts_.html.
16. Hydropower - IEA - International Energy Agency. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydroelectricity>.
17. Hydroelectric Energy - National Geographic Society.
<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/hydroelectric-energy>.
18. How Hydropower Works | Department of Energy.
<https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works>.
19. Global hydropower production 2021 | Statista.
<https://www.statista.com/statistics/1031110/hydroelectric-energy-production-globally/>.
20. Hydropower explained - U.S. Energy Information Administration (EIA).
<https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/>.

21. Hydropower explained Where hydropower is generated - U.S. Energy
<https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/where-hydropower-is-generated.php>.
22. Advantages and Disadvantages of Hydroelectric Energy - GreenGeeks.
<https://www.greengeeks.com/blog/hydroelectric-energy/>.
23. Topic: Geothermal energy in the U.S. Statista.
URL: <https://www.statista.com/topics/2692/geothermal/>. (date of access: 27.11.2023).
24. Global geothermal energy capacity 2022 | Statista.
<https://www.statista.com/statistics/476281/global-capacity-of-geothermal-energy/>.
25. IEA 2020 U.S. Geothermal Report - Department of Energy.
<https://www.energy.gov/eere/geothermal/articles/now-available-iea-2020-us-geothermal-report>.
26. What are the Advantages and Disadvantages of Geothermal Energy?.
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/geothermal-energy/pros-and-cons>.
27. Geothermal energy | Description, Uses, History, & Pros and Cons.
<https://www.britannica.com/science/geothermal-energy>.
28. Біоенергетика | Держенергоефективності України.
<https://saee.gov.ua/uk/ae/bioenergy>.
29. Біоенергетика в Україні: переваги і можливості - UABIO.
<https://uabio.org/materials/8092/>.
30. Глобальні перспективи біоенергетики | Економічна правда.
<https://www.epravda.com.ua/columns/2021/09/1/677373/>.
31. ДСТУ 3896:2007 Вітроенергетика. Вітроенергетичні установки та вітроелектричні станції. Терміни та визначення понять. — Вид. офіц. — На заміну ДСТУ 3896-99; чинний від 2009-01-01. — К.: Держспоживстандарт України, 2008. — III, 23 с. — (Національний стандарт України).

32. Вітроенергетика | Держенергоефективності України. Welcome to Держенергоефективності України | Держенергоефективності України. URL: <https://saee.gov.ua> (дата звернення: 27.11.2023).
33. Вітроенергетика | С. О. Кудря, В. Г. Дресвянников || Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] | Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2005. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-35020>
34. Що таке ВДЕ в Україні: реальна статистика. <https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/publikatsiyi/shho-take-vde-v-ukrayini-realna-statystyka-lypen-2021/>.
35. В.В Дубровська В.І Шкляр. Технологія виробництва електричної енергії. Київ, 2022. 285 с.
36. Dugan, Roger K.; Mark McGranaghan; Surya Santoso; H. Wayne Beaty (2003). Quality of electricity systems. The McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN 978-0-07-138622-7.
37. Surajit Chattopadhyay * Madhuchhanda Mitra. Samarjit Sengupta. “Electric Power Quality” ISBN 978-94-007-0634-7, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, Library of Congress Control Number: 2011921328, © Springer Science+Business Media B.V. 2011, p 25.
38. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (61662). ДНАОП - Нормативно-правова бібліотека інструкцій документи. URL: https://dnaop.com/html/61662/doc-ДСТУ_EN_50160_2014 (дата звернення: 09.12.2024).
39. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. — Вид. 2-ге, допрацьоване та доповнене. — Харків : Точка. — 400 с. — ISBN 978-617-669-122-8.

40. Kozakevich I. A., Kotyakova M. G. Analysis of the influence of sources of distributed generation on the power quality. *Jornal of Kryvyi Rih National University*. 2021. No. 52. P. 175–179. URL: <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-52-175-179> (date of access: 09.01.2024).
41. Вплив показників якості електроенергії на роботу електроспоживачів. https://stud.com.ua/85721/prirodoznavstvo/vpliv_pokaznikiv_yakosti_elektroenergiyi_robotu_elektrospozhivachiv.
42. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила улаштування електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Чинний від 2001–06–21].
43. Вплив параметрів якості електроенергії на ефективність роботи електроустановок. <https://core.ac.uk/download/pdf/162592798.pdf>.
44. "Global Electricity Review 2023". Ember. 11 April 2023. Retrieved 14 June 2023 <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/> Malgorzata Wiatros-Motyka.
45. Wind energy generation vs. installed capacity. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/wind-energy-consumption-vs-installed-wind-energy-capacity> (date of access: 30.11.2023).
46. Expansion of wind and solar power too slow to stop climate change. ScienceDaily. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/10/211014141949.htm> (date of access: 30.11.2023).
47. What are the pros and cons of onshore wind energy? - Grantham Research Institute on climate change and the environment. Grantham Research Institute on climate change and the environment. URL: <https://web.archive.org/web/20190622123816/http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/faqs/what-are-the-pros-and-cons-of-onshore-wind-energy/> (date of access: 30.11.2023).
48. Global Wind Report 2019 - Global Wind Energy Council. Global Wind Energy Council. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2019/> (date of access: 30.11.2023).

49. Global Wind Atlas - Datasets. Wayback Machine. URL: <https://web.archive.org/web/20200224101415/http://science.globalwindatlas.info/datasets.html> (date of access: 30.11.2023).
50. Pieces of a puzzle: solar-wind power synergies on seasonal and diurnal timescales tend to be excellent worldwide - IOPscience. Home Page. URL: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac71fb> (date of access: 30.11.2023).
51. Global Wind Atlas. Global Wind Atlas. URL: <https://globalwindatlas.info/en> (date of access: 30.11.2023).
52. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068> (date of access: 30.11.2023).
53. Meyers, Johan; Meneveau, Charles (1 March 2012). "Optimal turbine spacing in fully developed wind farm boundary layers". *Wind Energy*. 15 (2): 305–17. Bibcode:2012WiEn...15..305M. doi:10.1002/we.469.
54. Making of the modern offshore substation. *Windpower Engineering & Development*. URL: <https://www.windpowerengineering.com/projects/making-modern-offshore-substation/> (date of access: 30.11.2023).
55. Zero DC voltage ride through of a hybrid modular multilevel converter in HVDC systems / M. Lu et al. *IET Renewable Power Generation*. 2016. Vol. 11, no. 1. P. 35–43. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0108> (date of access: 09.01.2024).
56. Ming Cheng Ying Zhu. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review. <https://www.sciencedirect.com/>. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.037> (date of access: 30.11.2023).
57. Kaiser M. J., Snyder B. F. Decommissioning Cost Estimation. *Offshore Wind Energy Cost Modeling*. London, 2012. P. 213–235. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2488-7_12 (date of access: 09.01.2024).
58. "World's Largest Offshore Wind Farm Fully Up and Running". *Offshore Wind*. 30 January 2020. Archived from the original on 31 January 2020. Retrieved 3

- February 2020. URL: <https://www.offshorewind.biz/2020/01/30/worlds-largest-offshore-wind-farm-fully-up-and-running/>
59. Connecting offshore wind energy to the grid. BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Artikel/Energy/connecting-offshore-wind-energy-to-the-grid.html> (date of access: 30.11.2023).
60. Wind Energy Handbook / T. Burton et al. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, 2011. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119992714> (date of access: 09.01.2024).
61. Alternative-Energy-News.info. URL: <http://www.alternative-energy-news.info/what-factors-affect-the-output-of-wind-turbines/> (дата звернення: 30.11.2023).
62. R. Gasch and J. Tvele (eds.), Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, DOI 10.1007/978-3-642-22938-1_3, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
63. Bayrak G. Fault ride-through (FRT) capability and current FRT methods in photovoltaic-based distributed generators/ G. Bayrak, D. Ghaderi//Power Quality in Modern Power Systems. – 2021. – PP. 133-149.
64. СОУ НЕК 20.571:2018 Стандарт підприємства. Визначення необхідних умов алгоритмів врахування ВЕС та СЕС при налаштуванні протиаварійних автоматичних пристроїв, призначених для запобігання порушенню стійкості (АЗП) у перетинах ОЕС України, на режим роботи яких вони мають вплив. Методичні рекомендації.
65. D. Xiang, L. Ran, P. Tavner, and S. Yang, “Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride through,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 3, pp. 652–662, Sep. 2006.
66. S. Seman, J. Niiranen, S. Kanerva, A. Arkkio, and J. Saitz, “Performance study of a double fed wind-power induction generator under network disturbances,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 4, pp. 883–890, Dec. 2006.

- 67.O. Gomis-Bellmunt, A. Junyent-Ferre, A. Sumper, and J. Bergas-Jane, “Ride-through control of a doubly-fed induction generator under unbalanced voltage sags,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 4, pp. 1036–1045, Dec. 2008.
- 68.J. Yao, H. Li, Y. Liao, and Z. Chen, “An improved control strategy of limiting the DC-link voltage fluctuation for a doubly fed induction wind generator,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1205–1213, May 2008.
- 69.D. Xiang, L. Ran, P. Tavner, and S. Yang, “Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride through,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 3, pp. 652–662, Sep. 2006.
- 70.Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с
- 71.Положення (стандарт) бухгалтерського обліку 16 «Витрати» зі змінами. URL: <https://kodeksy.com.ua/buh/psbo/16.htm> (дата звернення 12.12.2023).