

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня освіти

на тему:

«ДОСЛІДЖЕННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ»

Виконав: студент 4 курсу

групи Ен-41 спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

_____ Гузоватий А. Р.

Керівник: _____ Коробка С. В.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

" ____ " _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Гузоватому Артему Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: "Дослідження вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі"

керівник роботи: к.т.н., доцент Коробка С. В.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП 641/к-с 27.11.2023 р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 10.06.2024 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

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

Вступ

4.1. Аналіз потенціалу відновлюваних джерел в Україні

4.2. Розрахунок комбінованої автоматичної установки.

4.3 Розробка комбінованої автоматичної установки.

4.4. Охорона праці та довкілля.

4.5. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання комбінованої автоматичної установки.

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	<i>Городецький І. М. к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання: 04.03.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз потенціалу відновлюваних джерел в Україні</i>	4.09.2023 – 22.01.2024	
2	<i>Розрахунок комбінованої автоматичної установки.</i>	23.01.2024 – 29.01.2024	
3	<i>Розробка комбінованої автоматичної установки.</i>	02.02.2024 – 13.02.2024	
4	<i>Охорона праці та довкілля</i>	16.02.2024 – 23.02.2024	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання комбінованої автоматичної установки..</i>	26.02.2024 – 04.03.2024	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	05.03.24 – 29.03.24	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	01.04.23 – 30.04.24	

Студент _____ Гузоватий А. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Коробка С. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 631.3.45.9

Гузоватий А. Р. «Дослідження вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 55 с. текстової частини, 15 таблиць, 19 рисунків, 31 джерел посилання.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи вітроенергетичної установки на підставі обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі, що забезпечить зменшення затрат енергоресурсів для умов України.

Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати наступні **завдання**: необхідно провести критичний аналіз підвищення ефективності роботи вітроенергетичної установки; ретельний аналіз факторів обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі за допомогою вітроенергетичної установки.

Робота аналізує підвищення ефективності роботи вітроенергетичної установки на підставі обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі, щоб забезпечити зменшення затрат енергоресурсів для умов України. Розроблено напрямки аналізу факторів обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі за допомогою вітроенергетичної установки. Здійснено розробку та дослідження ефективності роботи вітроенергетичної установки на підставі обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.

Ключові слова: вітроенергетична установка, параметри якості електричної енергії в локальній мережі.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ В УКРАЇНІ.....	8
1.1 Система перетворення енергії вітру.....	8
1.2 Робота вітрової турбіни.....	9
1.3 Конфігурація вітрових турбін.....	11
1.4 Обґрунтування актуальності теми роботи	14
РОЗДІЛ 2. ОПТИМАЛЬНИЙ ПРОЕКТ ГЕНЕРАЦІЇ ВІТРОЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНІЙ РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	15
2.1 Обґрунтування генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки.....	15
2.2 Постановка задачі та обмеження генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки.....	17
2.3 Обмеження рівності генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки.....	18
2.4 Обмеження нерівності лінії розподілу генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки.....	18
2.5 Тестові мережі, порівняння та результати генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки.....	19
2.6 Оцінка застосованих алгоритмів генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки.....	20
2.7 Аналіз ефективності напруги за алгоритмом GTO генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки.....	24
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ТА ІНЖЕНЕРНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ.....	27
3.1 Інженерні підходи до дослідження вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.....	27
3.2 Класифікації WECS вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.....	30
3.3 Методологія аналізу вітроаккуючих систем для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.....	35
3.4 Технології зберігання електротехніки вітроаккуючих систем для	

підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.....	37
3.5 Грид-аналіз роботи вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.....	41
3.6 Результати моделювання роботи вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.....	43
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ.....	47
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	47
4.2 Протипожежна безпека і гроззахист.....	48
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ВІТРОЕНЕРГІЇ.....	49
5.1 Обґрунтування економічної ефективності виробництва вітроенергії в локальних мережах.....	49
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	56
ПОСИЛАННЯ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57

ВСТУП

Сьогодні інженери працюють над тим, щоб досягти максимально можливого використання енергії вітру з низькими витратами шляхом покращення продуктивності у спробах реалізувати прогнози вітроенергетики на майбутнє.

Насправді, досягти цього в основному непросто завдання через складнощі, які частково випливають із стохастичної природи енергії вітру.

Крім того, на зусилля в цьому відношенні також можуть вплинути постійні тенденції в різноманітній вітроенергетичній технології, пов'язані з перетворенням та інженерні підходи. Отже, визначається оптимізація вітроенергетики залежно від типів технологій WECS, згладжування вихідної потужності та підходів до розробки дизайну бути працевлаштованим.

В даний час технології WECS на основі змінної швидкості, як правило, використовуються у вітрових електростанціях програми. Між тим, система керування живленням є серцем WECS, де згладжується вихідна потужність скорочення витрат може бути реалізовано. З іншого боку, про стратегії автоматизованого контролю повідомлялося з літератури для кращої оптимізації продуктивності WECS, зокрема з точки зору вартості порівняно з пристроями ESS.

На цьому базові, МВРС і гібридні алгоритми керування зазвичай представлялися, як поточний стан техніки для систем моделювання, як MBD вважали за ефективний і економічний підхід для передової розробки автоматизовані системи управління.

Дослідження кваліфікаційної роботи спрямоване на проведення порівняльного аналізу технологій WECS (з різні генератори та PEC) на основі їх можливостей збору енергії, економічної ефективності та досягнень у конструкції. Також наведено оцінки підходів і стратегій згладжування виробництва електроенергії. нарешті, дослідження робить висновок, що найбільш переконливими є тенденції в PEC, стратегіях автоматизованого контролю та MBD.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ В УКРАЇНІ

1.1 Система перетворення енергії вітру

Система перетворення енергії вітру (WECS) містить вітрові турбіни та конвертер перетворювачі. Використання вітрових турбін для отримання механічної енергії вітру, генераторів перетворює її в електричну енергію, а система перетворювача відповідає за її передачу вироблену енергію до електромережі або акумуляторної батареї.

Під час перетворенні енергії вітру для отримання електроенергії зі змінною швидкістю найчастіше використовуються синхронні генератори та індукційні генератори з подвійним живленням (DFIG) [2, 7]. При використанні індукційних генераторів в ротор і статор підключені безпосередньо до мережі, але діє електронний перетворювач, як посередник між двома. Так, як ланцюг ротора може самостійно змінюватися амплітуди та частоти виробленої напруги, DFIG довгий час був кращим вибір для великих WECS зі змінною швидкістю, які підключаються безпосередньо.

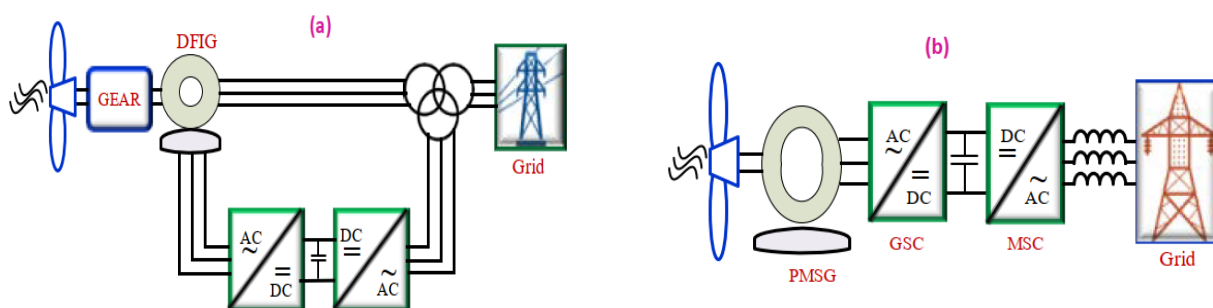


Рисунок 1.1 – Система перетворення перетворювачів із частковими номінальними характеристиками та повномасштабний перетворювач потужності змінної швидкість: (a) система перетворення конвертерів із частковим номінальним значенням; (b) система перетворення перетворювачів на повномасштабний більш значний рівень.

Генератори, які генерують синхронну потужність, відключені від розподільчої мережі буціяна сітка [8]. В результаті вони включені в системи,

які використовують повномасштабні перетворювачі. Через відсутність редуктора багатополосний синхронний генератор на постійних магнітах (PMSG) була переважною альтернативою в останні роки, зменшуючи втрати WECS, зменшуючи запити на технічне обслуговування та підвищення ефективності та надійності системи [3]. На рис. 3 б ілюструє його конфігурацію [7]. У ланках постійного струму для розсіювання часто використовується схема переривника електроенергії у разі збоїв у мережі [3].

У порівнянні з DFIG, PMSG пропонує наступне низькі переваги: не потрібно зовнішній стимулюючий струм; висока надійність; легкий; низькі витрати; маленький розмір; і високою ефективністю [9]. Раніше було визнано використання синхронних генераторів з постійними магнітами насамперед у крихітних WT, але не у великомасштабному виробництві електроенергії через величезні та важкі потрібні постійні магніти [3, 4].

Використання вітрових турбін на основі постійного магніту генераторів (PMG) швидко зростає завдяки розвитку напівпровідників перемикачі та підвищення ефективності та надійності; також інноваційні матеріали використання в роторі генератора дозволило використовувати ФМГ на високій потужності [3, 5].

Крім того, можна уникнути налаштування коробки передач, яка є обов'язковою для великих і середніх WT використання прямого приводу зі змінною швидкістю. Завдяки своїй простоті вітрогенератор з прямим приводом зараз ПМГ використовується у вітроенергетичній системі, як найбільш перспективний [3, 6].

1.2 Робота вітрової турбіни

Вітроустановки використовують вдосконалені алгоритми керування завдяки швидкому розвитку промисловості експертиза [3, 7]. У WECS кінетична енергія вітру перетворюється на механічну за допомогою WT, яка згодом перетворюється в електричну енергію. Бо енергія вітру є не готовий до

інтеграції в мережу, було розроблено кілька топологій конвертера розроблено для належного керування перетворювачем на стороні мережі (GSC) і коннектором на стороні машини. вітер [3, 8].

У відповідь на це базове керування WECS використовується для обслуговування електроенергії потреби мережі при різних швидкостях вітру, як показано на рисунку 1.3 а. Непередбачуваний та сильно впливає на вітер характер швидкості вітру і мінливість клімату енергетична надійність. Через це дуже важливо розуміти природу вітру і визначити його робочі зони для ефективної інтеграції WT в комунальну мережу, зв'язок із вимірною швидкістю [3, 9].

Таким чином, для певного діапазону швидкості вітру обмежена швидкостями відключення (V_{cut-in}) і включення ($V_{cut-out}$), WT можна використовувати для збору доступна вітрова енергія, як пояснюється на рисунку 1.2 а, б [3]. Типовий змінний і фіксований криві потужності швидкості вітру $2H$.

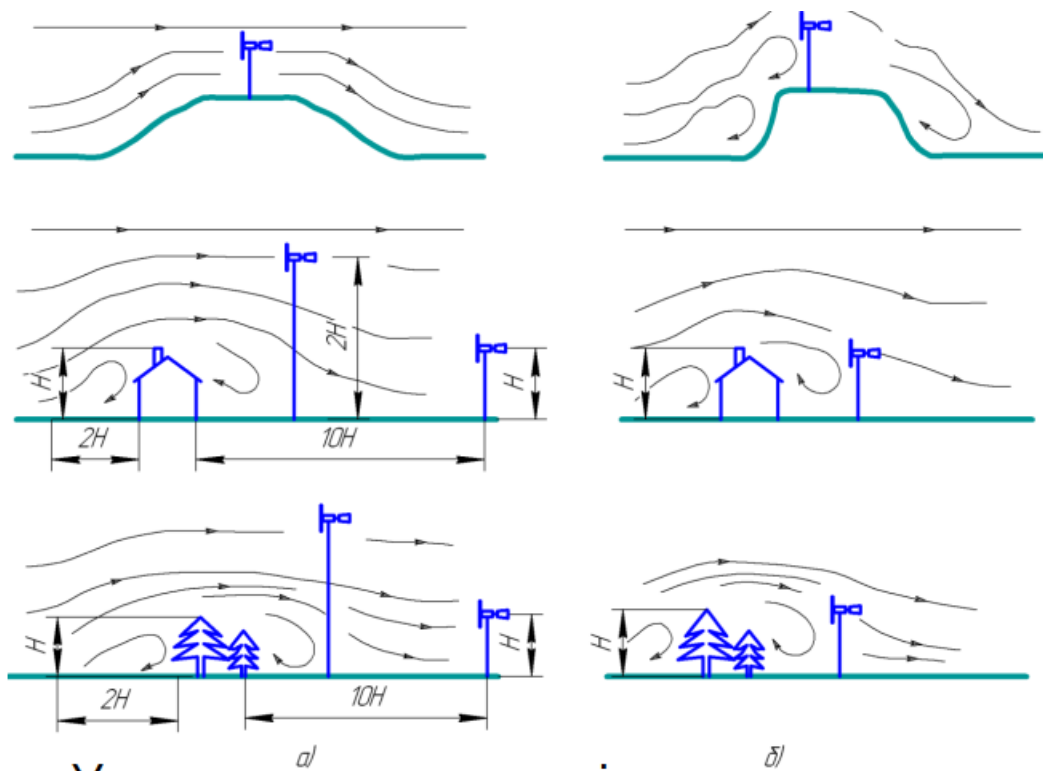


Рисунок 1.2 – (а) Области роботи WT [1], (б) типова змінна і фіксовані криві потужності швидкості вітру [4].

Відповідно, нижче наведено розбивку операційних сфер WT:

- Регіони 1 і 4: з міркувань безпеки необхідно зупинитися та від'єднатися WT від електричної мережі.

- Регіон 2: енергія вітру використовується в повній мірі в центральному регіоні MPPT системи.

- Регіон 3: лопаті WT захищені від механічного впливу при високій швидкості вітру обмеження генерованої потужності до її номінальної потужності за допомогою керування кутом нахилу. WT можуть функціонувати, як WT з фіксованою швидкістю (FSWT) або WT зі змінною швидкістю (VSWT) [2].

Через обмежений діапазон швидкості та високу механічну напругу FSWT стикаються з рядом основних питань. З іншого боку, VSWT використовуються для вирішення обмежень викладено вище [4]. VSWT може працювати, щоб уловлювати найбільше електроенергії за будь-якої швидкості вітру, зменшення механічного навантаження на WT і мінімізація коливань потужності, що зменшує механічне навантаження на WT [44,45].

Швидкість ротора також можна безперервно змінювати, щоб підтримувати, а постійне співвідношення швидкості ротора до швидкості вітру у відповідь на миттєві зміни у швидкості вітру. За відсутності сталого співвідношення видобуток енергії вітру буде зменшено до мінімуму [3, 4, 6].

1.3 Конфігурація вітрових турбін

У WT кінетична або механічна енергія вітру перетворюється на електрику. При підключенні WT до електричних мереж можна використовувати три основні конфігурації для цієї мети.

Асинхронна машина – це типовий індукційний генератор з короткозамкненим ротором миттєво підключається до комунальної мережі без потреби в електрообміннику. Реактивна потужність є необхідні для роботи асинхронної машини. Як комунальна енергосистема, так і машина для цієї мети можна використовувати кінцеві конденсатори. Ці пристрої не здатні доставляти

будь-яку реактивну потужність [4, 7]. DFIG використовуються у другому типі дизайну, який передбачає використання намотуваного ротора. Для захоплення електрики від обертового ротора використовуються контактні кільця на частоті ковзання. Ця потужність змінного струму повинна проходити через випрямляч і інвертор на основі перетворювача.

Завдяки цій конфігурації розмір обмотки статора генератора може бути зменшений на 25 – 30 %, причому перетворювачі компенсують розбіжність потужності генератора і ротора. З іншого боку, витрата перетворювачів збільшує загальну суму вартість такої системи [19]. Виробляються вихідні сигнали зі змінною напругою та частотою з використанням постійного або звичайного магніту синхронного генератора третього роду WT. Тому інвертор і випрямляч на основі силової електроніки переробляються необхідний для перетворення загальної номінальної вихідної потужності WT на рівень, сумісний з утилітою електромережі [4, 8]. Два і більш сучасних дизайну (в обох є конвертери) дозволяють вітряній турбіні працювати в режимі змінної швидкості, що може збільшити загальну суму кількість енергії вітру, зібраної турбіною [19].

Існує кілька способів перетворити енергію вітру в електрику, але найпопулярнішим вибором є індукційний генератор. Виробництво енергії вітру з використанням індукції в клітці білки генератор (SCIG) – одна з трьох основних конструкцій вітрових електростанцій (WF), які зараз використовуються [4, 9]; вітер енергетична система, що використовує, як DFIG, так і синхронний генератор з прямим приводом (DDSG). пояснено на рисунку 1.3 [5]. На рис. 1.3 а показано WF з SCIG, який є найдорожчим ефективний підхід, оскільки він підключений безпосередньо до електричної мережі. Воно поширене для батарея конденсаторів, яка буде встановлена на одному з терміналів вітряної турбіни, щоб компенсувати місцевим реактивна потужність, створена вітровою турбіною, яка коливається залежно від того, наскільки сильно генерується потужність [5]. Послідовні перетворювачі, які мають лише частину своєї потужності живлення використовуються для розділення частот

механічного та електричного роторів, як видно на рис. 1.3 b і останнє, але не менш важливе, WF з DDSG показано на рис. 1.4 c, де повна потужність зворотні перетворювачі використовуються для відключення генератора від комунальної мережі повністю.

У нових WF стає все популярнішим мати DFIG або DDSG підключений до мережі через конвертер. Однак половина або більше розгорнутих на даний момент WF продовжують використовувати архітектуру SCIG

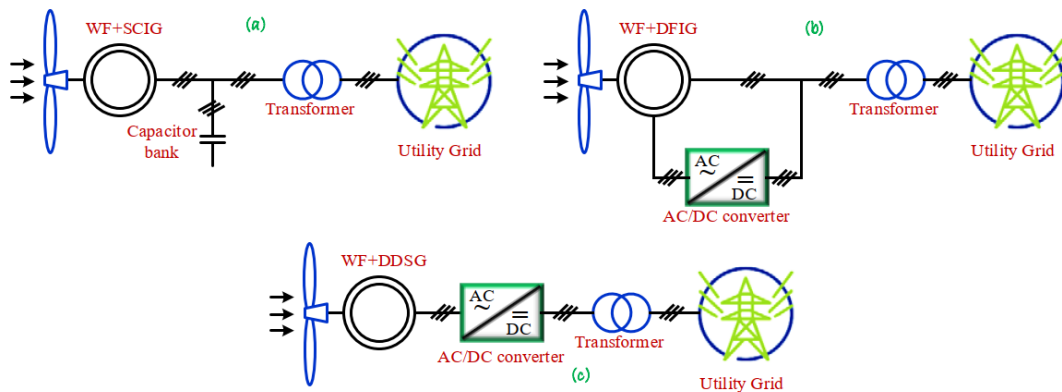


Рисунок 1.3 – WF, оснащені індукційним генератором і стандартним трансформатором для сполучення (a) SCIG. (b) DFIG. (c) DDSG.

З початку 1980-х років у технології вітряних турбін було досягнуто багато прогресу, але основна концепція залишилася незмінною. Щоб контролювати швидкість зв'язаного валу, горизонтальний ротор з трьома поворотними лопатями використовується в сучасній горизонтально-осьовій вітряній турбіні (HAWT) для збору енергії вітру. Цей тип ротора має три лопаті і широко використовується. Це зазвичай має передній підшипник, який є незалежним і з'єднаний з коробкою передач на низькій швидкості, що робить його придатним для найпоширеніших типів чотири- та двополюсних генераторів [5].

На вітровій турбіні з вертикальною віссю (VAWT) вісь валу є вертикальною та перпендикулярною землі, дозволяючи йому вільно обертатися. Коли дме вітер, VAWT завжди обличчям до вітру. Загалом сучасна вітрова промисловість найбільше стикається з основною проблемою проектування ефективні вітрові турбіни для використання енергії вітру та виробництва електроенергії [3]. Це зайняло промисловості вітрових турбін 30

років, щоб перейти від ідеалістичної маргінальної діяльності до головного гравця енергетична промисловість, оскільки турбіни зросли в розмірах у 100 разів, а витрати на енергію зменшилися більш ніж у 5 разів.

Одночасно інженерна основа та обчислювальні інструменти еволюціонували відповідно до масштабу та об'єму машини. До цього моменту це була чудова розповідь про вітрові турбіни; незважаючи на це, ще багато технологічних перешкод, які потрібно подолати, і ще багато вражаючих досягнень попереду.

1.4 Обґрунтування актуальності теми роботи

Метою дослідження – підвищення ефективності роботи вітроенергетичної установки на підставі обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі, що забезпечить зменшення затрат енергоресурсів для умов України.

Тому відповідно до поставленої мети сформульовано наступні завдання дослідження:

1. Необхідно провести критичний аналіз підвищення ефективності роботи вітроенергетичної установки.
2. Ретельний аналіз факторів обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі за допомогою вітроенергетичної установки.
3. Здійснити розробку та критичне дослідження ефективності роботи вітроенергетичної установки на підставі обґрунтування оптимальних параметрів якості електричної енергії в локальній мережі.
4. Обґрунтувати охорону праці та довкілля під час експлуатації вітроенергетичної установки.
5. Виконати техніко-економічне обґрунтування ефективності використання вітроенергетичної установки в локальній мережі.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМАЛЬНИЙ ПРОЕКТ ГЕНЕРАЦІЇ ВІТРОЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНІЙ РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

2.1 Обґрунтування генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки

Збільшення використання електроенергії, збільшення вартості будівництва великих електростанцій і значне забруднення, пов'язане з виробництвом електроенергії, призвело до децентралізованої генерації (DG), заснованої в основному на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), що представляє серйозні зміни в секторі виробництва електроенергії. На додаток до забезпечення доступною та екологічно чистою енергією пропонується розподілена генерація на основі вітрових турбін (WTG), численні значні переваги, такі як мінімізація втрат електроенергії, купівля електроенергії, зниження напруги відхилення та підвищення якості електроенергії [1].

У контексті розумних мереж оптимальний потік електроенергії та відновлювана енергія енергетичне планування в мережах розподілу електроенергії (PPM) є найпоширенішими завданнями оптимізації. З іншого боку, метаевристичні методи – це підмножина алгоритмів оптимізації, які теоретично найкраще здатні вирішувати проблеми оптимізації інтелектуальної мережі та досягати результатів вищої якості, ніж звичайні методи.

Проблема оптимального розподілу WT полягає в тому, щоб розрахувати найкраще розташування та розмір блоків DG, які будуть встановлені в існуючій EDN на основі різних технічних обмежень [3].

У [12] оптимізація (MRFO) алгоритм був застосований для зменшення загальної вартості, викидів забруднюючих речовин і коливань напруги, в [13] модифікований алгоритм рівноваги (MEA) був застосований для зниження вартості виробництва електроенергії та активної потужності втрати, а в [14]

алгоритм оптимізатора Aquila (AOA) був застосований для мінімізації витрат на виробництво тепла.

Автори в [15] запропонували модифікований алгоритм пошуку симбіотичних організмів (MSOS), заснований на кількох технічних та економічних цілей, алгоритм Chaotic Sequence Spotted Hyena Optimizer (CS-SHO) був використовується для мінімізації втрат і покращення профілю старіння напруги на основі індексу стабільності напруги в [16], новий алгоритм хаотичного стохастичного фрактального пошуку (CSFS) використовувався для мінімізації втрат потужності в [17], алгоритм Oppositional Gray Wolf Optimizer (QOGWO) для мінімізації загальних річних економічних втрат за допомогою максимальна техніко-економічна вигода в [18], метод хаотичної диференціальної еволюції (CDE) для зменшення різноманітних техніко-економічні показники в [19], алгоритм штучного електричного поля (AEFA) для зменшення втрат потужності та відхилення напруги в [20].

Застосування алгоритму Salp Swarm (SSA) для зменшення втрат активної потужності в [21], алгоритм психологічної оптимізації (SPBO) з аналізом витрат з урахуванням моделей навантаження в [22]. Алгоритм оптимізації (COA) використовувався для зменшення ефективних втрат Wolf Optimizer (GWO) використовувався для мінімізації одночасних індексів різних технічних параметрів враховуючи сезонні невизначеності в [24]. Нещодавно був розроблений адаптивний алгоритм PSO для зменшення річних втрат енергії та коливань напруги в лініях електропередачі [25] для мінімізації втрат потужності та покращення стабільності напруги використовувався алгоритм оптимізації (TSO) [26].

У цьому автори застосували численні нові метаевристичні алгоритми природи, які використовувалися для вирішення проблем нелінійної оптимізації для інтеграції WTG одиниць в EDN: Dingo Optimization Алгоритм (DOA) в [27], алгоритм оптимізації Архімеда (AOA) в [28], алгоритм оптимізації Кута (COA) в [29], алгоритм оптимізації Mayfly (MOA) в [30], алгоритм оптимізації (SAO) в метод сформульований у багатоцільовій функції (MOF).

2.2 Постановка задачі та обмеження генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки

Багатоцільові функції (MOF), вирішені в цій статті, були присвячені пошуку та ідентифікації оптимальне налаштування та розмір кількох блоків WTG у системі розподілу електроенергії. Ці рівняння показують їх математичне формулювання:

$$MOF = \text{Minimize} \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{i=2}^{N_{bus}} \sum_{i=1}^{N_{WTG}} [TAPL_{i,j} + TVD_j + IC_{WTG,i}] \quad (2.1)$$

TAPL формулюється так [11-18]:

$$TAPL_{i,j} = \sum_{i=1}^{N_{bus}} \sum_{i=2}^{N_{bus}} APL_{i,j} \quad (2.2)$$

$$APL_{i,j} = \alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j + Q_j P_i) \quad (2.3)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2.4)$$

$$\beta_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2.5)$$

де R_{ij} відноситься до опору в розподільній лінії, N_{bus} – кількість шин, (δ_i, δ_j) , (P_i, P_j) і (Q_i, Q_j) — активна і реактивна потужності відповідно, (V_i, V_j) — напруга на шині, ТВД формулюється, як у [6, 7]:

$$TVD_j = \sum_{i=2}^{N_{bus}} |1 - V_j| \quad (2.6)$$

Інвестиційна вартість IC_{WTG} WTG означає загальний капітал, експлуатаційні витрати та витрати на технічне обслуговування WTG встановлених одиниць [3, 8]: і формулюється так:

$$IC_{WTG,i} = \sum_{i=1}^{N_{WTG}} [C_{WTG} \cdot P_{WTG,i}] \quad (2.7)$$

де N_{WTG} , C_{WTG} і P_{WTG} – кількість встановлених одиниць WTG, вартість одного WTG в \$/кВт, а активна інжектована потужність ВЕТГ у кВт відповідно. IC_{WTG}

представляє капітальні витрати ($C_{WTG}^{Capital}$), експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування ($C_{O\&M}^{WTG}$) [3, 8]:

$$C_{WTG} = C_{Capital}^{WTG} \cdot C_{O\&M}^{WTG}, (\$/кВт) \quad (2.8)$$

Капітальні витрати ($C_{Capital}^{WTG}$) становлять 5800 \$/кВт, включаючи турбіни, конвертери, транспортування та встановлення. Вартість обслуговування ($C_{O\&M}^{WTG}$) становить 40 \$/кВт.

2.3 Обмеження рівності генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки

$$P_G + P_{WTG} = P_D + P_{Loss} \quad (2.9)$$

$$Q_G + Q_{WTG} = Q_D + Q_{Loss} \quad (2.10)$$

де P_G і Q_G – потужності генератора; P_{WTG} і Q_{WTG} є сумарними потужностями WTG. P_D і Q_D сумарні потужності навантаження. P_{Loss} і Q_{Loss} – це сумарні активні та реактивні втрати.

2.4 Обмеження нерівності лінії розподілу генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad (2.11)$$

$$|1 - V_i| \geq \Delta V_{\max} \quad (2.12)$$

$$|S_{ij}| \leq S_{\max} \quad (2.13)$$

де V_{\max} і V_{\min} максимальна і мінімальна задані напруги; ΔV_{\max} – максимальне падіння напруги. V_1 – напруга підстанції = 1,0 о.е. S_{ij} – це видима потужність у ij . S_{\max} – максимальна повна потужність.

Обмеження нерівності одиниць WTG

$$P_{WTG}^{\min} \leq P_{WTG} \leq P_{WTG}^{\max} \quad (2.14)$$

$$Q_{WTG}^{\min} \leq Q_{WTG} \leq Q_{WTG}^{\max} \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{WTG}} P_{WTG}(i) \leq \sum_{i=2}^{N_{bus}} P_D(i) \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{WTG}} Q_{WTG}(i) \leq \sum_{i=2}^{N_{bus}} Q_D(i) \quad (2.17)$$

$$2 \leq WTG_{Position} \leq N_{Bus} \quad (2.18)$$

$$N_{WTG} \leq N_{WTGmax} \quad (2.19)$$

$$n_{WTG,i} / Location \leq 1 \quad (2.20)$$

$$PF_{WTG}^{\min} \leq PF_{WTG} \leq PF_{WTG}^{\max} \quad (2.21)$$

$$PF_{WTG} = \frac{P_{WTG}}{\sqrt{P_{WTG}^2 + Q_{WTG}^2}} \quad (2.22)$$

де (P_{WTG}^{\min} , Q_{WTG}^{\min} , P_{WTG}^{\max} , Q_{WTG}^{\max}) – межі потужностей WTG. ($WTG_{Position}$, N_{WTG} , N_{WTGmax}) є позиція WTG, кількість і максимальна кількість одиниць на місце на шині і відповідно. PF_{WTG} – коефіцієнт потужності WTG.

2.5 Тестові мережі, порівняння та результати генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки

Вибрані мета евристичні алгоритми були перевірені та застосовані на двох стандартах IEEE 33-bus і Шина IEEE 69 з використанням програмного забезпечення MATLAB (версія 2020b) з ПК із процесором Intel Core i5, 3,4 ГГц і 8 ГБ оперативної пам'яті.

Дві стандартні тестові системи демонструються за допомогою лінійних діаграм на рис. 2.1, де прикладена базова напруга становить 12,66 кВ в обох. Шина IEEE 33 складалася з 33 шин і 32 гілки, включаючи загальне навантаження 3715,00 кВт і 2300,00 кВар, тоді як шина IEEE 69 включала 69

автобусів та 68 відділень, у тому числі сумарним навантаженням 3790,00 кВт, 2690,00 кВар [3, 9].

2.6 Оцінка застосованих алгоритмів генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки

На рис. 2.2 представлені криві збіжності застосованих алгоритмів для обох тестових систем EDNs оптимальна інтеграція WTG блоків. На малюнку 2 помітно, що з точки зору аналізу результатів Алгоритм GTO забезпечив найкращі криві збіжності. Примітно, що для алгоритму GTO потрібно більше 50 ітерацій для сходження. З іншого боку, алгоритм MOA забезпечив найкращі криві щодо швидкості збіжності для обох випадків, яка може отримати рішення, близьке до найкращого рішення лише після 20 ітерацій. Алгоритми DOA і AOA є найгіршими щодо результатів MOF і швидкості конвергенції. Крім того, Алгоритми EOA і AVO демонструють відмінну швидкість конвергенції, а їх результати близькі до оптимальних значення, отримані за допомогою алгоритму GTO.

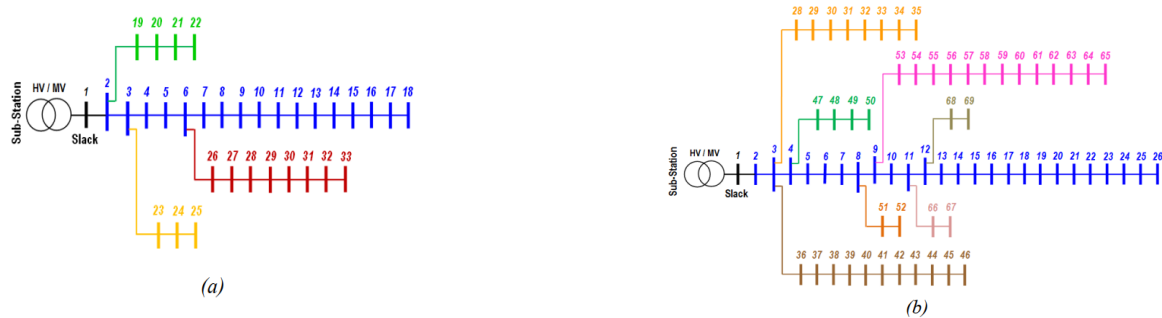


Рисунок 2.1 – Однолінійна діаграма перевіреної EDN: а – шина IEEE 33; б – шина IEEE 69

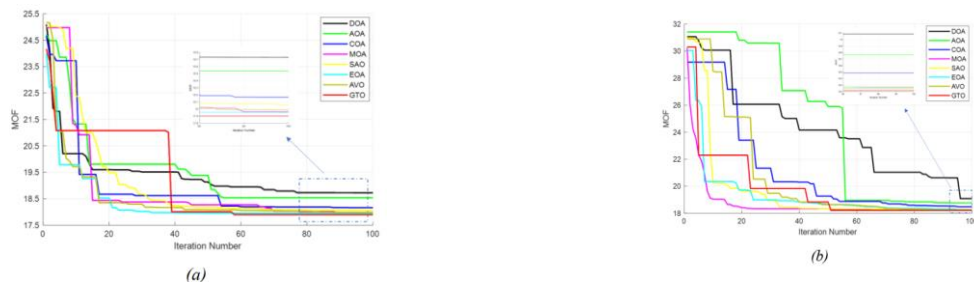


Рисунок 2.2 – Криві збіжності застосованих алгоритмів: а – шина IEEE 33; б – шина IEEE 69

Рис. 2.3 ілюструє Boxplot застосованих алгоритмів після 20 виконань для обох тестових систем, тоді як інтеграція блоків WTG.

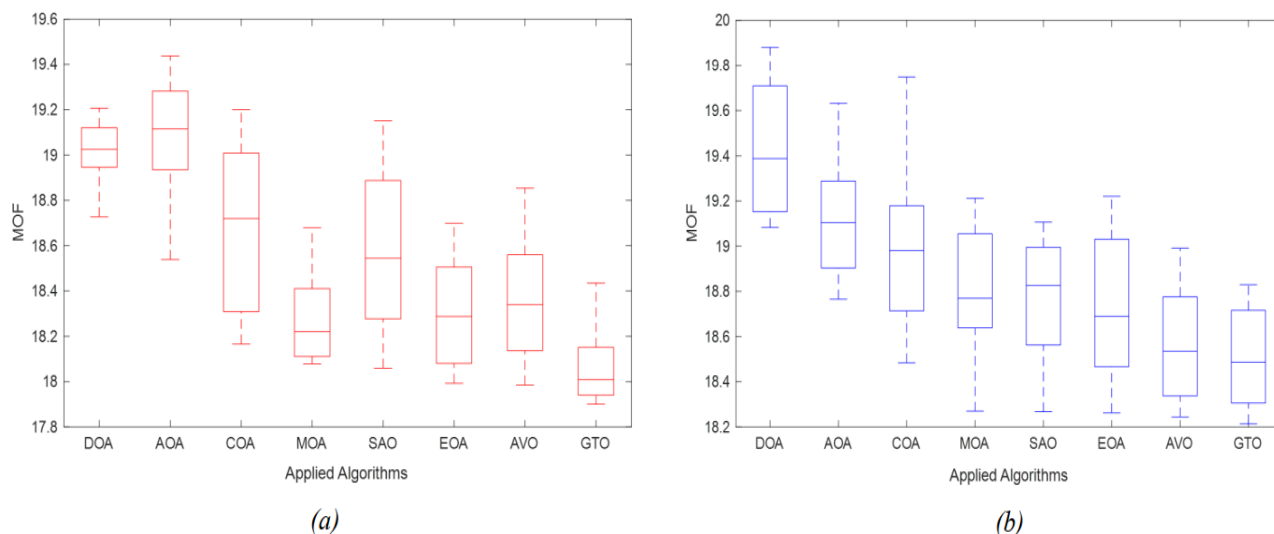


Рисунок 2.3 – Boxplot MOF з використанням застосованих алгоритмів: а – шина IEEE 33; б – шина IEEE 69

Аналіз рисунка 2.3 показує, що результати 20 запусків алгоритму GTO дуже близькі, один до інший. Результати алгоритму DOA для шини IEEE 33 також близькі один до одного, але з точки зору якості вони здаються найгіршим. Результати, віддалені один від одного в шині IEEE 33, отримані шляхом застосування COA, а потім алгоритми ASO. З іншого боку, для шини IEEE 69 результати алгоритмів COA та EOA є також найбільш віддалені один від одного.

У таблицях 2.1 і 2.2 наведено статистичний аналіз для обраної метаевристички алгоритми, застосовані для оптимального розміщення блоків WTG в обох тестових системах EDN. Як зазначено в таблиці, статистичний аналіз проводився після 20 виконань для кожного застосованого алгоритму для перевірки їх дієвість і ефективність. Отже, на основі обраних індексів: найкращий, найгірший, середній, стандартне відхилення (SD) і час ЦП. Підсумок аналізу показує, що алгоритм GTO був кращим і показав найкраще ефективність усіх сторін статистичного аналізу для обох систем EDN. Надано

та доставлено алгоритм GTO найкраще та найменше значення MOF на 18,214 та 18,829 відповідно. Крім того, мінімальне середнє значення і Значення SD 18,515 і 0,207, включаючи другий найшвидший процесорний час 166,04 секунд після SAO алгоритм досяг свого оптимального рішення лише через 164,33 секунди.

Таблиця 2.1 – Аналіз результатів алгоритмів для IEEE 33-шини

Прикладний Алгоритм	Найгірший варіант	Перехідний варіант	Добрий варіант	СД	Час ЦП (с)
DOA	19,207	19,018	18,727	0,131	90,22
AOA	19,438	19,092	18,538	0,258	93,28
COA	19,200	18,685	18,166	0,363	91,80
MOA	18,679	18,279	18,079	0,177	82,42
SAO	19,151	18,581	18,059	0,349	99,30
EOA	18,699	18,295	17,992	0,231	89,89
AVO	18,854	18,366	17,984	0,260	93,28
GTO	18,434	18,064	17,900	0,152	86,88

Таблиця 2.2 – Аналіз результатів алгоритмів для IEEE 69-шини

Прикладний Алгоритм	Найгірши й варіант	Перехідний варіант	Добрий варіант	СД	Час ЦП (с)
DOA	19,879	19,430	19,082	0,282	162,19
AOA	19,631	19,115	18,765	0,250	158,48
COA	19,748	18,970	18,483	0,321	172,30
MOA	19,212	18,802	18,269	0,272	174,03
SAO	19,107	18,763	18,267	0,275	164,33
EOA	19,221	18,739	18,262	0,316	169,84
AVO	18,991	18,575	18,244	0,240	189,43
GTO	18,829	18,515	18,214	0,207	166,04

Таблиці 2.3 і 2.4 ілюструють оптимальні результати після застосування різних метаевристичних алгоритмів для інтеграції кілька блоків WTG в обох EDN. Обидва результати з таблиць 2.3 і 2.4 показали ефективність і стійкість усіх застосованих і обраних метаевристичних алгоритмів у забезпеченні ідеальних результатів мінімізації MOF для обидві тестові системи EDN.

Таблиця 2.3 – Оптимальні результати використання шини IEEE 33

Прикладний Алгоритм	Bus	P_{WTG} (MW)	Q_{WTG} (MVar)	APL (MWh)	As4.PL (%)	VD (pu.)	IC_{WTG} (MS)	MOF
DOA	2	0.0134	0.0101	1.483	58.30	20.388	9.009	18.727
	13	0.7277	0.5457					
	33	0.8017	0.5092					
AOA	2	0.0132	0.0099	1.493	58.02	20.581	9.169	18.538
	17	0.6091	0.3750					
	29	0.9478	0.7109					
COA	15	0.5554	0.3418	1.459	58.98	19.860	9.649	18.166
	17	0.1035	0.0381					
	30	0.9934	0.7451					
MOA	12	0.1062	0.0500	1.449	59.26	20.168	8.906	18.079
	15	0.6544	0.4131					
	31	0.7645	0.5734					
SAO	15	0.6114	0.4333	1.421	60.05	20.111	9.147	18.059
	18	0.0950	0.0101					
	30	0.8598	0.6449					
EOA	10	0.0139	0.0100	1.458	59.01	20.159	8.845	17.992
	15	0.7301	0.4487					
	31	0.7707	0.5781					
AVO	15	0.7346	0.4529	1.453	59.15	20.127	8.894	17.984
	31	0.7336	0.5502					
	33	0.0549	0.0333					
GTO	11	0.4486	0.3365	1.415	60.21	19.830	9.157	17.900
	17	0.3874	0.1973					
	32	0.7320	0.5490					

Крім того, GTO показав чудову ефективність у забезпеченні навіть мінімуму кожного параметра окремо. Де мінімізовано APL і VD до 1,415 МВт-год і 19,830 у.е. для першої тестової системи, окрім APL і IC_{WTG} до 1,072 МВт-год і 10,01 млн. доларів США для другої тестової системи. Ще одне зауваження полягає в тому, що EOA і Алгоритми DOA забезпечили мінімальні

значення IC_{WTG} і VD до 8,845 млн доларів і до 19,84 у.е. для перша та друга тест-системи відповідно.

Таблиця 2.4 – Оптимальні результати використання шини IEEE 69

Прикладний Алгоритм	Bus	P_{WTG} (MW)	Q_{WTG} (MVar)	APL (MWh)	$As4.PL$ (%)	VD (pu.)	IC_{WTG} (MS)	MOF
DOA	15	0.5972	0.3998	1.329	64.88	19.841	11.027	19.082
	61	0.3127	0.2001					
	65	0.9783	0.6403					
AOA	26	0.3274	0.2313	1.104	70.08	19.980	10.981	18.765
	60	0.3569	0.2487					
	60	1.1960	0.8945					
COA	13	0.0155	0.0116	1.275	66.31	21.042	10.145	18.483
	21	0.4063	0.2597					
	63	1.3155	0.9276					
MOA	20	0.4819	0.3170	1.273	66.36	20.611	10.183	18.269
	58	0.0113	0.0085					
	62	1.2506	0.9379					
SAO	23	0.4525	0.2925	1.273	66.36	20.663	10.154	18.267
	62	1.2661	0.9496					
	69	0.0201	0.0143					
EOA	21	0.4157	0.2826	1.228	67.55	20.812	10.122	18.262
	61	1.1485	0.8613					
	65	0.1691	0.1222					
AVO	21	0.4003	0.2817	1.281	66.15	20.641	10.075	18.244
	24	0.0704	0.0338					
	62	1.2545	0.9409					
GTO	24	0.4394	0.2865	1.072	71.67	20.690	10.010	18.214
	61	0.4865	0.3649					
	64	0.7882	0.5912					

2.7 Аналіз ефективності напруги за алгоритмом GTO генерації вітроенергії в локальній розподільній електромережі на базі техніко-економічних параметрів вітроенергетичної установки

На рис. 2.4 представлено добову зміну профілю напруги для обох випадків до і після оптимальної інтеграції блоків WTG в обидва EDN за допомогою алгоритму GTO. З обох рисунків 2.4 видно, що добові значення

профілів напруги було покращено безпосередньо після встановлення блоків WTG у двох тестових системах EDN. Введення як реактивної, так і активної потужності в різні оптимальні місця на основі ГТО алгоритм став причиною цих взірцевих досягнень. Поліпшення профілів напруги було скасовано до добової амортизації значень відхилення напруги, яка становила до 19,830 у.е. для шини IEEE 33 і до 20,69 у.е. для шини IEEE 69.

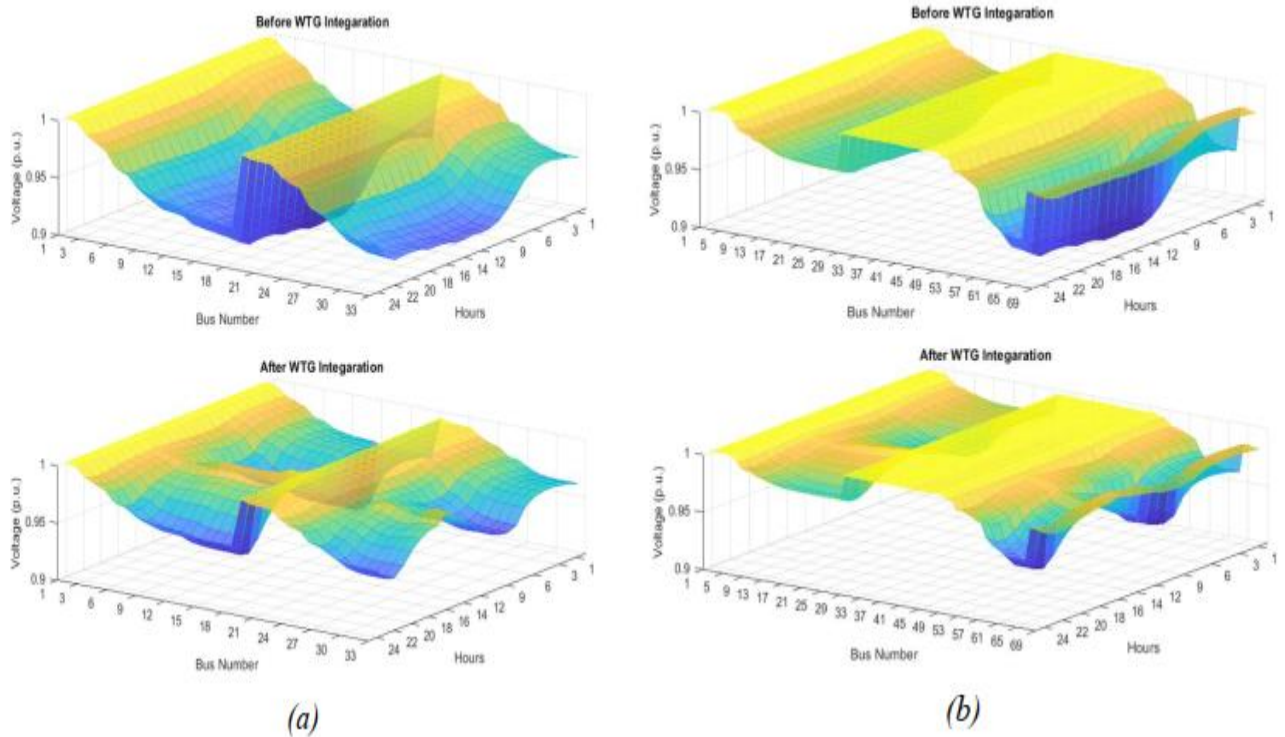


Рисунок 2.4 – Добова зміна профілю напруг шини: а – шина IEEE 33; б – шина IEEE 69

Інше зауваження полягає в тому, що поліпшення профілів напруги реєструвалося майже протягом годин доби, як довго оскільки ВЕЦ забезпечує їх вироблення електроенергії протягом 24 годин без перебоїв. До того ж після оптимального інтеграції блоків WTG, профілі напруги піднялися вище значення 0,95 у.е. у всіх автобусах для дві тестові системи EDN. З цієї причини, що значення напруги 0,95 у.е. являє собою одну з напруг обмеження, які були дотримані під час оптимізації алгоритму ГТО. На рис. 2.5 представляє щоденні дані зміна втрат активної потужності в обох досліджуваних гілках мережі для оптимальної інтеграції ВЕУ.

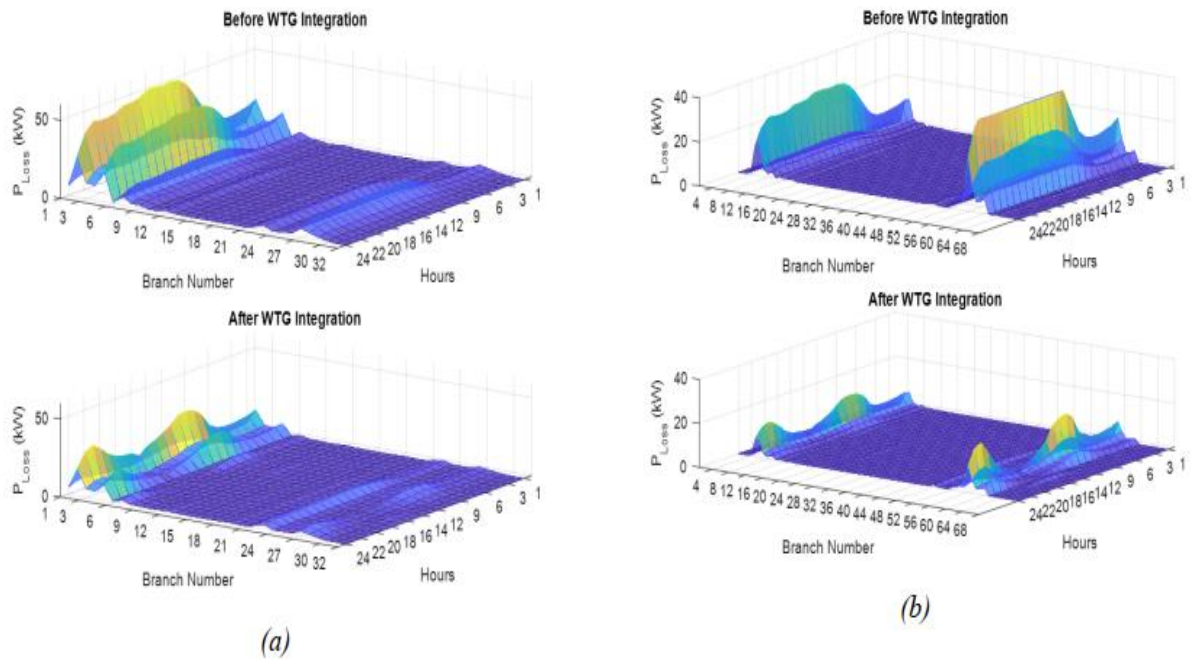


Рисунок 2.5 – Добова зміна втрат активної потужності у гілках: а – шина IEEE 33; б – шина IEEE 69

Оптимальна наявність блоків WTG вплинула на технічні параметри двох тестових систем. Тим часом, згадуючи тривимірну графіку на малюнку 5 щоденних втрат активної потужності в усіх гілках. Добова активна потужність втрати у всіх гілках значно мінімізує дві тестові системи після оптимального встановлення блоків WTG протягом усіх годин дня. ВЕУ спричинили знецінення загальної величини добових втрат активної потужності з 3557,02 кВт·год до 1415,50 кВт·год, включно зі швидкістю зниження 60,21 % для першого EDN, також з 3785,31 кВт·год до 1072,00 кВт·год, включаючи ставку зниження 71,67 % для другого EDN. що вплив мінімізації був пов'язаний з виробництвом ВЕУ як реактивної, так і активної генерованої потужності для обох EDN, майже протягом дня.

У цій роботі розглядається застосування різних нових метаевристичних алгоритмів оптимізації для вирішення проблеми було досліджено оптимальну інтеграцію WT у дві стандартні EDN. Оптимізацію виконував мінімізація кількох цільових функцій, які розглядалися як сукупні техніко-економічні параметри, беручи враховувати щоденну невизначеність попиту на навантаження та коливання потужності джерела.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ТА ІНЖЕНЕРНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ

3.1 Інженерні підходи до дослідження вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі

Ресурс вітру є всюдисущим, і він швидко розвивається, як ефективне джерело екологічно чистої та невичерпної енергії для генерації електроенергії по всьому світу. Дійсно, виробництво електроенергії з вітрові ресурси зазнавали різних рівнів поступового зростання. Докази протягом останніх кількох десятиліть у різних дослідженнях. регіонів світу [1]. Зараз вітрова енергетика поступається лише гідроенергії (водна) енергія, як найпотужніша притока відновлюваної та стійкої можливої потужності у сприянні глобальній електрифікації [2]. Важливо, що виробництво вітрової енергії також буде підтримуватися значне зростання в майбутньому, відповідно до емісії цілі, які були поставлені в роботі [3, 4].

Можливо, інша енергія вітру технології перетворення були розроблені та сприяли для досягнення минулих і останніх віх у виробництві енергії. Ці технології можна класифікувати на різні типи на основі деяких критерії і їхні показники відрізняються відповідно. Наприклад, на основі їх вирівнювання щодо землі [5], WECS зазвичай залежать від будь-якого HAWT або VAWT, де HAWT широко вибирають вітрову енергію промисловості для кращого використання енергії вітру.

Крім того, залежно від швидкості роботи вітрогенератора з посиленням на флуктуацій швидкості вітру [6], технології WECS зазвичай класифікуються, як технології постійної та змінної швидкості. На основі цього класу критеріїв класифікації, різні типи та топології вітрогенератора впроваджено технології виробництва електроенергії з вітру ресурси. SCIG на основі постійної швидкості і на основі змінної швидкості генераторні технології, такі, як DFIG,

PMSG і EES, є одними з них найбільш видатний у сучасній промисловості вітрових електростанцій WECS. Найновіші WECS зазвичай залежать від генератора зі змінною швидкістю технології завдяки їхній видатній ефективності та ширшим можливостям здатність до вдосконалення в майбутньому.

Останнім часом на базі DFIG і PMSG технології WECS із змінною швидкістю тісно конкурують у світі комерційний ринок енергії вітру [7]. Крім того, продуктивність WECS також залежить від типу механічного зв'язку між вітрогенераторами тубіна та генераторного вала: коробка передач та технології прямого приводу наприклад, серед провідних технологій із змінною швидкістю багато і системи з однією коробкою передач із DFIG зазвичай характеризуються низькою динамічна продуктивність і висока ефективність збирання енергії за ціною тоді, як системи з однією коробкою передач і системами прямого приводу з PMSG мають високу динамічні можливості та чудову енергоефективність, але на основі PMSG WECS, як правило, дорогі [8, 9, 10].

Проте, незважаючи на те, що DFIG WECS нещодавно повідомлялося, що він має кращі сукупні переваги в майбутньому тенденції досліджень показали, що PMSG WECS може стати провідний вибір для застосування в вітрових електростанціях, оскільки його робота плавна сумісні з розширеними шкалами напруги та потужності його електричних компоненти перетворення [11, 12]. Отже, оптимізація електричні компоненти WECS на основі PMSG є однією з головних тем останні та майбутні дослідження в галузі вітроенергетики [13]. У той же час WECS на основі EESG наразі знаходиться в безперервному режимі дослідження для кращого підвищення ефективності дизайну в з точки зору вартості, розміру та ваги, хоча він відносно менш популярний через його кумулятивну знижену продуктивність у збиранні енергії вітру [9, 14]. Крім того, вони мають величезний вплив на загальну продуктивність мережеві технології WECS. Серед цих технологій рівень (2L) – перетворювач джерела струму (CSC) [15, 16] та джерело напруги конвертер (VSC) [11, 17] топології в

конфігураціях back-to-back (ВТВ) традиційно використовувалися в малих і середніх вітряках ферми за останні кілька десятиліть; і зазвичай вони були сумісні з технологією WECS на основі DFIG. Ось один з головних недоліків WECS на основі DFIG полягає в тому, що він не підтримує операційну сумісність з силовими перетворювачами підвищеної потужності по потужності та напрузі [18]. Тим не менш, окрім значних цінових переваг, ця технологія є значною мірою підходить для широкого застосування в малих і середніх масштабах берегової вітрової генерації, зокрема з ВТВ 2L-VSC [19, 20].

Увімкнено з іншого боку, модульний багатоелементний перетворювач (MMC) [21, 22, 23] має перебувати у стадії постійного фізичного розвитку дизайну з різними потужності напруги, і останнім часом вважається найсучаснішим особливо для застосування в промисловості вітрових електростанцій на базі PMSG великомасштабне виробництво електроенергії. Головна приваблива риса конструкція WECS на основі PMSG полягає в тому, що потужність його силової електроніки перетворювач можна масштабувати до зростаючих рівнів напруги, що робить застосування цієї технології вкрай бажане для багато масштабу розгортання офшорної вітрової енергії, хоча її висока вартість все ще є основною перешкодою. Було кілька додаткових конструкцій перетворювальних технологій також запропоновано в багатьох дослідженнях для застосування у вітровій енергетиці промисловості. До них відносяться DCC [20, 24], NPC [25, 26], ANPC [27, 28], тощо, і їх було введено для роботи на вітрових електростанціях великі енергетичні потужності, які в основному базуються на системах PMSG. в Крім того, подібні дослідження вказували на те, що ці перетворювачі ще не відбулися бути достатньо зрілим для плавного практичного застосування останнім часом вітроелектростанції тенденції. Тому було запропоновано значні покращення згодом досягнуто в кількох аспектах обмеження названих перетворювачів. які пов'язані з витратами на експлуатацію та обслуговування, вагою, розмір і можливість перетворення потужності.

Було продемонстровано гібридні стратегії контролю в [5, 6], як розроблений шляхом поєднання жорсткого керування, що включає просторово-частково-інтегральна похідна (PID), ковзний режим керування (SMC), адаптивний керування тощо, а також програмне керування, що включає нечітко логічне керування (FLC), керування нейронною мережею (NNC), генетичний алгоритм (GA) тощо, щоб зробити використання сукупних переваг жорстких і м'яких стратегій контролю зменшення складності керування системами для підвищення ефективності і динамічна стійкість.

У практичних застосуваннях гібридні стратегії проектування може оптимізувати системи шляхом усунення відповідних обмежень PID, SMC, FLC, NNC тощо та об'єднавши їх відповідні переваги. Крім того, злиття також може бути зроблено між м'яким і м'які елементи управління, тоді як жорсткі та м'які комбінації були охарактеризовані у деяких дослідженнях, як більш ефективні стратегії. Так само прогнозний контроль на основі моделі (МВРС) був переважно продемонстрований останні дослідження, як передову стратегію привабливі функції, які можна використовувати для розробки ефективних і економічно ефективна система згладжування потужності. Загалом, кінцева мета реалізація цих стратегій (включаючи гібридні та МВРС) є встановити суворі системи контролю потужності, які зрештою відповідають розширені вимоги до експлуатації (надійність живлення, можливість FRT, максимальне виробництво електроенергії, загальна оптимізація витрат) для WECS технологій.

3.2 Класифікації WECS вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі

Швидкість вітру коливається в кількох часових масштабах через руху повітряних мас і численні метеорологічні явища. Ці варіації впливають на енергію вітру, як в умови узгодженості генерованої потужності, яка викликає якість електроенергії занепокоєна, коли вітрова енергія інтегрована енергетичні мережі. Як наслідок переривчастий вітер потужність може спричинити

дисбаланс між місцевим попитом на електроенергію і виробництво електроенергії, що у свою чергу, може призвести до несприятливих перепади напруги та інші ефекти. Такі розбіжності можуть бути досить проблематично в слабких мережах або при частці потужність вітру загальна велика. Існують різні індивідуальні або комбіновані стратегії подолати переривчастість швидкості вітру. Просторова планування передбачає деяку компенсацію вже на вітрі масштабі парку, але тим більше, коли географічний ареал є ширше, оскільки рух повітря стає тим більше неоднорідний.

Друга стратегія забезпечується енергією система, в яку інтегрована енергія вітру – енергія вітру тоді представлятиме додаткову варіацію до електрики навантаження вже компенсується виробничою сумішшю. Наприклад, у західному контексті спільний обмін електроенергією надає також варіанти регулювання вітрової енергії [1]. У випадку ситуацій сильного перевантаження, що обмежує потужність вітру вихід можливий.

Третя можлива стратегія, яка використовується для у віддалених районах або в мікромережах було використання установки для виробництва електроенергії паралельно з вітровою енергією, наприклад вітро-дизельні системи. Вивчений варіант у цьому є накопичувачем енергії, в якому накопичувач діє, як свого роду буфер між виробництвом вітру та основним мережі. Залежно від розміру накопичувача електроенергії доступні надані ефекти можуть коливатися від простого піку згладжування потужності для надання більш тимчасової стабільності вихід від вітру.

Ми вивчали, як інтеграція накопичувачів енергії з окремими вітровими турбінами в основному міг згладити коливання швидкості вітру. Аналіз різних типів вітрових умов показав, що короткострокові коливання потужності вітру можуть бути зменшені наполовину потужністю зберігання 25 кВт/год на МВт вітрової енергії. А 3 Блок зберігання кВт/год може забезпечити 10% зниження, але в за сприятливих умов навіть 1 кВт/год може зробити те саме. до компенсувати б коливання в сезонному масштабі потрібна на кілька порядків більша ємність зберігання. Наприклад, зниження річної норми на 10%.

відхилення потужності вітру від середнього б вимагають зберігання 2000-3000 кВт-год на один МВт вітру потужність. Потрібне збільшення ефекту розгладження до 30%. 10 000-15 000 кВт/год на МВт відповідно. У цій статті ми продовжуємо наш попередній загальний аналіз вітроакумуляуючі системи в чисельну енергетичну систему моделювання для дослідження ефектів вітроакумуляуючих систем у більш реалістичних налаштуваннях.

Мета полягає в тому, щоб дізнатися, як зберігання може зменшити деякі несприятливі впливи на якість електроенергії коливання потужності вітру, зокрема з боку напруги. Окрім значень потужності, ми також оцінюємо здійсненність різні концепції зберігання електроенергії для забезпечення необхідного компенсація вітрової енергії. Підхід, який тут використовується, в основному базується на числових і обчислювальне моделювання вітроенергетики та зберігання в електричній мережі. Ми використовуємо код симуляції під назвою DESIGEN для дослідження великих схем розподіленої енергії та електричні мережі. DESIGN може обробляти до 10000 вузлів забезпечення реалістичного представлення навантаження, розподіленої потужності генерації та електричної мережі. Модель дозволяє стежити за коливаннями напруги в різних частинах мережі під впливом невідповідності навантаження та генерації. DESIGEN може, наприклад, аналізувати під мережу (слабку) в які підключені вітрова енергія та зберігання, які в чергу підключається через трансформатор до високої напруга електромережі (сильна). Різні зберігання конфігурації були досліджені, як у розміщенні (система типологія) і розмір (ємність).

Коливання потужності вітру А. Природа перехідних процесів вітрової енергії При оцінці корисності та потреби енергії зберігання, знаючи часовий масштаб вітрової енергії коливання, які необхідно компенсувати, є надзвичайно важливими. в у попередніх роботах було показано, що швидкість вітру містить два відмінні режими [3]: мікрометеорологічний флуктуації, що виникають через турбулентність і по-друге макрометеорологічні коливання внаслідок основного повітря руху. Типовим є часовий масштаб мікронестабільності від

секунд до кількох хвилин, тоді як макрообласть коливається від приблизно десяти до понад ста годин.

В. Мікромасштабна варіація. На рис. 3.1 показаний приклад мікромасштабної потужності зміна вимірної потужності однієї вітрової турбіни 1 секундна шкала часу протягом приблизно однієї години.. Приклад показує, що навіть на а коротка шкала часу менш ніж за 1 годину через зміну потужності на практиці коливання швидкості вітру можуть складати десятки відсотків. Це означає, що навіть короточасне зберігання електроенергії може бути найбільш актуальним для вітроенергетичних систем.

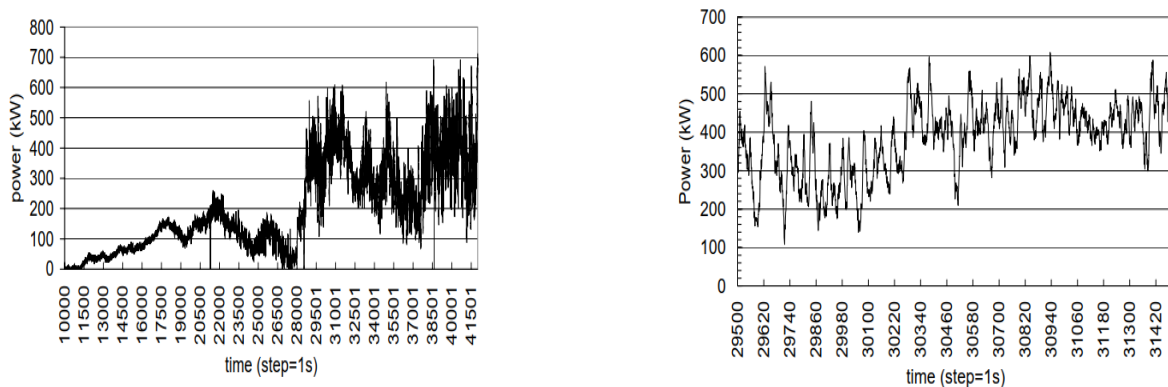


Рисунок 3.1 – Приклад коливань потужності вітру в мікро масштабі з одної вітрової турбіни з інтервалом вимірювання в одну секунду. Верхній: приблизно 10 годинний діапазон, нижній: близько 1/2 години. (з дозволу VTT).

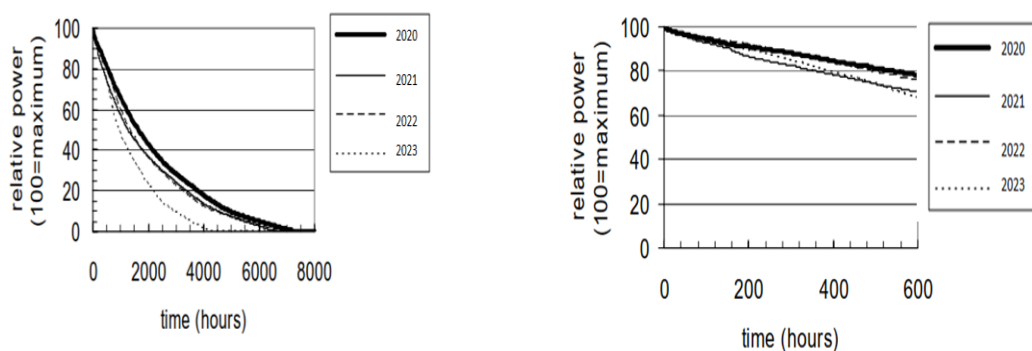


Рисунок 3.2 – Вимірня крива тривалості потужності однієї вітрової турбіни (1,3 МВт)

С. Середньо- та довгострокові коливання. Другий приклад на рис. 3.2 показує річну потужність розподіл однієї вітрової турбіни потужністю 1,3 МВт на декілька років. Вітрова турбіна виробляє деяку кількість енергії принаймні

6500-7000 годин на рік за 3 роки спостережень але години роботи зменшуються з вищими рівнями потужності, як і очікувалося. $P/P_0 > 80\%$ – це явно менше 10% від усіх оперативний час.

Оскільки накопичувач часто використовується для відключення найбільшої потужності рівні виробництва, вироблена вітрова енергія проти рівня потужності представляє особливий інтерес. На рис. 3.3 наведено частку від загальної електроенергії на рік та від рівня потужності турбіни. При цьому близько 60% всієї електроенергії виходить на потужність менше 50% від максимальної номінальної потужності вітрових турбін.

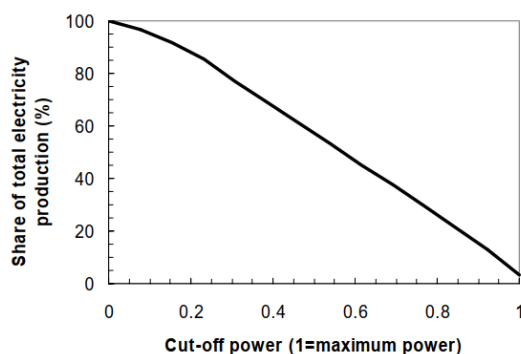


Рисунок 3.3 – Виробництво електроенергії на різних рівнях потужності (1=1,3 МВт)

Враховуючи вищий рівень потужності, близько однієї чверті вся електроенергія надходить на 80-100% максимальної потужності. На а рівні 90-100%, все одно близько 10-15% всієї електроенергії буде вироблятися. Рис. 3.4 ілюструє часовий розподіл вихідна потужність на мінімальному рівні 90% від максимальна вихідна потужність. Періоди цієї високої влади вихідний рівень зазвичай від менше години до приблизно 10 години. Це дає приблизну інформацію про необхідний розмір зберігання, щоб компенсувати трохи довший період часу висока швидкість вітру. З енергетичної точки зору працевлаштування Таким чином, накопичувач із високим рівнем потужності може бути варіант замість зменшення або розсіювання енергії вітру, якщо обмеження виникнуть на стороні мережі.

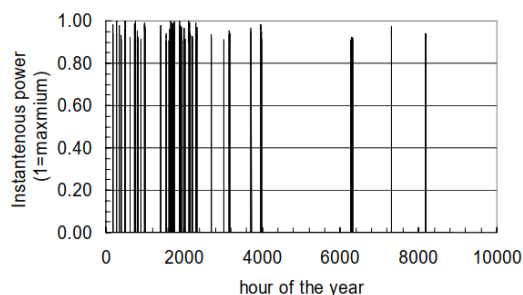


Рисунок 3.4 – Погодинне виробництво електроенергії на рівнях потужності вище 90%. номінальна потужність. (12% від загального річного виробництва)

3.3 Методологія аналізу вітроаккумуляюючих систем для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі

А. DESIGEN – Імітаційна модель і аналіз розподілених систем генерації
 Аналіз у цій роботі виконано за допомогою DESIGEN інструмент моделювання, розроблений для моделювання системи розподіленого виробництва енергії. DESIGEN – це перехідний інструмент, який розраховує виробництво, навантаження та потужність баланс потоків/мережі крок за кроком за певний період часу [7, 8]. Крок за часом зазвичай становить від 5 до 60 хв. Потік діаграма програми показана нижче на рис. 3.5.

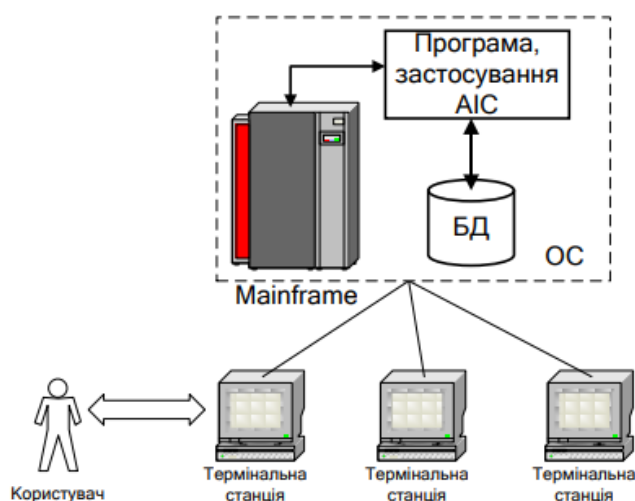


Рисунок 3.5 Структура інструменту моделювання DESIGN для аналізу розподілених покоління.

Зазвичай до 10 000 вузлів мережі з одиниць виробництва, споживання або зберігання можна легко обробляється.

В. Топологія системи. Типова конфігурація системи та дизайн мережі, що використовуються в конструкції проілюстрована на рис. 3.6. Обидві розподілені генерації блоки та електричні навантаження можна вільно розміщувати в електричних вузли мережі. Топологія, тип і довжина мережа/кабелі визначено у вхідних даних.

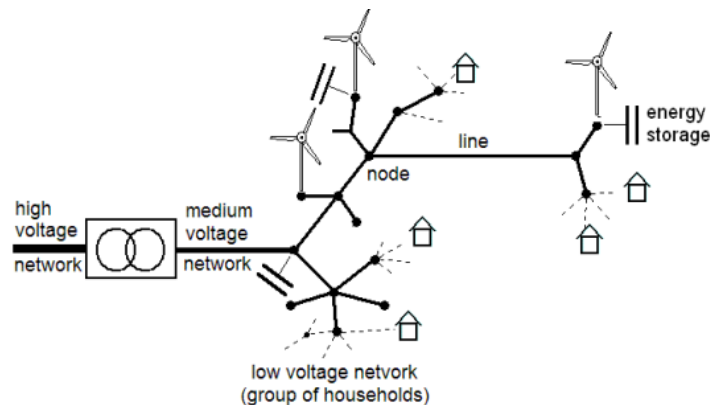


Рисунок 3.6 – Ілюстрація мережі з вітровою генерацією та накопиченням.

У цьому дослідженні в основному вітрові генеруючі установки розташовані в розподільній мережі середньої напруги, а рівень напруги 20 кВ і розподіл високої напруги 110 кВ може бути альтернативою для більших часток вітру, наприклад від магістральної лінії електропередачі. Розміщення та місткість блоків зберігання є важлива проблема при компенсації переривчастості вітру у мережі.

В основному інтеграція вітрової енергії може впливають на декілька характеристик якості електроенергії (наприклад, мерехтіння, частота, гармоніки, переривання тощо), але тут ми враховувати лише вплив напруги. Напруга, мабуть, найбільше критична змінна, як при розгляді нормальної, так і високої якісна потужність. Основною функцією сховища буде подолати піки потужності вітру і таким чином уникнути занадто високої напруги рівнів у сітці. Відповідно різне зберігання Стратегії розряду можна визначити найпростішою істотою автоматичний і негайний розряд при падінні напруги нижче верхнього допустимого рівня. Більш витончений стратегія буде розряджати протягом більш тривалого періоду часу мінімізувати загальну

мінливість вітру. Важливий дизайн параметр для вітроакumuлюючої системи є обов'язковим потужність проти потужності вітру (МВт·год/МВт).

3.4 Технології зберігання електротехніки вітроакumuлюючих систем для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі

А. Характеристика технологій зберігання. У наступному короткому огляді можливих електричних накопичувачів представлені технології для використання енергії вітру. Основними параметрами, що цікавлять є ємність накопичувача, рівень потужності, час відгуку та вартість накопичувача. Іншими цікавими параметрами можуть бути ефективність, фізичні розміри, термін служби, доступність тощо, але це не так розглянуті в цьому дослідженні.

На рисунку 3.7 [4, 5] показано основні характеристики різних електричних накопичувальних систем. Виходячи з їх потужності, системи зберігання можна розділити на короткострокові та довготривалі. Термін зберігання для однієї вітрової турбіни мінімальний запас відповідний розмір на мікрорівні становив би 5-10 кВт·год/МВт і на рівні потужності МВт, який обмежує доступність альтернативи батареї, маховику або SMES (майбутнє технологія). На сезонному рівні мінімальна вимога становить кілька МВт·год/МВт, щоб побачити будь-які чіткі ефекти, які в на практиці можна зустріти електрохімічні системи зберігання. Вартість приблизно 100-200 євро/кВт.

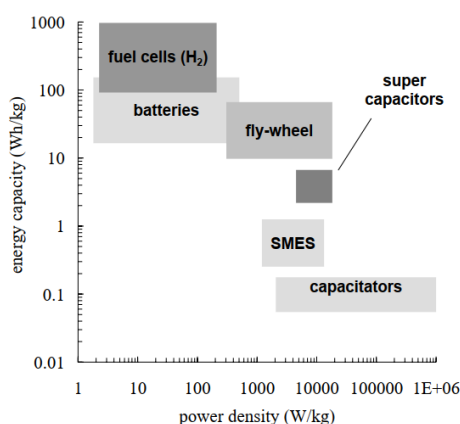


Рисунок 3.7а – Характеристика систем короткочасного зберігання електроенергії. Зберігання та показані густини потужності [4, 5]

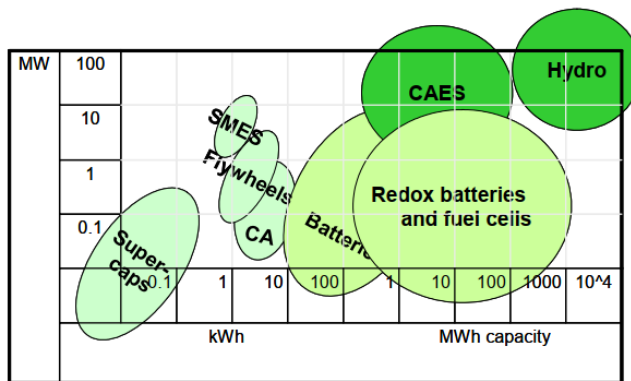


Рисунок 3.7 б – Типові діапазони ємності та потужності різних систем зберігання [4, 5]

Якщо розглядати більшу вітрову електростанцію з десятками МВт або навіть сотні МВт встановленої вітрової потужності, термін компенсації вимагатиме зберігання від кількох МВт·год вище та сезонні від кількох сотень до кількох тис. МВт·год акумулюючої ємності відповідно.

Таблиця 3.1 – Властивості деяких технологій зберігання, актуальних для енергії вітру

	Хід холостого ходу η (%)	Ємність (MW)	Електрична ємність (h)
Насосна гідроелектростанція	80	100...1000	>години
Стиснуте повітря	60-75	0.1....1000	< години
Маховий акумулятор	90	0.1-10	0.1
Акумулятор	60-80	0.1-10	0.1..>1
Свинцевий акумулятор	70	0.1-20	>1
H ₂ -паливна комірка	50	0.1-1	>1

У цьому випадку, гідроенергетика або насосна гідроенергетика можуть забезпечити традиційне рішення, яке вже використовується в електричних мережах для швидкого регулювання потужності та резерву. Для короткострокових тільки зберігання, системи зберігання стисненого повітря (CAES) можуть бути варіантом для потреб великого зберігання. Просунутий

батареї або оборотні системи паливних елементів можуть запропонувати деякі потенціал тут також у майбутньому. Зведення центральних технічних параметрів перспективні технології зберігання електроенергії у вітроенергетиці контекст наведено в таблиці 3.1.

В. Технології короткострокового зберігання. У конденсаторі електрика та різниці потенціалів і електростатичне поле між двома пластинами. Суперконденсатор – це електрохімічний конденсатор, що використовує провідність полімери, як електроди. Суперконденсатор забезпечує великий енергетичні ефекти на вагу мають за мету до 10 кВт/кг, але ємність лише близько 10 Вт·год/кг. Час зберігання короткий або зазвичай до 30-60 с. А 1 м³ суперкап-сховище може дати в майбутньому імпульс потужності 1-5 МВт і ваги 100-500 кг [6]. Ціна приблизно 200-600 євро/кВт і 50- 150 євро/Вт-год, але через 5-10 років рівень цін буде 10-15 євро/Вт-год прогнозовано та довгостроково ціна може впасти на а коефіцієнт 10-100 до 2020 року.

У маховику накопичувальна ємність базується на кінетиці енергія диска, що обертається, залежить від квадрата швидкість обертання. З легкими та міцними матеріалами до 100 000 обертів на хвилину. Електрика є розряджається шляхом деакселерації за допомогою електричного генератора. Маховик створює високий (МВт-шкала), але короткий (<15 с) імпульси потужності з дуже коротким часом відгуку (мс). Питома потужність може наближатися навіть до 10 кВт/кг і зберігання потужність 10-100 Вт·год/кг залежно від вибору матеріалу і обертів на хвилину.

Інвестиційна вартість складе близько 150-250 грн €/кВт. У надпровідному накопиченні магнітної енергії (SMES) електрика зберігається в магнітному полі, а надпровідна котушка в даний час при температурі близько -269 °С і в майбутньому при значно вищій температурі, коли за допомогою високотемпературних надпровідників. МСП нагадує за енергетичними характеристиками маховики і супер конденсатори. Накопичувача ємність становить кілька кВт·годин, але ефект може становити кілька МВт, навіть десятки МВт. Час відповіді дуже короткий.

Технологія SMES була продемонстровано, але ціна все ще дуже висока. Акумулятори – це добре відпрацьована технологія зберігання електрики. Потужність і енергійність пов'язані разом через поверхню електрода означає збільшення рівень потужності одночасно збільшує пам'ять місткість. Традиційна свинцево-кислотна батарея має енергію щільність 20-40 Вт·год/кг і щільність потужності 20-200 Вт/кг, за дуже короткий час можливий навіть більш високий рівень потужності. Практично досяжна ємність зберігання сильно залежить від використовуваний рівень потужності. Найбільші сховища акумуляторів 10 MW-шкала була побудована в США, майбутнє електрохімічні технології акумуляторів і паливних елементів можуть збільшити показники продуктивності значно більше ніж 100 Вт·год/кг і щільності потужності в діапазоні 100-1000 Вт/кг. Рівень цін становить приблизно 50-250 €/кВт.

Технології довгострокового або великомасштабного зберігання. Якщо потрібна велика ємність для зберігання або тривалий термін електричного накопичувача, життєздатні варіанти лише деякі. Накачаний гідро є традиційним надійним сховищем і легко вбудовується де гідроенергетика використовує великі водосховища та високі голови. Ємність зберігання становить мГ·год, виходячи з 0,027 потужність кВт/год на кожен тонну води і 10 м висоти для потужності 1000 МВт-год отримується з 100 м голови та 370 тонн води.

Другим варіантом може бути адіабатично стиснене повітря сховище енергії (CAES), в якому стискається газ компресори під час завантаження, наприклад, печера і при розряд, що випускається через газову турбіну для виробництва електрики. Найбільший CAES реалізований у Хунторфі, Німеччина з системою 300 МВт, але система 2000-3000 МВт має о в Огайо, США. Електрохімічна система зберігання, в якій електрод площа поверхні та реагент розділені, напр. окисно-відновний систем або паливних елементів потенційно може запропонувати довгострокову перспективу можливість зберігання в майбутньому.

3.5 Грид-аналіз роботи вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі

Далі параметричний аналіз впливу енергії вітру на рівні напруги було зроблено, щоб звузити випадки де зберігання електроенергії може забезпечити найкращу цінність і найбільший вплив. Ми розглядаємо тут рядок розподілу підключений до лінії електропередачі. Енергія вітру є розташований на кінці рядка. Налаштування, що використовується, показано на рис. 3.8.

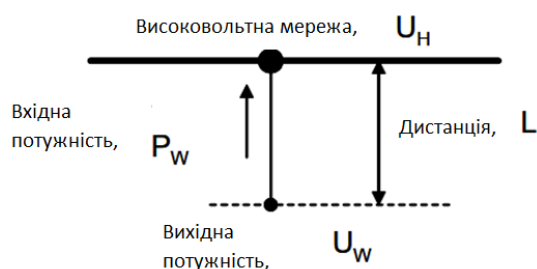


Рисунок 3.8 – Ілюстрація інтеграції вітрової енергії

Напруга мережі на майданчику ВЕС становить U_w і може розраховувати за наступною формулою, отриманою з базове рівняння падіння напруги в рядку:

$$U_w = \frac{1}{2} \left(U_n + \sqrt{U_n^2 - 4P_w \cdot (RL + XL \tan \varphi)} \right) \quad (3.1)$$

де L – довжина кабелю (км), P_w – потужність вітру, U – напруга, R – опір змінного струму (Ом/км) і X – індуктивний опір (Ω/км). Для фазового кута ми використовуємо $\tan \varphi \approx 0,2$. Втрата напруги – це різниця між напруги на ВЕС і високовольтної мережі.

На рис. 3.9 показано результати аналізу для 3 випадків.

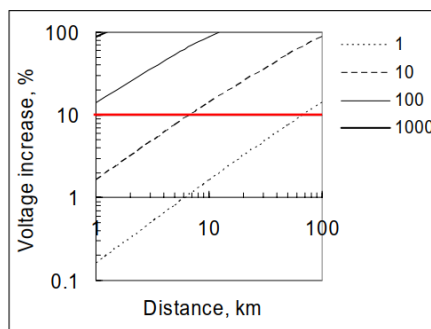


Рисунок 3.9а – Електрична мережа 20 кВ (Raven $\varphi=53,5$ мм²).

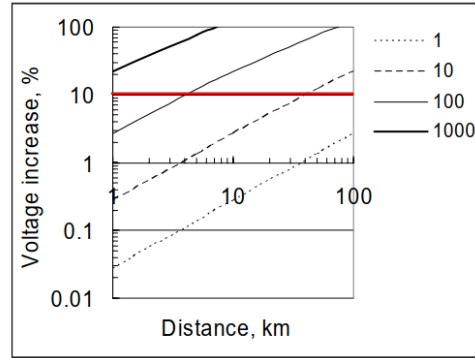


Рисунок 3.9б – Розподільча електрична мережа 20 кВ (Duck $\varphi=305 \text{ мм}^2$).

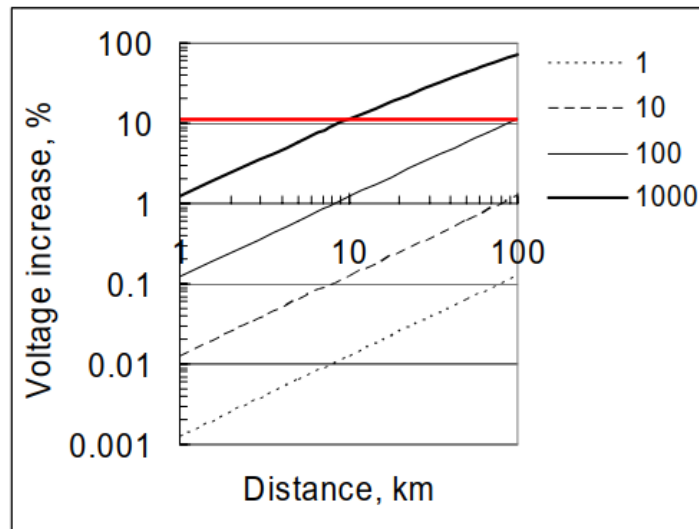


Рисунок 3.9с – Електрична мережа 110 кВ ($\varphi=300 \text{ мм}^2$).

На рис. 3.9а відповідає широко використовуваному дешевому 20 ліній кВ (Raven), рис. 3.9б є потужною лінією 20 kV (Duck) і рис. 3.9с зображена високовольтна розподільна лінія 110 кВ.

Горизонтальна вісь на рис. 3.9 відповідає відстані вітроелектростанції від ЛЕП 440 кВ), а по вертикальній осі – збільшення напруги на точки потужності вітру для вихідної потужності PW.

Показаний параметр – вихідна потужність вітру PW (1-1000 МВт). У сільських мережах можливе коливання напруги на 10%. прийнятний показаний червоною лінією на рис. 3.9. Верхня межа на практиці може бути дещо нижче, ніж показано на рис. 3.9 через температурні обмеження при високі значення струму. Високовольтна розподільна лінія здатна нести а ефект вітру в кілька сотень МВт на відстані 10 км в межах допустимого коливання напруги, тоді як з 10 kV Raven максимальна дозволена потужність вітру залишається на рівні

близько 6 МВт. З Disk типу 20 кВ, 30 МВт є верхня межа для 10-кілометрової лінії з вітром на іншому кінці.

Слабша альтернатива сітки є привабливою для окремих накопичувачів, оскільки рівень енергії вітру нижчий і необхідна ємність для зберігання компенсації також менше. У сильніших мережах переваги від накопичення не настільки виражені в скороченні перенапруг але в цих випадках згладжування живлення в високовольтна лінія електропередач може бути більш корисною.

3.6 Результати моделювання роботи вітроенергетичної установки для підвищення параметрів якості електричної енергії в локальній мережі

А. Зберігання в лінійній мережі. Як перший випадок моделювання ми розглядаємо лінійну напругу 20 кВ характерна для сільської місцевості лінія розподілу. Довжина лінія становить 70 км, і до неї підключено вітрову електростанцію 4×1,3 МВт середина його (вузол 16, 35 км). Основний розподіл кабель типу Condor перерізом 402 мм². Сітка описується 31 вузлом, кожен з яких представляє навантаження 40 окремих будинків. Загальне електричне навантаження становить 17400 МВт-год/рік. Моделювання триває протягом цілого року з використанням з кроком у годину.

На рисунку 3.10 показано, як вітряна турбіна та сховище впливають на максимальну напругу мережі. Мінімальна напруга досвідчений в лінії просто мало впливає на вітер або зберігання. Було випробувано чотири альтернативні місця для зберігання: поруч до ЛЕП ($L=0,05$), на півдорозі між ЛЕП і ВЕУ ($L=0,5$) при вітрі турбінної площадки ($L=1$), а на $L=1,5$. Зберігання має в цьому випадку ємність 5670 кВт/год (наприклад, система накопичення акумуляторів), або приблизно 1 МВт-год на МВт вітру. Розташування сховища занадто далеко від вітрової турбіни нижчий за потоком не забезпечує великої користі для напруги згладжування через велику відстань, але бажано поблизу місця вітру. У нашому випадку зберігання на пів відстані забезпечується майже однакове зниження напруги при місці вітрової турбіни. Розташування місця зберігання

на пів відстань вище за течією ($L=1,5$) від турбіни забезпечує позитивний ефект нижче за течією з боку лінії електропередачі і є порівняно з $L=0,5$.

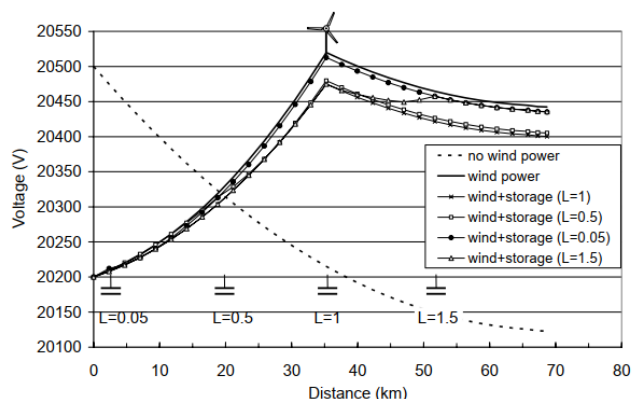


Рисунок 3.10 – Максимальна напруга вздовж лінії розподілу

Ємність накопичувача 5670 кВт·год, використана вище, здатна знизити максимальний рівень напруги на 10%. Якщо зберігання було збільшено до 54 700 кВт·год, тоді зниження становить 30%. Розмістивши 2450 кВт·год накопичувача, можна було б скоротити 5% пікова напруга в цьому випадку.

В. Акумуляування вітру в складній мережі. У другому випадку більш складна деревоподібна мережа була використана конфігурація, показана на рис. 3.11 підключення до ЛЕП здійснюється у вузлі 1. В Всього гілка мережі складається з 78 вузлів с електричні навантаження дорівнюють 11700 МВт·год/рік. Розподіл лінія 20 кВ. Вітрогенератори розташовані в міцному вузлі № 4 і альтернативно в слабшому вузлі 6.

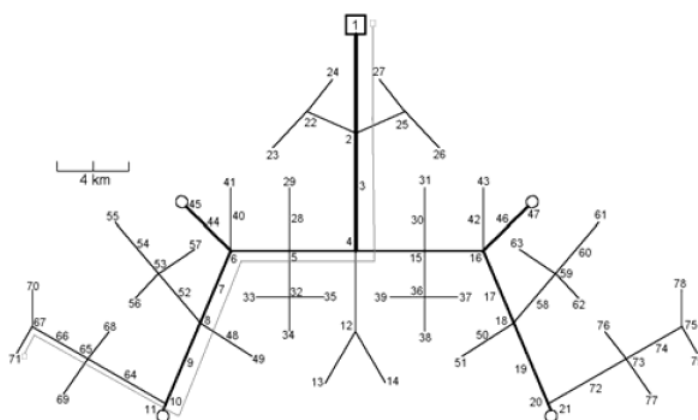


Рисунок 3.11 – Конфігурація мережі (гілка), яка використовується в симуляції випадку.

Випадки для вітру та зберігання, досліджені тут, є наступне:

№ ділянки	Вузол ділянки	Потужність вітрового потоку (МВт)	Акумулювання електричної енергії (МВт·год)
1	6	1,3	1,65
2	4	2,6	3,3
3	4	3,9	4,95

По-перше, коливання напруги з вітром, але без зберігання аналізуються, а потім додається сховище для зменшення варіації. Коливання напруги струни відстежуються в рядок між вузлами 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-64-65-66-67-71 також показано окремим рядком на рис. 3.11.

Результати аналізу мережі показані на рис. 3.12. Мінімальної напруги в струні на практиці немає під впливом зчеплення вітру, але наслідки є видно на максимальному рівні напруги. Переваги зберігання зрозумілі у слабкому підрядку (вітер у вузлі 6). Сховище (ємність 1,26 МВт·год/МВт) здатне знизити збільшення напруги майже на 50% і зміна напруги (min-max) залишається в рекомендованих межах корисностей. Введення вітру в сильніший вузол викликає менший різноманітність, а також переваги зберігання багато менше (<10%), хоча така ж ємність на МВт вітер.

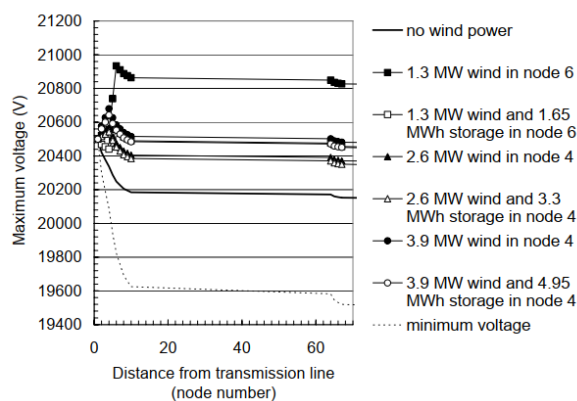


Рисунок 3.12 – Максимальна напруга в струні мережевої мережі

Не показаний додатковий випадок, у якому вітер місткість у вузлі 6 подвоїлася, а також сховище. The зберігання здатне зменшити в цьому випадку 20% піку напруги. Основний інтерес був у виявленні впливу зберігання на компенсацію підвищення напруги за рахунок інтеграції вітрової енергії. Дослідження показує, що користь від зберігання залежить багато про топологію

та силу мережі, а також про кількість вітру, інтегрована в сітку. Переваги накопичувачі більші в слабких мережах. Використання реалістичної симуляції випадки показали, що у відносно потужній мережі зберігання з реалістичним розміром може скоротити збільшення напруги від вітру близько 10%, але в слабших мережах переваги можуть досягати десятки відсотків.

Розміщення сховища по відношенню до вітру турбіни також має вирішальне значення для отримання максимального ефекту. Це є рекомендується розміщувати сховище в безпосередній близькості від вітру турбіна вниз або вище за течією

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля

Система управління охороною праці (СУОП) – це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових безпечних і високопродуктивних умов праці. За дану частину виробництва відповідає інженер з охорони праці. Головні завдання спеціаліста – створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Для забезпечення створення СУОП щорічно розробляються та затверджуються на підприємстві положення про організацію управління охорони праці; щорічно оформляються накази про призначення осіб відповідальних за стан охорони праці на дільницях, а також безпечне використання об'єктів підвищеної небезпеки (котлів, що працюють під тиском, газових та кисневих балонів, пестицидів); оформляються наказ про визначення персональних обов'язків з охорони праці усіх спеціалізації, керівників дільниць та інших службових осіб; щорічно проводиться паспортизація умов праці, технічних засобів безпеки і технічного стану робочих місць; складаються плани роботи з охорони праці, комплексне, річне і оперативне планування; організовуються заходи матеріального і морального стимулювання щодо охорони праці; проводяться розслідування і вивчення причин травм, пожеж їх аналіз і облік, а також розробляються заходи щодо їх застосування;

Об'єктом управління є діяльність структурних підрозділів та служб підприємства по забезпеченню безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виробничих дільницях, цехах та підприємства в цілому.

4.2 Протипожежна безпека і грозозахист

Блискавко захист – це комплекс захисних захистів від блискавки, які гарантують безпеку людей, збереження людей і споруд, обладнання та матеріалів від вибухів, загоряння й руйнування. Найпростішими і надійними засобами від блискавки є створення блискавковідводів. Схема блискавкозахисту будівлі показана на рис. 4.1.

Струмопровід виконується сталюю стрічкою перерізом 25...30 мм або дротом не менше 6 мм. Заземлення виконується кутовою сталлю, трубами на відстані від установки не менше 4,5 м. Опір розтікання не повинен перевищувати 15...20 Ом. Приймаємо початкову висоту блискавковідводу 8 метрів. Визначаємо радіус конуса, в якому ймовірність попадання 95%, через висоту конуса h за формулою (4.1):

$$R_0 = 1.5 \cdot h, \text{ м. } R_0 = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ м.}$$

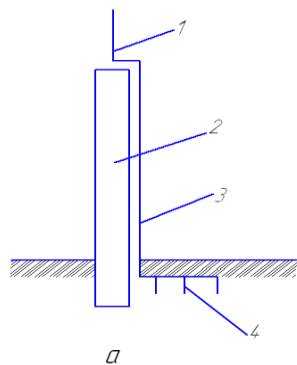


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач, 2 – блискавко провідник; 3 – опора, 4 – заземлювач.

Для будинку довжиною L кількість одиночних блискавковідводів визначаємо через радіус конуса R_0 в якому ймовірність попадання 95% за формулою:

$$N\bar{b} = \frac{L}{2R_0}, \text{ шт, } N\bar{b} = \frac{86}{2 \cdot 4} = 11 \text{ шт.}$$

Усі з'єднання в процесі монтажу системи блискавко захисту (Блискавко приймач – струмовідвід, струмовід – заземлювач) виконують за допомогою зварювання. Болтові з'єднання застосовують лише для тимчасових блискавко захисних пристроїв.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ВІТРОЕНЕРГІЇ

5.1 Обґрунтування економічної ефективності виробництва вітроенергії в локальних мережах

Вітроенергетика стрімко розвивається, як на європейському, так і на світовому рівнях. За останні 25 років глобальна встановлена потужність вітрова енергія зростає з приблизно 2,5 ГВт у 1992 році до трохи більше ніж 94 ГВт наприкінці 2007 року, потім до 283 ГВт у 2012 році та приблизно 350 ГВт до середини 2014 року, середньорічне зростання приблизно на 25 відсотків. [1] Завдяки постійному підвищенню ефективності турбін і вищим цінам на паливо вітроенергетика стає економічною конкурентоспроможна зі звичайним виробництвом електроенергії, а на ділянках із високою швидкістю вітру на суші вітрова енергетика вважається такою повністю комерційний. Робота присвячена економіці вітроенергетики. Структура інвестицій і витрат наземних і морських турбін обговорюються. Також враховується вартість виробленої електроенергії, яка враховує термін служби турбін та експлуатацію та технічне обслуговування витрати, а також минулий і майбутній розвиток витрат вітрової енергії аналізується. Також коротко обговорюється важливість фінансів, схем підтримки та питань зайнятості. Вартість вітрової генерації електроенергії порівняно з вартістю звичайних електростанцій, що працюють на викопному паливі.

Індивідуальна енергія використовується в ряді різних застосувань, включаючи підключене до мережі та автономне виробництво електроенергії і відкачування води. У роботі також описується економіка вітроенергетики, насамперед у зв'язку з підключеними до мережі турбінами, на які припадає переважна частина ринкової вартості встановлених турбін.

Основні параметри, що визначають економіку вітроенергетики, включають наступне:

- Структура витрат та інвестицій,
- Інвестиційні витрати, такі як допоміжні витрати на фундамент і підключення до мережі,
- Витрати на експлуатацію та обслуговування,
- Виробництво електроенергії/середня швидкість вітру,
- Термін служби турбіни,
- Облікова ставка.

Основні параметри були розглянуті один за одним: (i) Інвестиційні витрати: Найважливішими параметрами є виробництво електроенергії турбіною та інвестиційні витрати. Оскільки виробництво електроенергії залежить значній мірі на вітрові умови вибір правильного розташування турбіни має вирішальне значення для досягнення економічної життєздатності. На рис. 5.1 нижче показано основні компоненти та розподіл витрат у відсотках. Він розглядає вітрову турбіну 05 МВт. Це було помітили, що вежа коштує найвищий відсоток приблизно 26,30, а потім лопаті ротора з часткою 22,20% у загальна вартість.

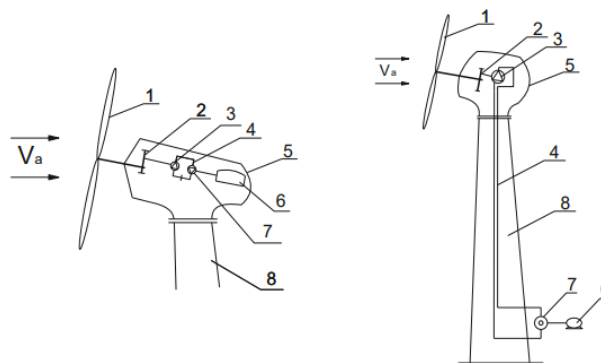


Рисунок 5.1 – Основні компоненти комплексу ВЕУ та їх частка в загальній вартості (для 05 МВт RE Power): а – нерозділена гідропередача, електрогенератор в гондолі; б – розділена гідропередача, електрогенератор на землі; 1 – вітродвигун; 2 – механічна передача; 3 – гідронасос; 4 – гідромагістраль; 5 – гондола; 6 – електрогенератор; 7 – гідромотор; 8 – башта.

У капітальних витратах вітроенергетичних проектів домінує вартість самої вітрової турбіни. Встановлена середня турбіна у Європі загальна вартість інвестицій становить близько 1,23 мільйона євро/МВт. Частка турбіни в загальній вартості в середньому становить близько 76 відсотків, тоді як на

підключення до мережі припадає близько 09 відсотків, а на фундаменти — близько 0,7 відсотків.

Вартість придбання турбінного майданчика (на землі) суттєво різниться між проектами. Інші компоненти витрат, такі як системи управління та землі, становлять лише незначну частку загальних витрат. Загальна вартість кВт встановленої вітроелектростанції відрізняється в різних країнах. Вартість кВт зазвичай коливається від приблизно від 1000 євро/кВт до 1350 євро/кВт. Інвестиційні витрати на кВт виявилися найнижчими в Данії і трохи вищими в Греції та Нідерландах. Для Великобританії, Іспанії та Німеччини витрати у відборі даних виявилися приблизно 20%. Крім того, щодо «інших витрат», таких як фундаменти та підключення до мережі, між країнами існують значні відмінності, коливаючись від приблизно 32 відсотків загальних витрат у Португалії до 24 відсотків у Німеччині, 21 відсотка в Італії та лише 16 відсотків в Україні.

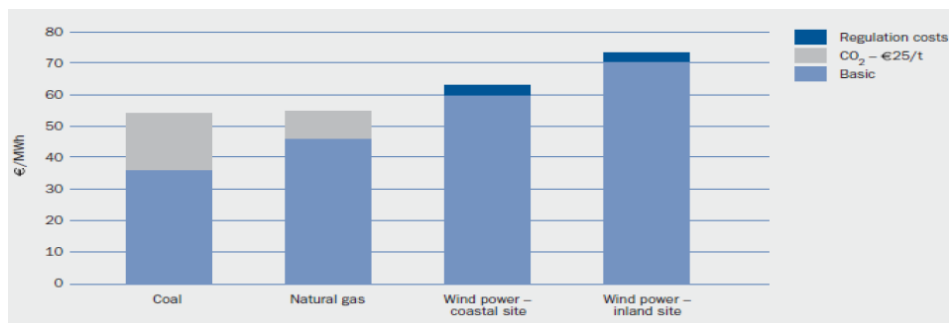
Таблиця 5.1 – Приблизну вартість основних компонентів типової вітрової електростанції (%)

Турбіна	928	75,6
Фундаменти	80	6,5
Електрична частина	18	1,5
Електрична мережа	109	8,9
Контроль	4	0,3
Консультації	15	1,2
Земля	48	3,9
Фінансовий	15	1,2
Дорога	11	0,9
Разом	1227	100

Однак вартість залежить від розміру турбіни, а також типу та її розташування. Відновлювані джерела стали вимогою дня для добробуту людства. Кожна країна намагається збільшити внесок у цей сектор. Енергія

вітру, будучи видатною завдяки великій потужності виробництва електроенергії, знаходиться на вершині. малюнок 3 зображує ринок, який поділяють 10 найкращих виробників вітрових турбін [2]

.Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування вітрової енергії: Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування становлять значну частку загальних річних витрат вітрової турбіни. Для нової турбіни, витрати на експлуатацію та технічне обслуговування можуть легко становити 20 – 25 відсотків від загальної вартості кВт·год, виробленої протягом усього терміну експлуатації турбіни. Якщо турбіна досить нова, частка може становити лише 10–15 відсотків, але до кінця року вона може зрости щонайменше до 20–35 відсотків. термін служби турбіни. [6] На рисунку 5.1 показано порівняння вартості виробленої електроенергії звичайні електростанції.



Рисунком 5.1 – Вартість виробленої електроенергії порівняно зі звичайними електростанціями

Розвиток вартості електроенергії, виробленої вітром: Швидкий європейський і глобальний розвиток потужностей вітрової енергії сильно вплинув на вартість вітрової енергії за останні 20 років. Щоб проілюструвати тенденцію до зниження собівартості вітрової енергії, випадок, який демонструє витрати на виробництво для різних розмірів і моделей турбін представлені на рис. 5.2 .

На рисунку 5.2 показано розраховану вартість одиниці для різних розмірів турбіни на основі тих самих припущень, що використовувалися в попередньому розділі: зазвичай передбачається 20-річний термін експлуатації для всіх турбін, а ставка дисконту становить 7,5% на рік. Виробництво

електроенергії турбінами оцінюється для двох режимів вітру: прибережного та внутрішнього середнього вітру [7].

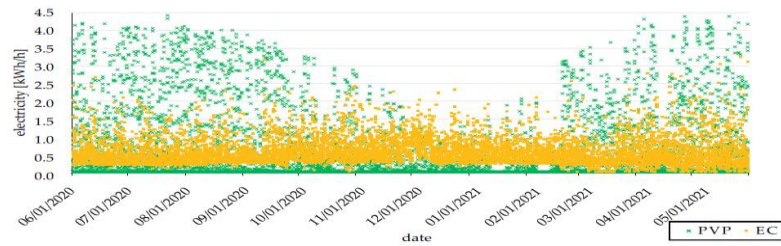


Рисунок 5.2 – Річне споживання електроенергії від PVI одного домогосподарства (PVP – виробництво енергії, EC – споживання енергії)

Майбутній розвиток економіки вітроенергетики проілюстровано використанням методології кривої досвіду. Підхід кривої досвіду був розроблений у 1970-х роках Бостонською консалтинговою групою, яка пов’язує кумулятивну кількісний розвиток продукту до розвитку питомих витрат. Таким чином, якщо кумулятивний продаж продукту подвоюється, розрахункова швидкість навчання дає досягнуте скорочення конкретного продукту витрати. Крива досвіду перетворює ефект масового виробництва на вплив на витрати виробництва без урахування інших причин відносини до уваги.

Таким чином, зміни в розвитку ринку або технологічні прориви в галузі можуть змінитися зображення значно.[8] Потужність вітроенергетики розвивалася дуже швидко в останні роки, в середньому на 25-30 відсотків на рік протягом останніх десяти років. В даний час загальна потужність вітрової енергії подвоюється приблизно кожні три-чотири роки. Поточні ціни є приблизними. Причина, чому зниження цін не передбачається, полягає в постійному високому рівні попиту на нові потужності вітрових турбін і обмеження субпостачальників у постачанні компонентів турбін. У порівнянні з наземними турбінами основні відмінності в структурі витрат пов’язані з двома проблемами: Фундаменти для морських турбін значно дорожчі. Вартість залежить як від глибини моря, так і від типу будується фундамент. Однак, оскільки завдяки цим двом ВЕС буде отримано значний досвід, необхідна подальша оптимізація фундаментів можна очікувати в майбутніх проектах. Трансформаторні станції та морські кабелі збільшують витрати. З’єднання між

турбінами і центральним розташуванням трансформаторної станції, а звідти на узбережжя, створюють додаткові витрати. Для різних сайтів середня частка витрат для трансформаторних станцій і морських кабелів передачі становить 21 відсоток, з яких невелика частка (05 відсотків) йде на внутрішні решітка між турбінами.[9] Екологічний аналіз включає дослідження впливу на навколишнє середовище, графічну візуалізацію вітрових електростанцій, а також додаткові дослідження та розробки. Середня частка витрат на ці аналізи становить приблизно 06 відсотків від загальної суми витрати.

Технологічні ризики для ринку вітроенергетики. Нинішній «ринок продавців», який характеризується дефіцитом пропозиції вітрових турбін, представив ряд нових виробників турбін. Багато з них не є фінансово сильними та мають низький послужний список, а саме технологічний ризик залишається проблемою для банків. Таким чином, старомодний спосіб пом'якшення цих ризиків пройшов розширені гарантії. Йому рішуче протистоять як нові, так і досвідчені виробники. Отже, технологічний ризик останнім часом зріс, а не зменшився з часом. Однак деякі банки все ще показують значний інтерес до кредитування проектів, які використовують сучасні технології, але мають відносно невеликий досвід роботи. Економіка офшорної вітрової електростанції: Офшорні вітряні електростанції зараз більш поширені в Європі. Кілька перших проектів були профінансовані великими компаніями значний фінансовий вплив. Спочатку банки брали участь у портфельному фінансуванні колекції активів, одного з яких була морською вітроелектростанцією. Банки були стурбовані додатковими ризиками, пов'язаними з офшорною розробкою. Такий підхід дозволив дещо зменшити ризики. Нижче наведено приблизну оцінку офшорних вітрових турбін в табл. 5.2:

Таблиця 5.2 – Приблизна оцінка офшорних вітрових турбін (%)

	Інвестиційні витрати, млн. €/МВт			O&M	CAP. фактор
	min	Середній	max	\$/МВт·год	%
2016	1,8	2,1	2,4	16	37,5
2024	1,55	1,81	2,06	13	37,7

Незважаючи на те, що офшорних вітроелектростанцій все ще відносно небагато, банки явно зацікавлені в обох (i) строкових кредитах, пов'язаних з етап експлуатації офшорних вітрових електростанцій та (ii) надання фінансування будівництва. Це яскраво демонструє апетит банків до кредитування енергії вітру. Ще надто рано визначати типовий офшор для еквівалентної наземної ферми, принаймні доки банки не отримають більшої довіри до технологія. Ризик поганої доступності, а також поганої доступності викликає серйозне занепокоєння [11].

Тоді слід скористатися формулою

$$T_{ок} = \frac{B_{pv}}{E} = \frac{7208}{(6163,65 - 2892,91)} = 2,2 \text{ р.} \quad (5.1)$$

де B_{pv} – вартість вітроенергетичної установки, яка включає власне вартість обладнання та його монтаж, грн.; E – економічний ефект від застосування вітроенергетичної установки, який виражається вартістю виробленої електроенергії за винятком вартості спожитої електроенергії, грн.

Характер угод з використанням вітрової енергії змінюється в усьому світі. Хоча залишається багато невеликих приватних проєктів, відбувся суттєвий зсув у бік більших проєктів, що належать комунальним підприємствам. Ця зміна приносить нові гроші в галузь, зменшує залежність від банків для початкового фінансування та залучає сильних спонсорів. Розростаються проєкти і збільшується масштабна офшорна діяльність. Оскільки банки віддають перевагу більшим проєктам, це дуже позитивно змінити. Якщо економічна картина погіршиться, це може викликати певні побоювання щодо проєктного фінансування. Політичний екологічна підтримка відновлюваних джерел енергії означає, що фінансування вітрової енергії залишається дуже привабливою пропозицією. Сподіваємося, що отримати фінансування для масштабного розширення галузі не буде проблемою. Також передбачається, що енергія вітру в усіх формах буде служити майбутнім поколінням. У той же час Індія також намагається збільшити його внесок у цей ринок завдяки великій політичній, промисловій, екологічній та індивідуальній готовності.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У цій роботі розглядається застосування різноманітних нових метаевристичних алгоритмів оптимізації для вирішення проблеми було досліджено оптимальну інтеграцію WT у дві стандартні EDN. Оптимізацію виконував мінімізація кількох цільових функцій, які розглядалися, як сукупні техніко-економічні параметри, беручи щоденну невизначеність попиту на навантаження та коливання потужності джерела. Серед прикладних алгоритмів, алгоритм GTO виявився найбільш надійним і ефективним, оскільки він забезпечив найкращі результати для обидва EDN, включаючи вимогливу поведінку та властивості швидкої конвергенції при досягненні оптимального рішення. Результати також підкреслюють ефективність оптимальної присутності WEA, яка забезпечує помітне підвищення продуктивності обох тестових систем. Це тому, що генерація WTG присутня для більшої частини дня і залежить від швидкості вітру. Вони також забезпечують, як реактивну, так і активну потужність. Однак, оптимізація призвела до покращення напруги та мінімізації втрат активної потужності, водночас час інвестиційні витрати на системи WTG були сприятливими. Принаймні, алгоритм GTO був ідеальним вибором, який швидко досягав оптимальних рішень і сходився після невеликої кількості ітерацій, що є рекомендовано при вирішенні задачі оптимальної інтеграції різних відновлюваних джерел енергії в практичні системи розподілу електроенергії.

У цьому з точки зору якості електроенергії поділяються на локальні особливо пов'язані з якістю напруги в розподільчій мережі системи та глобальні проблеми, пов'язані з управлінням енергосистемою та стабільність. Характеристики якості електроенергії ВЕУ та вітру господарства описані відповідно до національного та міжнарод представлени стандарти та вимірювання вітрових електростанцій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Guo, Y., Wang, H., and Lian, J. "Review of integrated installation technologies for offshore wind turbines: Current progress and future development trends". *Ener Conv & Manag*, Vol. 255, e115319, 2022.
2. Jordehi, A. R. "Optimization of electric distribution systems: a review". *Renew and Sustain Ener Rev*, Vol. 51, PP. 1088–1100, 2015.
3. Papadimitrakis, M., Giamarelos, N., Stogiannos, M., Zois, E. N., Livanos, N. A. I., Alexandridis, A. "Metaheuristic search in smart grid: A review with emphasis on planning, scheduling, and power flow optimization applications". *Renew and Sustain Ener Rev*, Vol. 145, e111072, 2021.
4. Belbachir, N., Zellagui, M. "Multi-Objective Optimal Design of Solar and Wind Hybrid Renewable Energy Systems Considering Daily Uncertainties". *Alg J of Renew Ener & Sustain Dev*, Vol. 4, no. 1, PP. 1-15, 2022.
5. Tolba, M. A., Diab, A. A. Z., Tulsy, V. N., Abdelaziz, A. Y. "LVCI approach for optimal allocation of distributed generations and capacitor banks in distribution grids based on moth–flame optimization algorithm". *Elec Eng*, Vol. 100, PP. 2059–2084, 2018.
6. Shilaja, C., Arunprasath T. "Optimal power flow using moth swarm algorithm with gravitational search algorithm considering wind power". *Future Gen Comp Sys*, Vol. 98, PP. 708–715, 2019.
7. Abdollahi, A., Ghadimi, A. A., Miveh, M.R., Mohammadi, F., Jurado, F. "Optimal power flow incorporating FACTS devices and stochastic wind power generation using krill herd algorithm". *Electronics*, Vol. 9, no. 6, e1043, 2020.
8. Waqar, A., Subramaniam, U., Farzana, K., Elavarasan, R. M., Habib, H. U. R., Zahid, M., and Hossain, E. "Analysis of optimal deployment of several DGs in distribution networks using plant propagation algorithm". *IEEE Access*, Vol. 8, PP. 175546–175556, 2020.
9. Kaymaz, E., Duman, S., and Guvenc, U. "Optimal power flow solution with stochastic wind power using the Lévy coyote optimization algorithm". *Neur Comp and App*, Vol. 33, no. 1, PP. 6775–6804, 2021.

10. Nayak, M. R., Behura, D., and Kasturi, K. "Optimal allocation of energy storage system and its benefit analysis for unbalanced distribution network with wind generation". *J of Comp Sci*, Vol. 51, e101319, 2021. Khamees, A. K., Abdelaziz, A. Y., Eskaros, M. R., Alhelou, H. H., and Attia, M. A. "Stochastic modeling for wind energy and multi-objective optimal power flow by novel meta-heuristic method". *IEEE Access*, Vol. 9, PP. 158353–158366, 2021.
11. Ramadan, A., Ebeed, M., Kamel, S., Mosaad, M. I., Abu-Siada, A. "Technoeconomic and environmental study of multi-objective integration of PV/Wind-based DGs considering uncertainty of system". *Electronics*, Vol. 10, no. 23, e3035, 2021.
12. Duong, M. Q., Nguyen, T., Nguyen, T. T. "Optimal placement of wind power plants in transmission power networks by applying an effectively proposed metaheuristic algorithm". *Math Pro in Eng*, Vol. 2021, e1015367, 2021.
13. Khamees, A. K., Abdelaziz, A. Y., Eskaros, M. R., El-Shahat, A., Attia, M. A. "Optimal power flow solution of wind-integrated power system using novel metaheuristic method", *Energies*, Vol. 14, no. 19, 2021.
14. Saha, S., Mukherjee, V. "A novel multi-objective modified symbiotic organisms search algorithm for optimal allocation of distributed generation in radial distribution system". *Neur Comp & App*, Vol. 33, PP. 1751–1771, 2021.
15. Naderipour, N., Nowdeh, S. A., Saftjani, P. B., Abdul-Malek, Z., Bin-Mustafa, M. W., Kamyab, H., and Davoudkhani, I. F. "Deterministic and probabilistic multi-objective placement and sizing of wind renewable energy sources using improved spotted hyena optimizer". *J of Clean Prod*, Vol. 286, e124941, 2021.
16. Nguyen, T. P., Tran, T. T., Vo, D. N. "Improved stochastic fractal search algorithm with chaos for optimal determination of location, size, and quantity of distributed generators in distribution systems". *Neur Comp & App*, Vol. 31, PP. 7707–7732, 2019.
17. Kumar, S., Mandal, K. K., Chakraborty N. "Optimal placement of different types of DG units considering various load models using novel multi-

objective quasi-oppositional grey wolf optimizer". *Soft Comp*, Vol. 25, PP. 4845–4864, 2021.

18. Kumar, S., Mandal K. K., Chakraborty, N. "A novel opposition-based tuned-chaotic differential evolution technique for techno-economic analysis by optimal placement of distributed generation". *Eng Optics*, Vol. 52, no. 2, PP. 303–324, 2020.

19. Naderipour, A., Abdul-Maleka, Z., Bin Mustafa, M. W., Guerrero, J. M. "A multi-objective artificial electric field optimization algorithm for allocation of wind turbines in distribution systems". *App Soft Comp*, Vol. 105, e107278, 2021.

20. Settoul, S., Zellagui, M., Chenni, R. "A new optimization algorithm for optimal wind turbine location problem in Constantine city electric distribution network based active power loss reduction". *J of Optics in Indus Eng*, Vol. 14, no. 2, PP. 13–22, 2021.

21. Balu, K., Mukherjee, V. "Optimal siting and sizing of distributed generation in radial distribution system using a novel student psychology-based optimization algorithm". *Neur Comp & App*, Vol. 33, no. 3, PP. 15639–15667, 2021.

22. Fathy, A., Yousri, D., Abdelaziz, A. Y., and Ramadan, H. S. "Robust approach-based chimp optimization algorithm for minimizing power loss of electrical distribution networks via allocating distributed generators". *Sustain Ener Tech & Assess*, Vol. 47, no. 1, e101359 2021.

23. Zellagui, M., Belbachir, N., and El-Bayeh, C. Z. "Optimal allocation of RDG in distribution system considering the seasonal uncertainties of load demand and solar-wind generation systems". *IEEE 19th Int Conf on Smart Tech (EUROCON)*, Lviv, Ukraine, 6–8 July 2021.

24. Purlu, M., Turkay, B. E. "Optimal allocation of renewable distributed generations using heuristic methods to minimize annual energy losses and voltage deviation index". *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, PP. 21455–21474.

25. Bhadoriya, S., Gupta, A. R. "A novel transient search optimization for optimal allocation of multiple distributed generators in the radial electrical

distribution network". Inter J of Emerg Elec Power Sys, Vol. 23, no. 1, PP. 23–45, 2022.

26. Бриль А. О., Васько В. П., Васько П. Ф. Оцінка показників безвідмовності вітроелектричних пристроїв великої потужності. Винахідник і раціоналізатор. 2009. № 1. С. 26-28.

27. Бриль А. О., Васько В. П., Васько П. Ф. Узагальнена модель забезпечення якості проектування і експлуатації вітроелектричних станцій. Винахідник і раціоналізатор. 2020. № 2. С. 28-29.

28. Бриль А. О., Васько В. П., Васько П. Ф. Задача компенсації реактивної енергії введених в експлуатацію вітрових електростанцій. Вітроенергетика України. 2002. № 2. С. 12-15.

29. Васько В. П. Аналіз процесів генерування активної та реактивної потужності вітроелектричною установкою з асинхронним генератором у складі промислових вітроелектростанцій. Технічна електродинаміка. 2012. № 5. С. 64-67.

30. Васько В. П. Влияние установок регулирования ветроэлектрических установок на эксплуатационные показатели. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Модельовання електронних, енергетичних та технологічних систем». 2009. Ч. 1. С. 38-41.

31. Васько В. П. Керування нестационарними режимами роботи вітроустановок промислових вітроелектричних станцій: Дис... канд. тех. наук: 05.14.08. К., 2003. 184 с.