

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження режимів роботи вітроелектроустановки з прогнозуванням виробленої потужності в умовах Сумської області»

Виконав

(підпис)

Ігор ГРИГОРЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЗЕТЕ 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

Олена ДОВЖИК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу

Ігор ГРИГОРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження режимів роботи вітроелектроустановки з прогнозуванням виробленої потужності в умовах Сумської області.

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Чепіжний Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент.

3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.

4. Вихідні дані до роботи: паспортні дані вітроелектроустановок, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.

5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Розділ 1. Аналіз останніх досягнень вітроенергетики та особливості її реалізації в умовах Сумської області. Розділ 2. Аналіз основних етапів впровадження ВЕ в мережі електропостачання Сумської області. Розділ 3. Пропозиції вибору обладнання ВЕ для можливого використання в Сумській області. Розділ 4. Охорона праці. Розділ 5. Економічне обґрунтування. Висновки та пропозиції. Список використаної літератури. Додатки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Ігор ГРИГОРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів | Примітка |
|-------|---|------------------------|----------|
| 1 | Збір інформації по останнім досягненням вітроенергетики | до 02.08.2025 р. | |
| 2 | Аналіз літературних джерел з обраної тематики | до 16.08.2025 р. | |
| 3 | Складання плану роботи | до 21.08.2025 р. | |
| 4 | Написання вступу | до 24.08.2025 р. | |
| 5 | Підготовка розділу «Розділ 1. Аналіз останніх досягнень вітроенергетики та особливості її реалізації в умовах Сумської області» | до 30.08.2025р. | |
| 6 | Підготовка розділу «Розділ 2. Аналіз основних етапів впровадження ВЕ в мережі електропостачання Сумської області» | до 19.09.2025 р. | |
| 7 | Підготовка розділу «Розділ 3. Пропозиції вибору обладнання ВЕ для можливого використання в Сумській області» | до 03.10.2025 р. | |
| 8 | Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці» | до 08.10.2025 р. | |
| 9 | Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування» | до 20.10.2025 р. | |
| 10 | Написання висновків та пропозицій | до 25.10.2025 р. | |
| 11 | Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету | до 01.11.2025 р. | |
| 12 | Подання роботи на рецензування | до 07.11.2025 р. | |
| 13 | Подання до попереднього захисту | до 14.11.2025 р. | |

Керівник роботи:

(підпис)

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Ігор ГРИГОРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Григоренко Ігор Володимирович «Дослідження режимів роботи вітроелектроустановки з прогнозуванням виробленої потужності в умовах Сумської області».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

В роботі проведено аналіз останніх досягнень в напрямку вітроенергетики та запропоновано рішення, що можливо використати в умовах Сумської області. Виконано аналіз потенціалу вітру в Сумській області, а також наведено особливості будови та способів підключення вітроелектроустановок.

Проведено аналіз основних факторів, що мають вплив на показники роботи вітроелектроустановок та проведено аналіз основних алгоритмів забезпечення функціонування системи керування установками.

Виконано вибір основного обладнання для вітроелектроустановки та наведено прогноз можливого виробітку електричної енергії.

Наведено заходи з охорони праці та виконано економічне обґрунтування запропонованих рішень в роботі.

Ключові слова: електрична мережа, вітроелектрична станція, вітрогенератор, генерування електричної енергії, нейронна мережа, система керування, автоматизація, привід вітроелектроустановки, механічна частина.

SUMMARY

Hryhorenko Ihor Volodymyrovych «Research of Operating Modes of a Wind Turbine with Forecasting of Generated Power in the Conditions of Sumy Region».

Qualification Work submitted for the degree of Master in Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics under the educational program «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics» in specialty 141 «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics». Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The work analyzes the latest achievements in the field of wind energy and proposes solutions that can be used in the conditions of the Sumy region. The wind potential analysis for the Sumy region is performed, and the features of the structure and methods of connecting wind turbines are presented.

An analysis of the main factors influencing the performance indicators of wind turbines is conducted, and an analysis of the main algorithms ensuring the functioning of the turbine control system is performed.

The main equipment for the wind turbine is selected, and a forecast of the possible electricity generation is provided.

Occupational safety measures are outlined, and the economic justification for the proposed solutions in the work is performed.

Keywords: electric grid, wind power plant, wind generator, electricity generation, neural network, control system, automation, wind turbine drive, mechanical part.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ В УМОВАХ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ..... | 10 |
| 1.1 Аналіз загального потенціалу Сумської області та України..... | 10 |
| 1.2 Загальна будова, класифікація ВЕ та визначення основних режимів роботи..... | 12 |
| 1.3 Аналіз основних способів виконання підключення ВЕ до мережі електропостачання..... | 15 |
| Висновки до розділу..... | 22 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЕТАПІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ВЕ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ..... | 23 |
| 2.1 Аналіз впливу основних факторів на показники роботи ВЕ..... | 23 |
| 2.2 Аналіз особливостей розробки загальної системи електропостачання на основі ВЕ..... | 31 |
| 2.3 Визначення основних алгоритмів забезпечення функціонування загальної системи керування ВЕ..... | 33 |
| Висновки до розділу..... | 34 |
| РОЗДІЛ 3. ПРОПОЗИЦІЇ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ВЕ ДЛЯ МОЖЛИВОГО ВИКОРИСТАННЯ В СУМСЬКІЙ ОБЛАСТІ..... | 35 |
| 3.1 Особливості розрахунку ВЕ та вибір основного обладнання..... | 35 |
| 3.2 Аналіз прогнозування виробітку електроенергії запропонованою установкою ВЕ..... | 39 |
| Висновки до розділу..... | 43 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ..... | 44 |
| Висновки до розділу..... | 46 |
| РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ..... | 47 |
| Висновки до розділу..... | 49 |
| ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ..... | 50 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 52 |
| ДОДАТКИ..... | 55 |

ВСТУП

Актуальність теми. Енергетична галузь сьогодення потребує вирішення питань генерації електроенергії для різноманітних об'єктів господарювання. Основними джерелами виробітку електроенергії та підтримання показників роботи загальної мережі доволі сильно починають залежати від різноманітних джерел ВДЕ.

В свою чергу доволі широкого застосування на всій території Сумської області набули сонячні електростанції. При чому встановлення сонячних електростанцій потребує доволі великих площ для забезпечення ефективної потужності в регіоні. Виходячи з цього великої кількості площ на території Сумської області для монтажу сонячних електростанцій немає, адже земельні ресурси використовуються доволі потужно в сільському господарстві.

Виходячи з цього можливим варіантом вирішення проблеми підтримання генерації регіону є використання вітроенергетики. Необхідно враховувати також низький рівень потенціалу вітрів в області, а отже єдиною можливістю впровадження ВЕ є збільшення технічного рівня самого обладнання установки.

Відповідно до цього, для реалізації подібного проекту необхідно запропонувати найбільш ефективну установку в умовах низьких швидкостей вітру. Потрібно зазначити, що ринок альтернативної енергетики не зупиняється і фахівці розробляють все більше установок з високим технічним потенціалом.

Виходячи з цього застосування установок, високого технічного потенціалу для реалізації підтримання параметрів генерації електроенергії в мережах електропостачання є доволі актуальним питанням та потребує подальших досліджень.

Актуальність стану наукової розробки проблеми. Сьогодення України потребує різноманітних напрямків альтернативної енергетики, а отже вчені доволі часто звертають увагу на пошук основних напрямків вдосконалення існуючого обладнання. Наукові розробки виконуються в напрямку підвищення КПД обладнання та його ефективності. Подібні дослідження дозволяють

використовувати установки в регіонах з низькими швидкостями вітру. Для покращення ефективності роботи подібних установок доволі часто використовують штучний інтелект, що направлений на підвищення показників роботи вітроелектростанцій.

Мета та задачі досліджень. Виконати дослідження та прогнозування виробленої потужності високотехнологічної вітроелектроустановки для умов Сумської області з низьким потенціалом потоків вітру.

Вирішення мети дослідження потребує розв'язання ряду задач:

1. Провести аналіз основних параметрів швидкостей вітру.
2. Визначити особливості організації підключення вітроелектроустановок в групу з подальшою їх синхронізацією.
3. Виконати вибір обладнання для вітроелектроустановки та виконати прогнозування виробітку електроенергії даною установкою.
- 4 Провести економічну оцінку запропонованих рішень.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є застосування вітроелектроустановки в умовах Сумської області з використанням високотехнологічного обладнання.

Предмет дослідження. Показники генерації електроенергії запропонованою вітроелектроустановкою.

Завдання дослідження. Основним завданням роботи є визначення факторів, що впливають на ефективність роботи вітроелектроустановки з подальшим прогнозуванням показників роботи в Сумській області.

Методи дослідження. Для забезпечення виконання дослідження використовувались математичні та програмні методи дослідження з виконанням аналізу останніх досліджень.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота містить 5 розділів, 3 додатки, 2 таблиці, 17 рисунків, 23 джерела.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ В УМОВАХ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз загального потенціалу Сумської області та України

Ефективність роботи вітроелектроустановок (ВЕ) характеризується величиною технічного потенціалу потоку вітру. Відповідно до цього загальна кількість електроенергії, що можна отримати від потоку вітру і характеризує величину технічного потенціалу потоку вітру.

Технічний потенціал потоку вітру також доволі сильно залежить і від розвитку технічних параметрів ВЕ, а отже за умови значного розвитку технологій для ВЕ можливе ефективне їх розповсюдження навіть по територіям з низьким значенням швидкості вітру.

Загалом сумарний показник технічного потенціалу потоку вітру залежить від великого числа параметрів, що включають окрім середнього значення швидкості вітру та розвитку сучасних технологій ВЕ, ще і особливості розміщення установки на певній території та відповідно врахування певного впливу перешкод на потоки вітру.

Першочерговою умовою проведення аналізу потенціалу потоків вітру є проведення загального аналізу середніх значень для швидкості вітру на території України. Так на рисунку 1.1 нами розглянуто карту розподілу середніх значень швидкостей вітру по Україні відповідно до найбільш продуктивних місяців року.

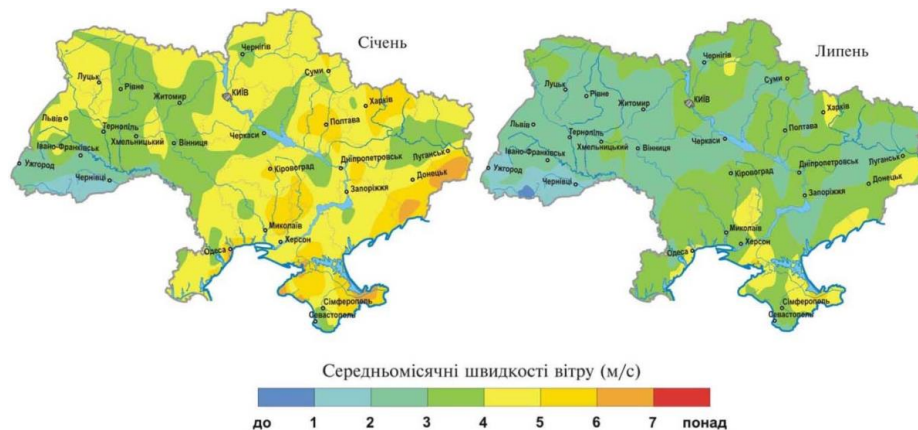


Рисунок 1.1 – Карта розподілу середніх значень швидкості вітру на території України

Як видно з даних рисунку 1.1, більшість регіонів України мають низьке значення технічного потенціалу, що характеризується середнім значенням. Фактично південні регіони мають середнє значення швидкості вітру, що може задовольнити умовам ефективного використання ВЕ.

Необхідно зауважити, що станом на сьогодні прийнято, що середнє значення швидкості вітру для ефективної роботи вітроустановки повинно бути більше 5 м/с. Менші значення швидкості вітру на території регіону роблять використання ВЕ неефективними за нинішнього розвитку технологій. За умови більших середніх значень вітру ефективність ВЕ зростає у геометричній прогресії.

Основними дослідження вітроенергетики є фактично розподіл на два напрямки, що направлені на:

- збільшення технічного та технологічного потенціалу обладнання ВЕ;
- пошук найбільш перспективних місць для застосування ВЕ.

При проведенні аналізу особливостей технічного потенціалу вітрів Сумської області, слід зауважити, що відповідно до рисунку 1.1, середні значення швидкості вітру знаходяться нижче допустимо ефективного значення 5 м/с. Відповідно до цього пропонується провести аналіз середніх значень швидкості вітру для Сумської області з врахуванням тенденцій до зміни клімату регіону (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Аналіз розподілу швидкості вітру для Сумської області

| Місяць року | Середнє значення швидкості вітру, м/с | Максимальне значення пориву вітру, м/с | Орієнтовна кількість днів з швидкістю більше 10 м/с | Особливості та тенденції |
|-------------|---------------------------------------|--|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Січень | 4,5...5,0 | 18...25 | 5...7 | Найбільш вітряний місяць. Характеризується переважанням вітрів південного та західного напрямків. |
| Лютий | 4,4...4,8 | 17...23 | 4...6 | Висока вітрова активність. Збереження високих швидкостей вітру, що є типовими для зимового періоду. |
| Березень | 4,1...4,5 | 16...22 | 3...5 | Перехідний період. Швидкість вітру загалом є доволі високою але починає повільно спадати |

Продовження таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|-----------|---------|-------|--|
| Квітень | 3,8...4,2 | 15...20 | 2...4 | Зниження вітрової активності. Початок стабілізації з можливим різким посиленням |
| Травень | 3,5...3,8 | 14...18 | 1...3 | Велична середньої швидкості вітру наближається до мінімального річного значення. Зростає кількість вітрів з північного напрямку. |
| Червень | 3,3...3,6 | 13...17 | 0...2 | Найбільш тихий місяць. Для даного місяцю характерні найнижчі річні значення швидкості вітру. |
| Липень | 3,2...3,5 | 13...17 | 0...1 | Місяць з мінімальною швидкістю вітру. Найбільш спокійний місяць року. |
| Серпень | 3,4...3,7 | 14...18 | 1...2 | Повільний ріст швидкості вітру з поступовим зростанням в кінці літа. Початок переходу на осінній режим. |
| Вересень | 3,8...4,2 | 15...20 | 2...4 | Відчутне зростання швидкості вітру. |
| Жовтень | 4,1...4,5 | 17...23 | 4...6 | Значне посилення вітрової активності, що характерне для осіннього періоду. |
| Листопад | 4,3...4,8 | 18...25 | 5...7 | Один з найбільш вітряних місяців року. Швидкість наближається до зимового максимуму. |
| Грудень | 4,4...4,9 | 18...24 | 5...7 | Місяць з високим значенням вітрової активності |

Відповідно до проведеного аналізу (таблиця 1.1) бачимо фактично підтвердження даних низької швидкості вітру в Сумській області. При цьому бачимо, що спостерігаються певні максимальні значення потоків вітру але вони не значні по тривалості. Виходячи з цього можливим варіантом використання технічного потенціалу потоків вітру на території Сумської області є підвищення технологічного та технічного потенціалу ВЕ для можливості ефективного їх використання в даних умовах.

1.2 Загальна будова, класифікація ВЕ та визначення основних режимів роботи

Для подальшого розгляду ВЕ необхідно виконати аналіз будови сучасних вітроустановок, що дозволить зрозуміти подальші кроки для підвищення його технічного потенціалу. Загальна будова ВЕ, що знайшов найбільшого використання в енергетиці наведено на рисунку 1.2.

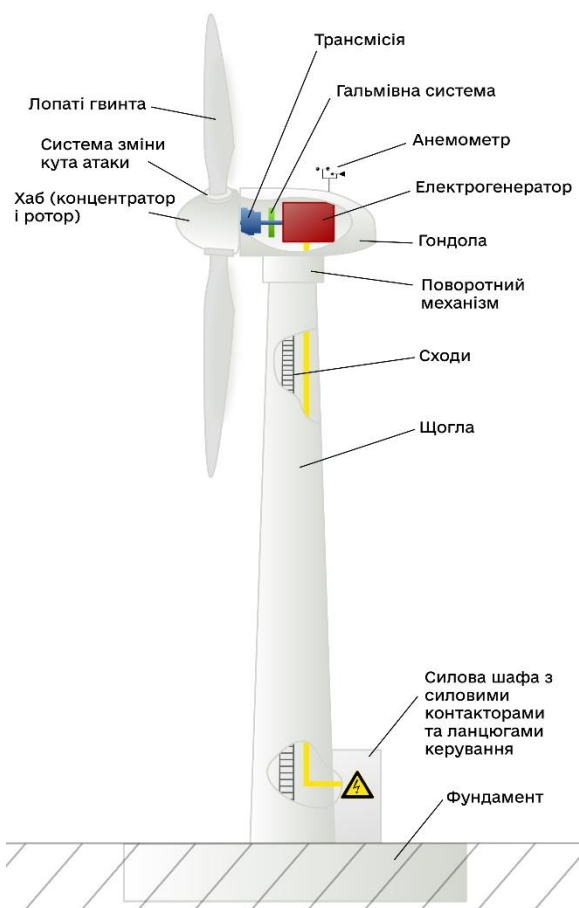


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд та особливості будови ВЕ

Конструкція ВЕ (рис. 1.2) фактично на сьогодні є найбільш ефективною. Необхідно зазначити, що існує доволі велика кількість різновидів ВЕ, які за принципом роботи фактично схожу. Основна відмінність типів ВЕ сходиться до форми та розмірів лопатей, а також до осі обертання ВЕ (горизонтальна чи вертикальна). Всі системи ВЕ промислового використання керуються комп'ютерними системами. При цьому є можливість контролю кута атаки лопаті, зміни напрямку лопатей відповідно до потоку вітру. Також виконується контроль генерування основних параметрів, таких як напруга.

Загалом ВЕ це комплекс електротехнічного обладнання, що пов'язане між собою для ефективного виробництва електроенергії виробленої від потоку вітру. Для передачі крутного моменту генератора призначений втривідвигун, що здійснює перетворення енергії від потоку вітру на певну механічну енергію. Механічна енергія передається до генератора де і перетворюється на електричну енергію.

Як зазначалось вище, доволі широкого розповсюдження сьогодні мають два типи ВЕ – з горизонтальною віссю та з вертикальною віссю обертання.

Перший тип ВЕ характеризується певним колінарним вектором значення кутової швидкості на валу вітродвигуна. Також даний тип ВЕ характеризується вектором складової потоку вітру аксіального типу.

Другий тип ВЕ відрізняється від попереднього ортогональним параметром вектору величини кутової швидкості валу вітродвигуна. Вектор складової потоку вітру теж є аксіальним.

Для вибору необхідного типу ВЕ для конкретних умов використання необхідною умовою є розуміння особливостей їх класифікації. Особливості класифікації ВЕ та класифікацію станцій нами наведено на рисунках 1.3 та 1.4.

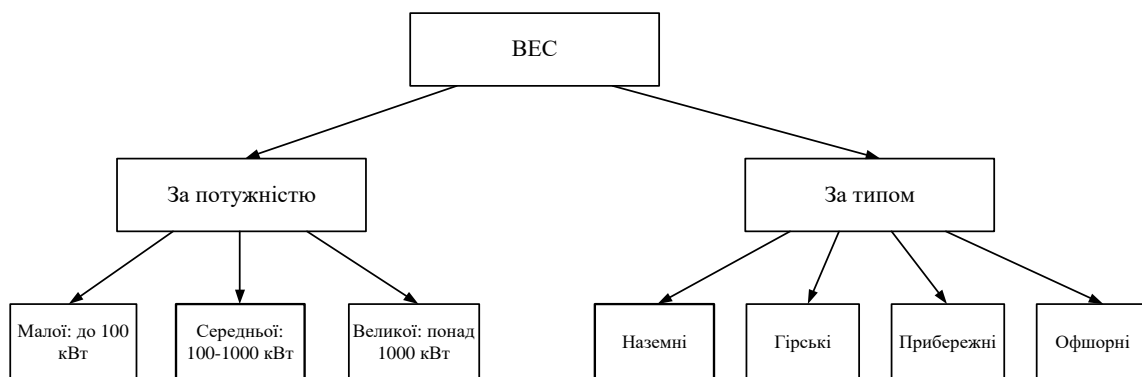


Рисунок 1.3 – Загальна характеристика станцій з ВЕ

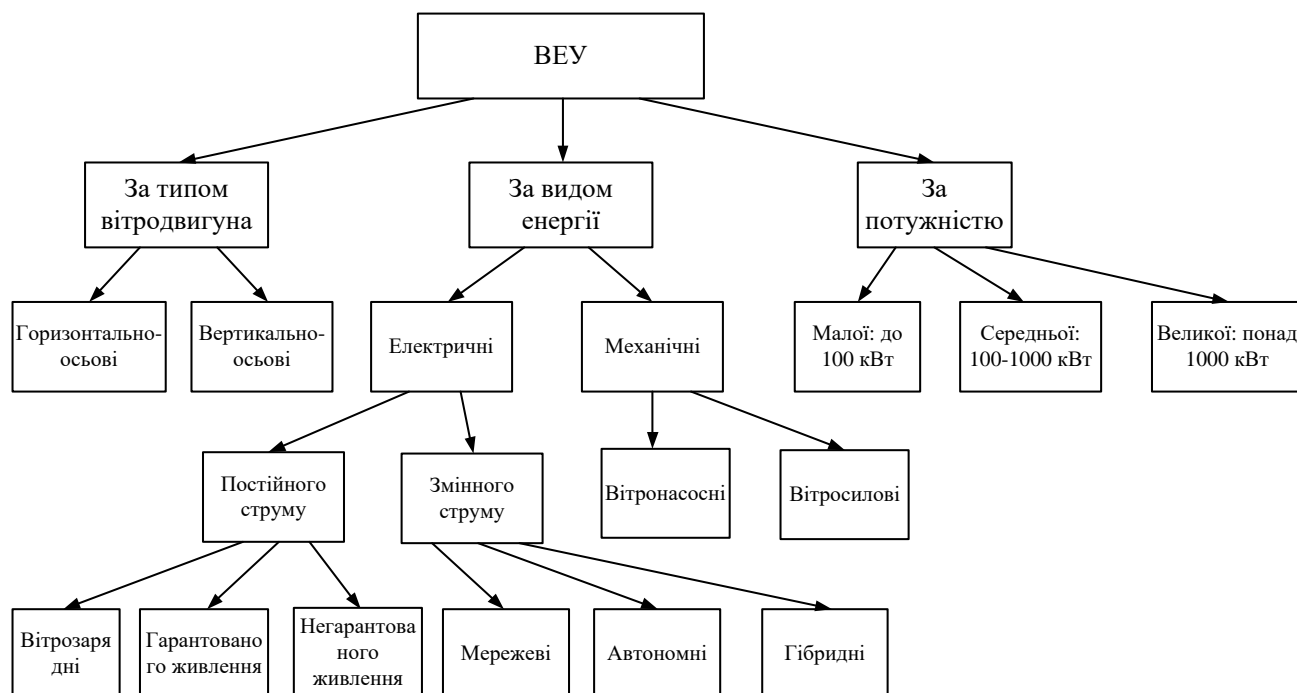


Рисунок 1.4 – Загальна існуюча класифікація ВЕ

Як видно з наведених рисунків бачимо, що установки ВЕ мають доволі широку класифікацію, що враховує всі особливості. Відповідно до цього виникає певна класифікація і станцій. Хоча першочергово необхідно враховувати призначення ВЕ та влаштовувати їх в певних регіонах.

Необхідно зазначити, що для умов Сумської області найбільш перспективними є використання ВЕ малої потужності. При цьому використання конкретного одного типу ВЕ не знайшло широкого використання, використовуються достатньо обидва їх типи.

1.3 Аналіз основних способів виконання підключення ВЕ до мережі електропостачання

Для подальшого аналізу пропонується розглянути основні способи підключення ВЕ до електричних мереж з врахуванням кількісних показників установок. При цьому необхідно також враховувати особливості влаштування ВЕ відповідно до класифікації.

Необхідно зауважити, що всі установки ВЕ мають при виконанні підключення доволі велику кількість особливостей та різноманітних чинників. При цьому першочерговий вплив на виконання підключення впливає саме потужність установки саме одиничне її значення. Наступним показником, що необхідно враховувати є розміщення на певній місцевості та доступність основних електричних мереж регіону. Цей показник має напевно найбільше значення при виборі схеми підключення та відповідно економічної складової установки ВЕ.

При підключенні також необхідно враховувати тип пристроїв генерування. І що не менш важливо для вирішення питання ефективності ВЕ є наявність в загальній схемі установки перетворювачів (інверторів), що встановлені стаціонарно в кожній установці.

Всі типи ВЕ та станцій на їх основі на сьогодні характеризуються загальними показниками, що описуються параметрами джерел енергії з розподільними мережами. При цьому відповідно подібні джерела енергії

встановлюються окремо від традиційних джерел енергії для підтримання показників якості електроенергії в загальній мережі. При цьому дані джерела енергії фактично не можуть використовуватись в якості основних джерел енергії, а фактично здатні підтримувати показники роботи та якості мережі в цілому.

Відповідно до цього сполучення ВЕ з основною мережею електропостачання може бути виконано відповідно до магістрального типу, радіального типу чи навіть змішаного типу сполученням. Іншим параметром, що має вплив на особливості підключення та параметри роботи є дистанція між установками а також загальна кількість установок ВЕ, що використовуються разом. При цьому окрім потужності ВЕ необхідно враховувати також орзу вітрів на території розміщення.

При лінійному розташуванні ВЕ, що є характерним для гірських регіонів чи південних регіонів з морським сусідством та інших подібних ділянок доволі часто використовують схему підключення магістрального типу. Основною особливістю даного підключення та його організації відповідно є роза вітрів, що має чітко виражений постійний напрям руху вітру. Також не менш важливим є перпендикулярність бісектриси напрямку вітру до лінії розташування ВЕ.

При цьому не менше уваги приділяють і відстані між окремими ВЕ, яка має становити від 3 до 4 діаметрів вітроколеса. Це необхідно для уникнення різноманітних турбулентних процесів, що можуть впливати на загальну роботу установок.

Необхідно зазначити, що наприклад діаметри вітроколеса для установок, що використовуються на півдні України можуть сягати 60 м і навіть більше. На сьогодні максимальне значення вітроколеса становить фактично 120 м. Відповідно до цих даних можна прорахувати кількість установок на певну територію. Так наприклад для розміщення 10 установок з діаметрами від 60 до 120 м необхідно розтушувати їх на відстані, що складатиме 1800...2400 м. При цьому найменше значення відстані подібної станції наведено для найменшого діаметру вітроколеса.

Необхідно сказати, що більшість ВЕ подібної характеристики мають потужність 1,5...3,5 МВт. При цьому номінальна величина напруги при її виході з генераторної установки складає до 690 В, що вказано для ВЕ з діаметром вітроколеса від 60 м. У відповідній пропорції також будуть зростати і показники залежно від величини діаметру.

Відповідно до цього розташування подібних установок має враховувати всі аспекти для їх ефективного використання в конкретних умовах. Для умов Сумської області подібна схема розташування є неефективною з декількох причин. По-перше на території області відсутні чітко виражені вітри, а по друге їх швидкість є малою для приводу ВЕ з великими діаметрами вітроколеса. Відповідно до цього буде спостерігатись значний простій подібних електростанцій.

При виконанні економічного розрахунку необхідною умовою є забезпечення підвищених значень робочої напруги, що дає економічний ефект в їх застосуванні. Відповідно до цього найбільш сучасні ВЕ часто забезпечуються трансформатором що працює на підвищення напруги. При цьому з'єднання ВЕ одна з одною проводиться на стороні середнього значення напруги (6...30 кВ).

На території України, ще 20 років тому були побудовані електростанції, що мають ВЕ невеликої потужності. При цьому одиничне значення потужності ВЕ не перевищує 250 кВт. При цьому їх робота забезпечувалась в основному на величині потужностей генераторів. Особливості підключення та організація загальної схеми підключення ВЕ невеликої потужності наведена на рисунку 1.5.

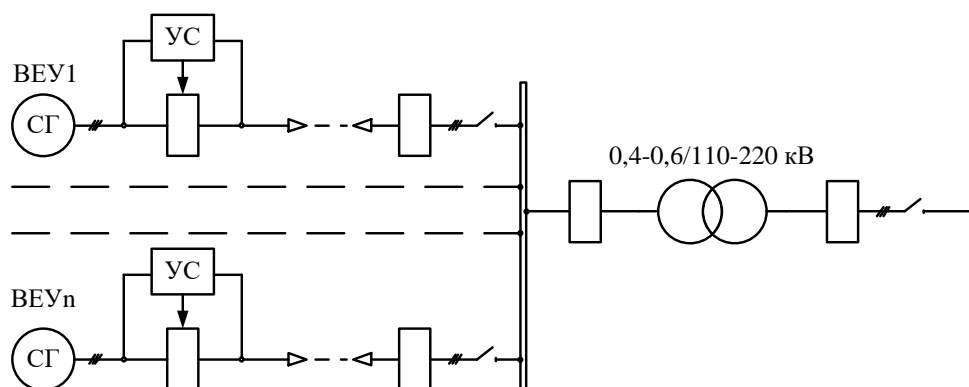


Рисунок 1.5 – Загальна схема підключення та синхронізації ВЕ невеликої потужності

ВЕ, що наведені на рисунку 1.5 мають генератори синхронного типу та відповідно мають радіальний тип підключення. При цьому ВЕ забезпечені різними типами генераторів електроенергії.

За умови відсутності статичних перетворювачів підтримання необхідного значення частоти обертання для загальної роботи установки відбувається стабільно, та також є кратним мережевій частоті. Подібний ефект досягається з використанням синхронного типу генераторів. При цьому існує декілька варіантів їх підключення з синхронним генератором:

- за умови, що кожен з генераторів має свій пристрій синхронізації;
- за умови використання пристроїв автоматичного забезпечення синхронізації через синхронізацією всієї групи з основною мережею електропостачання;
- за умови використання пристроїв для автоматичного синхронізування генераторів кожної ВЕ з загальної групи між собою.

При проведенні аналізу встановлено, що найбільше експлуатаційним вимогам ВЕ відповідає відповідно перший варіант. Застосування першого варіанту підключення та синхронізації дозволяє використовувати мінімальну кількість пристроїв для синхронізування. Дана схема дозволяє підключення окремого генератора ВЕ до електричної мережі незалежно від інших генераторів ВЕ. При цьому за умови виникнення аварійних ситуацій на певній підстанції синхронізування з мережею проходить лише одна група генераторів ВЕ.

Відповідно до цього дана схема має недолік, що пов'язаний з частим синхронізуванням генераторів ВЕ з мережею при виконанні підключення до неї. При цьому вироблена електроенергія від обертання ВЕ не потрапляє до мережі, що відповідно має негативний вплив на загальну роботу групи ВЕ. Відключення установок може бути доволі частим, за умови недостатньої швидкості вітру, а отже при подальшому включенні за умови необхідного вітру потрібно проводити синхронізацію з електричною мережею знову. Також синхронізацію проводять у випадку проведення різноманітних ремонтів чи робіт з ВЕ, що також значно знижує ефективність її роботи.

Для обходу необхідності проведення синхронізації ВЕ з мережею електропостачання застосовуються асинхронні генератори. При цьому необхідність в пристроях синхронізування відпадає. Однак в цьому випадку виникає викид в електричну мережу певної кількості реактивної потужності. Виходячи з цього компанія по організації генерування електроенергії подібними установками повинна сплатити за викинуту в електричну мережу реактивну потужність. Іншим варіантом відповідно вирішення даної проблеми є використання спеціальних установок компенсації реактивної складової потужності.

За місце встановлення компенсаційних пристроїв можна обрати місце безпосередньо біля генераторної установки ВЕ. При цьому встановлюється один пристрій на кожену установку. Можливо також встановлювати пристрої компенсації на групу ВЕ з розміщенням її на підвищувальній підстанції (рис.1.6). Для забезпечення «м'якого» типу підключення ВЕ до електричної мережі в таких випадках застосовуються керовані тиристори вентиляного виконання.

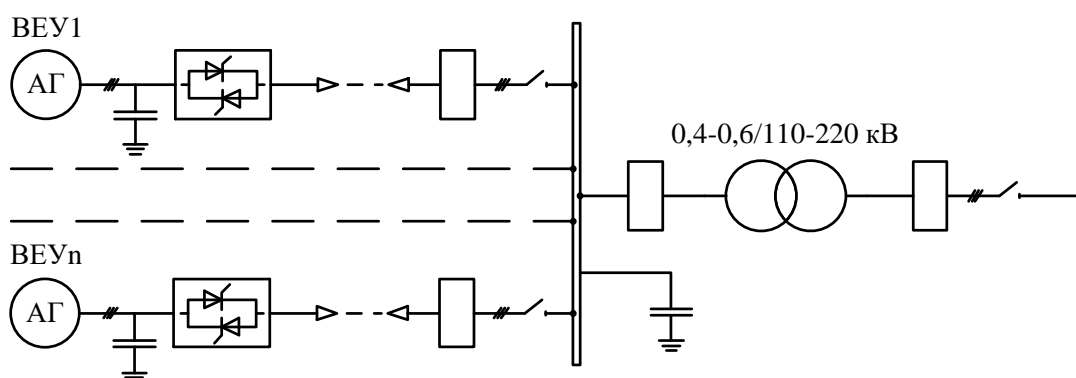


Рисунок 1.6 – Загальна схема підключення ВЕ невеликої потужності з генераторами асинхронного типу

Подібні схеми підключення ВЕ (рис. 1.6) можна використовувати для установок з асинхронними генераторами, що є двошвидкісними та відповідних генераторів які мають фазний ротор та відповідне регулювання ковзання. При цьому подібні установки в ВЕ невеликої потужності фактично не використовуються. Вони знайшли широкого розповсюдження в ВЕ значно більшої потужності.

За умови непостійної частоти обертання турбіни ВЕ, що працюють з генераторами асинхронного типу та мають короткозамкнений ротор передача згенерованої електроенергії в мережу виконується з використанням перетворювачів частоти (рис. 1.7). Така ж схема підключення використовується для підключення ВЕ з синхронними генераторами, що мають непостійне значення частоти обертання.

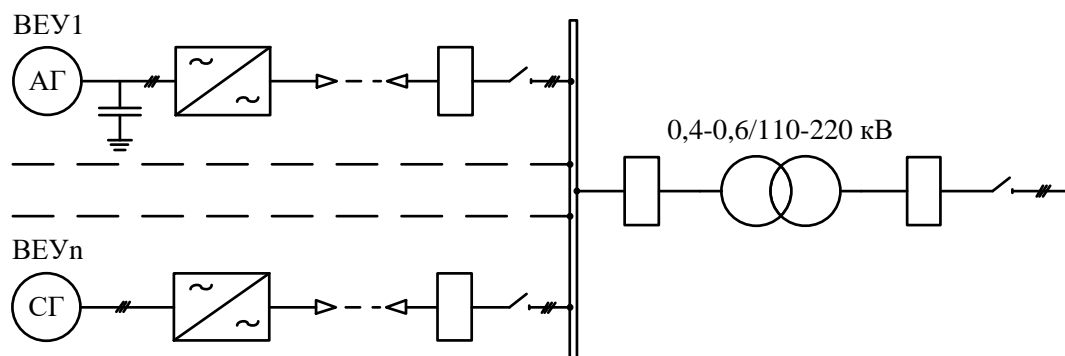


Рисунок 1.7 – Загальна схема підключення ВЕ з використанням перетворювачів частоти

Також необхідно навести схеми виконання підключення ВЕ до мережі за радіальним типом принципу, що мають трансформатори напруги середньої потужності. Дані схема наведено на рисунках 1.8-1.10.

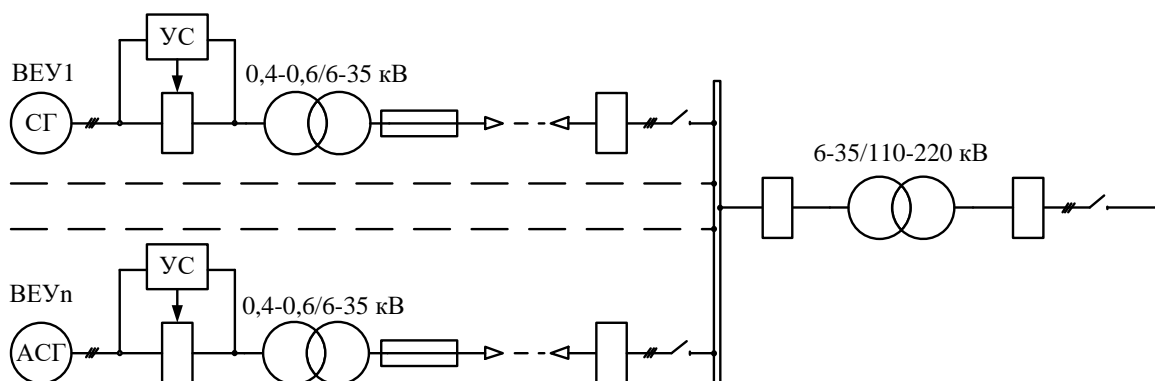


Рисунок 1.8 – Загальна схема підключення ВЕ з синхронними генераторами за радіальним типом

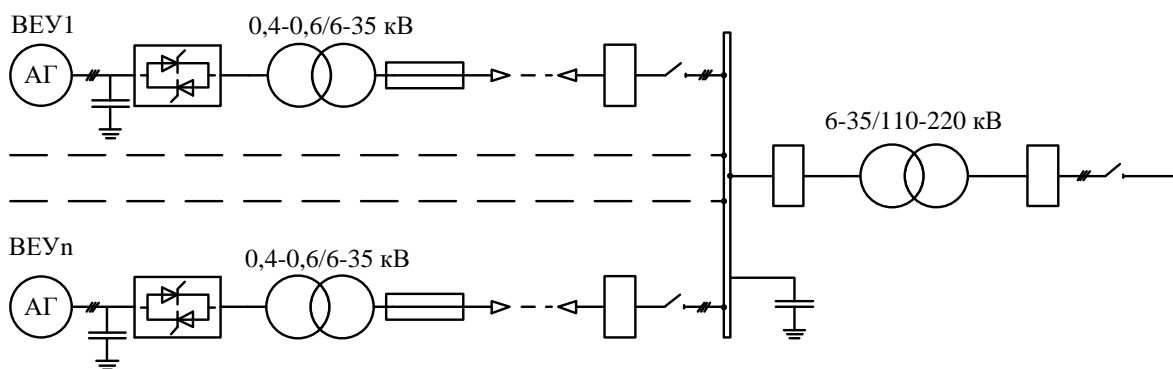


Рисунок 1.9 – Загальна схема підключення ВЕ з асинхронним генератором та короткозамкненим типом ротора

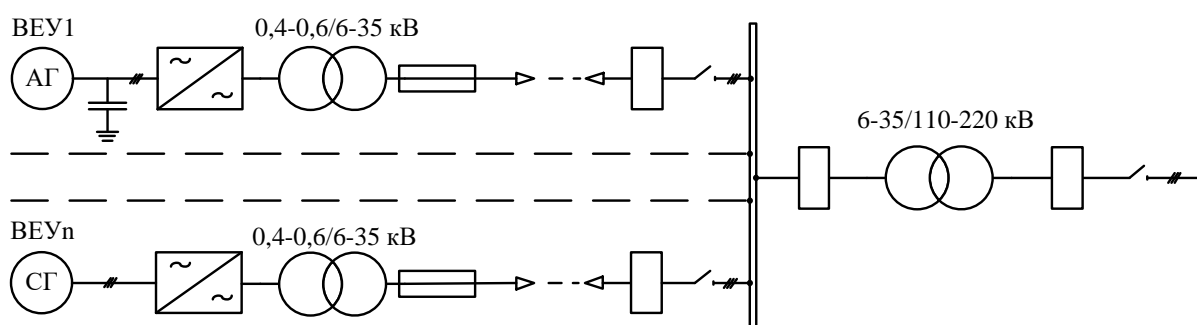


Рисунок 1.10 – Загальна схема підключення ВЕ за умови непостійної частоти генераторів різних типів

У випадку, якщо роза вітрів є сприятливою для виконання підключення декількох ВЕ до однієї трансформаторної підстанції з середнім значенням напруги використовується схема підключення, що наведена на рисунку 1.11.

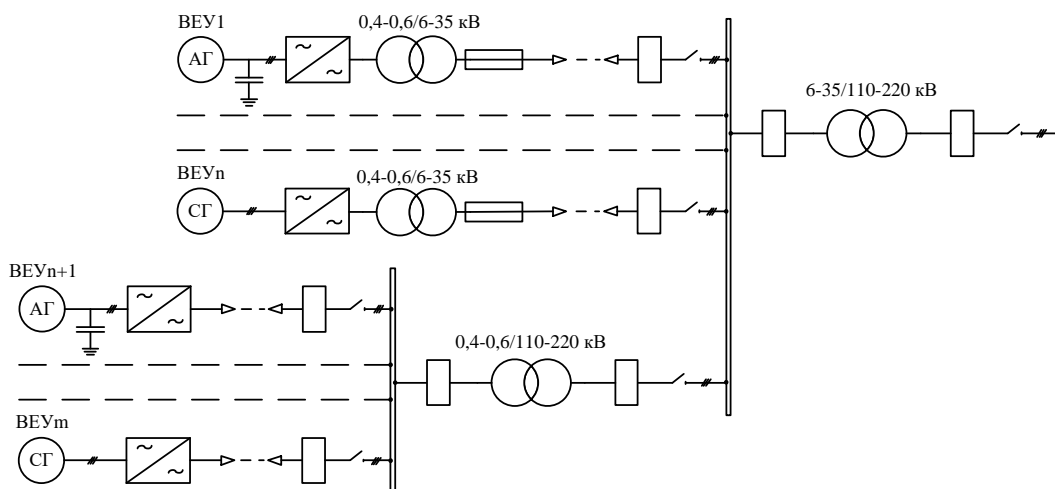


Рисунок 1.11 – Загальна схема підключення ВЕ за складно-розгалуженою схемою радіального типу

При аналізі основних тенденцій вітроенергетики в світі можна побачити будівництво великих парків ВЕ на різних континентальних шельфах, що перебувають в офшорних зонах. Кількість ВЕ може в таких парках може сягати 80 шт. з застосуванням підводного з'єднання та однією підвищувальною станцією.

В Україні вітроенергетика все більше переходить до гібридного підходу в організації виробітку електроенергії. Даний підхід полягає в комбінуванні сонячних та вітроелектростанцій, що дозволяє виконати підвищення ефективності загальної системи. При цьому в Сумській області використання ВЕ великої потужності є неефективним, а отже спостерігається використання переходу до середньої та навіть малої генерації.

Основною проблемою Сумського регіону залишається потреба в енергетичній стійкості, що в умовах воєнних дій набуває особливої цінності. При цьому середнього значення швидкості в Сумській області фактично достатньо для реалізації малої вітроенергетики чи навіть реалізації переходу до середньої вітроенергетики. А отже залишати дослідження даного напрямку не можна.

Висновки до розділу

Вітроенергетика є доволі перспективним напрямком виробництва електроенергії як в Україні так і в межах Сумської області. При цьому необхідною умовою є особливість ефективного використання потужності потоків вітру. При цьому найбільшу ефективність для Сумської області та відповідно найбільший потенціал мають саме ВЕ з малою потужністю. Використання великих ВЕУ на території області не має значної ефективності. При цьому підключення всіх типів ВЕ до мережі виконується з використанням проаналізованих технічних рішень.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЕТАПІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ВЕ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ

2.1 Аналіз впливу основних факторів на показники роботи ВЕ

Відповідно до проведеного аналізу швидкості потоків вітру Сумської області та відповідно до досліджень можна визначити швидкість потоку вітру на необхідній висоті. Для цього використовують залежність, що враховує висоту вище 5 м. При цьому можна виконати визначення швидкості вітру на потрібній висоті з рівняння:

$$V_1 = V_0 \left(\frac{H_1}{H_0} \right)^k \quad (2.1)$$

де V_0 – значення швидкості вітру на висоті, що є відомою, м/с;

H_1 – задане значення висоти для проведення розрахунку, м;

H_0 – висота при якій проводилась замір значення швидкості вітру, м;

k – показник врахування шорсткості поверхні, що має емпіричну залежність.

необхідно також зазначити, що фактично всі метеорологічні станції надають інформацію про середнє значення швидкості вітру на висоті в 10 м над поверхнею. Відповідно до цього можна виконувати подальші розрахунки необхідної висоти та швидкісних параметрів вітряних потоків.

При цьому з виразу (2.1) величина показника k має відмінність. В різних дослідженнях вона має різні значення. Відповідно до нормативних даних рекомендоване значення показника k повинно бути рівним 2. В дослідженнях доволі часто його приймають рівним 0,143, також зустрічаються данні в який даний показник обирається з меж 0,2...0,26. Відповідно до цього значення величини показника k нами розглянуто в додатку А до дипломної роботи.

Відповідно до наведених даних показник k приймає різні значення і відповідно дозволяє враховувати особливості ландшафту, забудову території та

інші показники. При цьому необхідною умовою є врахування територіального розміщення кожної окремої ВЕ.

Для проведення аналізу особливостей взаємодії ВЕ з потоком повітря необхідно навести загальну схему взаємодії, що наведена на рисунку 2.1.

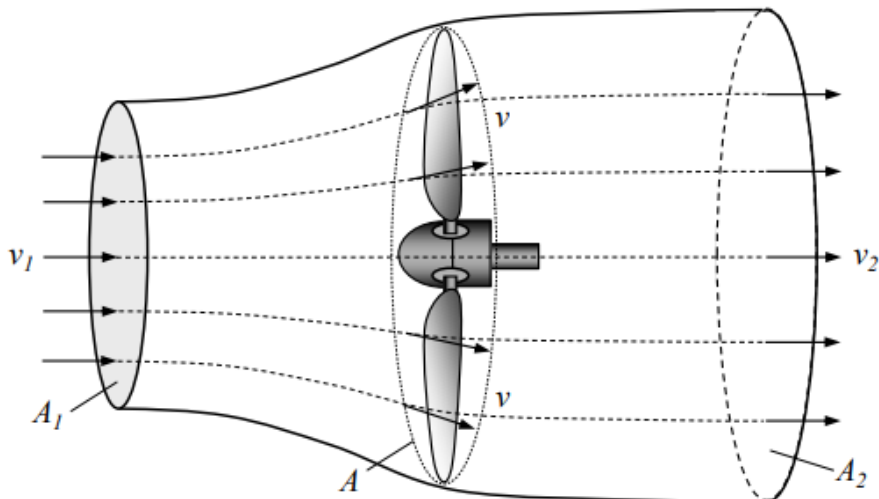


Рисунок 2.1 – Схема особливостей взаємодії ВЕ з потоками вітру

Дана схема доволі чітко описує необхідність нерозривності струменя повітряного потоку для необхідності якісного обертання ВЕ. Відповідно дану залежності можна зобразити у вигляді рівняння:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = Av = const \quad (2.2)$$

Відповідно до цього рівняння (2.1) характеризує нескінченний потік вітру, що дозволяє отримати необхідне значення продуктивності ВЕ в загальному випадку на певній місцевості.

При цьому вираз (2.1) можна переписати з врахуванням характеристики потоку вітру:

$$P_B = \frac{E_{\text{кін}}}{t} m v^2 = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 = \frac{\rho}{2} A v^3 \quad (2.3)$$

Відповідно до цього рівняння необхідно чітко розуміти основні показники, що характеризують потік вітру. Виходячи з цього одним з основних параметрів є

величина щільності потоку повітря ρ . Необхідно зазначити, що дана величина не є сталою, а має певні залежності від величини тиску, температури та кількісних показників водяної пари в повітряному потоці.

Необхідно зазначити, що величина щільності водяної пари є меншою за величину щільності вологого повітря за умови однакового тиску. А отже в розрахунках доволі часто приймають поняття «ідеальний газ», що дозволяє визначити залежність щільності від інших параметрів. Виходячи з цього щільність потоку повітря можна визначити з рівняння:

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \quad (2.4)$$

де p – значення тиску повітряного потоку;

R_s – питома значення газової сталої процесу;

T – значення температури повітряного потоку.

В розрахунках для початку відліку тиску p прийнято нульове значення на рівні моря, яке становить $p_0 = 101325$ Па. За умови нормального значення атмосферного тиску та нульового значення температури повітря можна визначити початкове значення щільності повітряного потоку:

$$\rho_0 = \frac{101325}{287,058 \cdot 273,15} = 1,292 \text{ кг/м}^3$$

При проведенні технологічних процесів на території розміщення ВЕ, доволі часто в повітря виділяється доволі велика кількість пилу та димових газів. При цьому всі ці фактори мають шкідливий вплив на величину щільності повітряного потоку, відповідно знижуючи її. При цьому збільшення негативного впливу на величину щільності повітряного потоку набуває також і параметри клімату регіону. Підвищення температури також знижує величину щільності повітряного потоку.

За умови складного рельєфу місцевості, що характеризується великою кількістю ярів то швидкість повітряного потоку в них характеризується швидкістю повітряного потоку на поверхні яру. За умови більшої за 2 м/с швидкості повітряного потоку – швидкість повітряного потоку характеризується його енергією, а за умови, що швидкість потоку вітру менша за 2 м/с – швидкість повітряного потоку характеризується різноманітними термічними факторами.

Необхідно зазначити, що в природі існують певні закони зміни швидкості повітряного потоку. При цьому існують добовий, місячний та річний період особливостей зміни швидкості повітряного потоку.

Добова зміна потоків повітря має два піки. Ці піки виникають в ранці та ввечері через зміну температурного режиму доби. Місячна та річна зміна швидкості повітряних потоків теж фактично відбувається через зміну температурного режиму регіону. Основним параметром подібних змін є термічні сили, що виникають в результаті прогріву чи охолодження повітря. При цьому температура повітря повинна відрізнитись від температури поверхні. Дані процеси призводять до значної зміни швидкості повітряних потоків. При цьому низхідні потоки можуть змінювати швидкість повітря фактично до 3 м/с, а от для висхідних потоків швидкість може збільшуватись до величини 5 м/с.

Виходячи з цього можна сказати, що на щільність повітряних потоків та їх характеристику впливає доволі велика кількість факторів. При цьому ці ж фактори фактично мають пряму лінійну залежність на генерацію електричної енергії.

Відповідно до проведеного аналізу можна скласти блок-схему загального впливу показників на роботу ВЕ. Загальна схема наведена на рисунку 2.2.

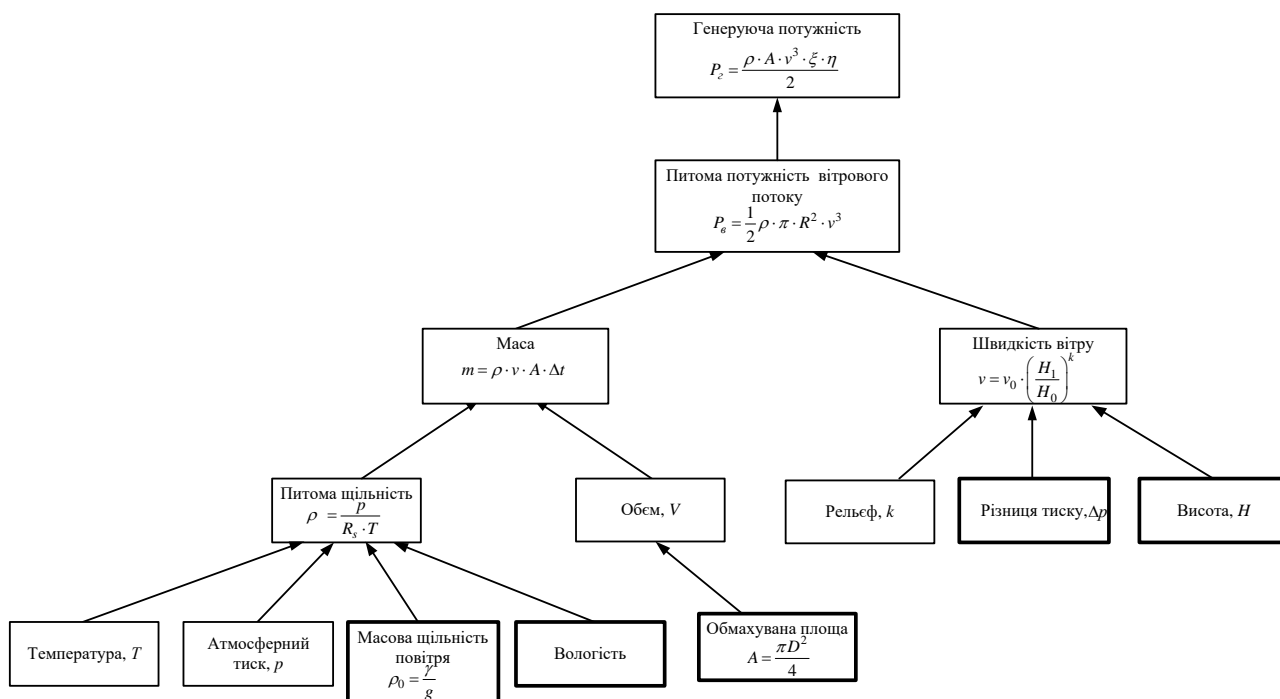


Рисунок 2.2 – Блок-схема загального впливу показників повітряного потоку на загальну роботу ВЕ

З наведеної блок-схеми можна зробити висновок, що найбільшого впливу на ефективність роботи ВЕ має швидкість повітряного потоку. При цьому тривале мале значення швидкості вітру приводить до значного зменшення ефективності роботи ВЕ.

На схемі (рис. 2.2) основними величинами є:

D – величина діаметру обраного вітряного колеса ВЕ;

γ – питома значення ваги повітряного потоку в заданих умовах аналізу;

g – значення прискорення сили тяжіння (прискорення вільного падіння);

ξ – значення коефіцієнта, що характеризує особливість використання енергії потоку вітру;

η – значення ККД для генераторної установки, що використовується в ВЕ.

Всі інші величини нами було розглянуто вище при наведенні моделювання повітряного потоку та формування основних залежностей. В якості певної випадкової величини використовується відношення відстані між основними центрами поверхні загального обмаху ВЕ та сформованої лопатями зони зіткнення з потоком повітря.

Дослідження проведені зарубіжними вченими показують, що за умови розміщення декількох ВЕ в одному ряду спад швидкості повітряного потоку спостерігається для другої ВЕ. Відповідно, якщо врахувати розміщення ВЕ з більшою кількістю рядів спостерігається прямо пропорційне зниження ефективності потоків вітру. Стабілізація потоку вітру спостерігається фактично лише після 5 ряду ВЕУ, і ефекти повторюється знову.

Вітчизняні ВЕ зазвичай розміщуються в ряду на відстані $1,5...2,0D$, що забезпечує достатню ефективність їх роботи. Необхідно зазначити, що в світі доволі поширеною практикою є розміщення рядів на відстані $4D$, що відповідно є значно більшою від вітчизняних значень.

Зазначимо, що потоки вітру можуть переміщуватись в різних напрямках. При цьому за умови дії повітряного потоку, вздовж розміщення ряду, спостерігається значний вплив кожної з ВЕ одна на одну. Відповідно в таких умовах здійснюють відключення частини установок, при чому найбільш розповсюдженою практикою є відключення через одну установку ВЕ. Це відповідно забезпечує найбільш оптимальну ефективність роботи всього ряду ВЕ та значно зменшує вплив установок одна на одну.

На практиці потримати подібні дані впливу ВЕ одна на одну при потоку вітру вздовж ряду доволі складно, а от отримати залежність роботи ВЕ при фронтальному напрямку повітряних потоків значно простіше. Це пояснюється першочерговим розрахунком та особливістю розміщення установок ВЕ відповідно до напрямку вітру.

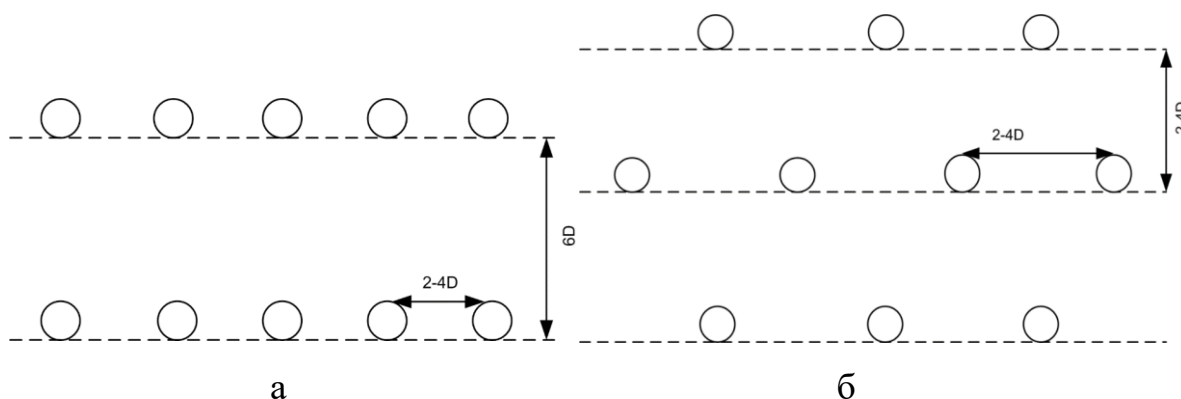
Відповідно до цього найбільш розповсюдженою схемою розміщення групи ВЕ є схема з їх перпендикулярним розташуванням. При цьому враховується рекомендована відстань між ними, що описана вище. Всі ряди розміщення ВЕ повинні бути перпендикулярними до переважаючих потоків вітру на території.

При цьому зміна параметрів розміщення ВЕ відповідно до потоків вітру має значний вплив на ефективність потоків вітру. З існуючих даних можна зазначити, що за умови зниження швидкості потоку вітру на 30 % спостерігається зменшення потужності ВЕ фактично на 40%. Відповідно до

цього можна зробити висновок, що величина швидкості вітру має доволі значний вплив на ефективність роботи ВЕ, що підтверджено великою кількістю досліджень.

За умови незначної зміни напрямку повітряних потоків виконують розстановку ВЕ в шаховому порядку, що певним чином зменшує вплив ВЕ одна на одну та вирівнює загальний потік вітру на всі установки. При такому розміщенні виконують збільшення відстані між установками.

Для розуміння основних варіантів розміщення ВЕ в рядах та основні відстані між установками нами розглянуто на рисунку 2.3.



а – дворядна схема з лінійним розміщенням ВЕ в рядах;

б – трирядна схема з шаховим розміщенням ВЕ в рядах.

Рисунок 2.3 – Загальні правила розміщення ВЕ в рядах залежно від особливостей повітряного потоку

Відповідно до схеми розміщення (рис. 2.3) можна визначити можливу кількість ВЕ на певній площі. Для цього використовують залежність, що наведена нижче:

$$n_{\text{ве}} = \frac{S_T}{(20D)^2} \quad (2.5)$$

де S_T – площа розміщення установок, м².

Відповідно до даної залежності можна отримати вираз для визначення кількості електроенергії, що генерується за річний період:

$$W_T = \frac{P_{\text{ср}}}{1000} T \frac{S_T}{(20D)^2} \quad (2.6)$$

За умови врахування значно більшої кількості показників ВЕ отримаємо більш точне рівняння для визначення кількості річної електроенергії:

$$W_T = \frac{\pi}{8000} D^2 \rho \sum_{i=1}^n V_i^3 \eta(V_i) t_i T \frac{S_T}{(20D)^2} \quad (2.7)$$

Відповідно до наведених рівнянь, найбільш точно кількість виробленої електроенергії за рік описує рівняння (2.7) адже воно враховує майже всі технічні особливості ВЕ.

Для забезпечення технічного потенціалу ВЕ та розміщення необхідної кількості установок на певній площі необхідно дещо модернізувати рівняння:

$$W_T = \frac{P_{\text{ср}}}{1000} T \frac{S_T}{100D^2} \quad (2.8)$$

$$W_T = \frac{\pi}{8000} D^2 \rho \sum_{i=1}^n V_i^3 \eta(V_i) t_i T \frac{S_T}{100D^2} \quad (2.9)$$

Основним недоліком даного розрахунку є відсутність можливості врахування потужності однієї установки, що не залежить від діаметру його вітроколеса.

Необхідно зазначити, що подібні особливості організації розміщення ВЕ на певній території не зовсім підходять для використання в умовах Сумської області. Основною особливістю є відсутність великої кількості установок при організації системи. При цьому зазвичай в області використовуються поодинокі випадки використання ВЕ, що позбавлені впливу з боку інших установок. Хоча враховуючи залежність ВЕ від різного роду перешкод потрібно враховувати взаємодію різного роду об'єктів. При цьому закони впливу на ВЕ залишаються таким ж. Відповідно до цього найбільш ефективним є шахове розміщення ВЕ з врахуванням різноманітних перешкод на території розміщення установки.

2.2 Аналіз особливостей розробки загальної системи електропостачання на основі ВЕ

Для організації загальної побудови електростанції на основі ВЕ, необхідною умовою є створення структурної схеми, що описує загальний вигляд всієї системи та взаємозв'язки з різними елементами. При цьому для умов Сумської області нами було розроблено структурну схему для забезпечення електропостачання об'єктів, що можна реалізувати для живлення об'єктів. Запропонована схема реалізації особливостей організації електропостачання в умовах Сумської області наведено в додатках до дипломної роботи.

Відповідно до розробленої схеми (додаток Б) ВЕ працює за наступним алгоритмом. Основні блоки ВЕ генерують електричну енергію, відповідно до їх обраної кількості. Далі електроенергія передається на загальну шину ВЕ через роз'єднувачі, що розроблені керованими.

За умови нормальної роботи загальної установки відбувається передача електроенергії до споживачів. В іншому випадку електроенергія не подається в електричну мережу. При цьому також відбувається процес заряджання акумуляторів, що проходить паралельно з основними процесами живлення споживачів.

Необхідно зазначити, що кількість установок ВЕ може мати змінний характер залежно від площі встановлення установок та їх основних параметрів.

Для регулювання основних показників роботи ВЕ на установці встановлено датчики контролю напруги, струму та відповідно контролю частоти електроенергії. При цьому також використовується датчик для вимірювання швидкості потоку вітру, що дозволяє синхронізувати основні особливості виробітку електроенергії. Синхронізація основних елементів системи відбувається через пристрої погодження.

В блоках проведення аналізу відбувається прорахунки основних даних, з яких подаються команди на блоки виконання регулювання. Відповідно дані блоки віддають сигнал на коригування сигналу. Коригування параметрів роботи ВЕ відбувається до моменту загальної нормалізації роботи установки.

У випадку виникнення аварійних ситуацій, відбувається відключення ВЕ, що дозволяє убезпечити саму установку та знизити негативний вплив на загальну мережу. Після усунення аварійного режиму відбувається повернення до нормальних режимів роботи установки і генерування електроенергії в нормальному режимі роботи.

Подібні станції електропостачання забезпечують максимально можливу безперебійність в електропостачанні а також необхідний рівень надійності загальної системи.

Всі особливості роботи подібними установками контролюються на загальному блоці керування станцією, що дозволяє керувати нею в автоматичному режимі чи навіть в ручному режимі роботи.

Основним недоліком реалізації подібних станцій в Сумській області є необхідність використання доволі великої протяжності кабельних ліній для реалізації роботи ВЕ. Відповідно до цього за рахунок високої розосередженості установок використання може вийти економічно не вигідним. Виходячи з цього необхідно дотримуватись оптимального балансу в організації подібних установок.

Вирішення подібних проблем може бути виконано з використанням розподільчих станцій, що мають в своїй структурі засоби для вирішення проблеми розосередження ВЕ. Дані установки оснащуються різного роду трансформаторами підсилення. Подібні станції контролюються на загальному пульті керування.

Необхідно враховувати, що дані особливості забезпечення ефективності роботи ВЕ призводять до значного збільшення вартості обладнання, а отже можуть виявитись економічно не вигідними для використання. Виходячи з цього необхідна комплексна оцінка всіх показників при виборі технічного рішення.

При роботі ВЕ утворюються певні перешкоди, що можуть сприяти погіршенню передачі сигналу, а отже для забезпечення коректної їх роботи необхідно використовувати окремі канали зв'язку.

2.3 Визначення основних алгоритмів забезпечення функціонування загальної системи керування ВЕ

Загалом ВЕ здатна працювати в доволі великій кількості режимів, що залежать від значної кількості параметрів. В більшості своїй основним режимом роботи установки є відповідно робота в локальному режимі, що характерна для умов Сумської області. При цьому ВЕ фактично повністю працює на забезпечення електроенергією конкретного споживача. За умови виникнення аварійних режимів установка може працювати в автономному режимі, з роботою ВЕ сама на себе та без виробітку значної кількості електроенергії.

Для прикладу нами наведено механізм виконання алгоритму роботи ВЕ в аварійному режимі. Даний алгоритм наведено на рисунку 2.4.

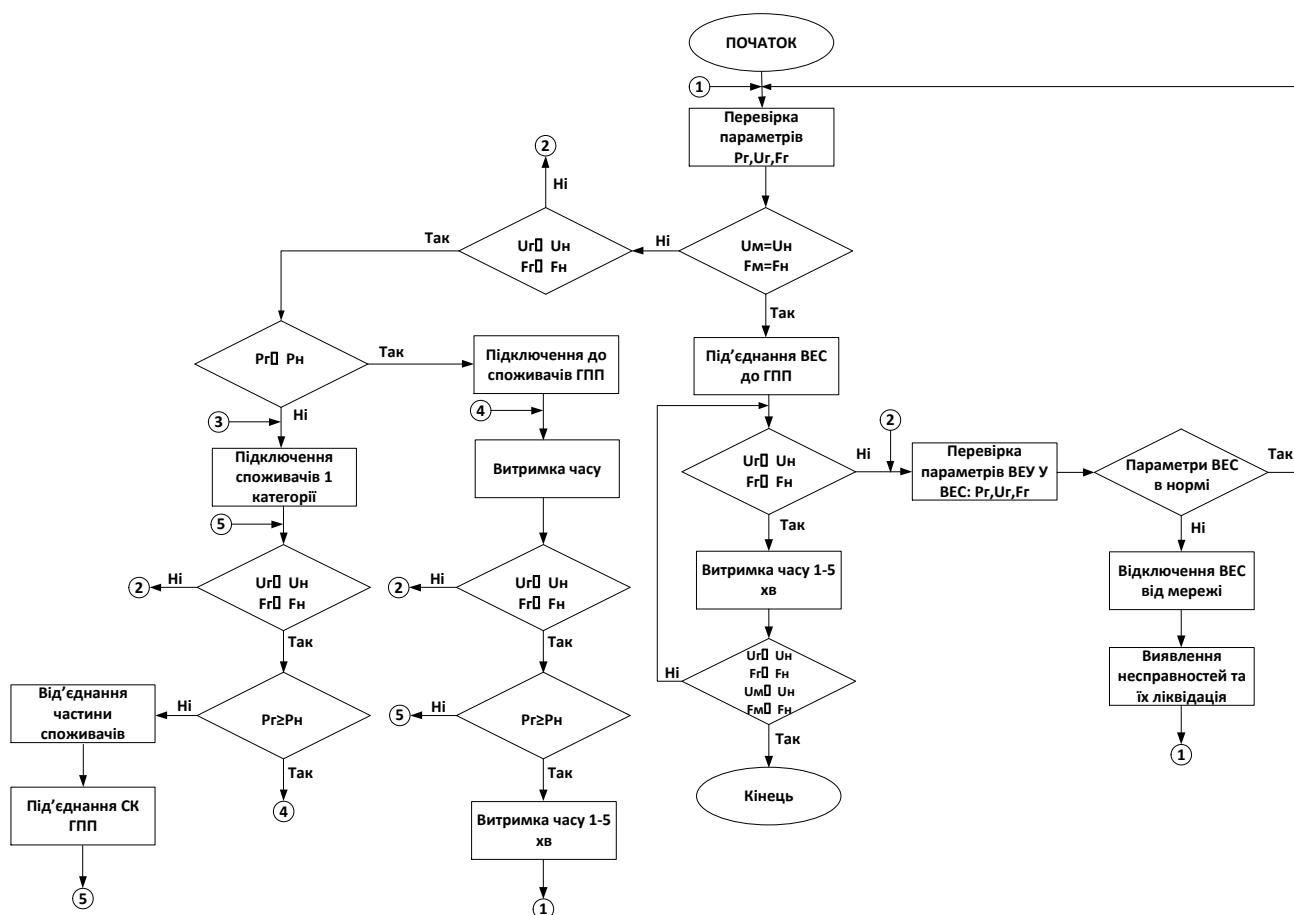


Рисунок 2.4 – Загальний алгоритм роботи ВЕ в аварійному режимі

Наведений на рисунку 2.4 алгоритм дозволяє забезпечувати функціонування системи керування ВЕ а також проводити основні операції самостійного тестування системи. При тестуванні виконується затримка 5 хв між

проведенням наступного тестування або повторення основного тестування роботи.

Після декількох тестувань та за умови відсутності нормалізації основних параметрів відбувається відключення ВЕ від електричної мережі. Подальше відновлення роботи установки можна виконати лише усунувши проблему вручну та запустити ВЕ в роботи. Після ручного запуску система також виконує тестування з подальшим виводом системи на нормальну роботу та подачею електроенергії в електричну мережу.

У випадку невідповідності параметрам та проходження нового циклу тестування роботи ВЕ, установка переходить в умови роботи в локальному режимі. При усуненні проблеми установка виходить на загальну мережу електропостачання.

За умови недостатнього генерування потужності відбувається також тестування роботи установки та система підключається автоматично до електричної мережі без участі установки ВЕ.

Висновки до розділу

Відповідно проведеного аналізу особливостей розміщення та визначення необхідної кількості установок можна сказати, що для умов Сумської області найбільш ефективно є шахове розміщення ВЕ, що дозволить також враховувати особливості впливу інших об'єктів на генерацію електричної енергії. При цьому генерація електроенергії установкою повністю буде залежати від ефективності самої установки ВЕ. Відповідно до цього рекомендовано використання в умовах Сумської області лише високопродуктивних установок здатних отримувати електроенергію при низьких швидкостях вітру. За умови використання декількох ВЕ та формуванням їх в загальну систему необхідно використовувати запропоновану блок-схему узгодження їх роботи між собою та з електричною мережею.

РОЗДІЛ 3. ПРОПОЗИЦІЇ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ВЕ ДЛЯ МОЖЛИВОГО ВИКОРИСТАННЯ В СУМСЬКІЙ ОБЛАСТІ

3.1 Особливості розрахунку ВЕ та вибір основного обладнання

Для реалізації ВЕ в умовах Сумської області, що характеризується низькою швидкістю вітру пропонується виконати вибір обладнання з максимально можливим виходом електроенергії, що буде продаватись в електричну мережу для живлення споживачів.

Виходячи з незначної швидкості вітру в області необхідною умовою є вибір більшої кількості ВЕ для забезпечення необхідних показників. Відповідно до цього пропонується до реалізації ВЕ загальною потужністю до 250 кВт. В якості електрообладнання пропонується обрати вітроенергетори типу Direct Wind 250 від фірми EWT. При цьому використання даних ВЕ може комбінуватись в залежності від необхідної кількості електроенергії. Технічні характеристики обраного ВЕ наведено в додатку В до роботи.

Необхідно зауважити, що дані вітрогенератори можуть ефективно працювати при мінімальних швидкостях вітру, що дає можливість використовувати їх в умовах подібних до умов Сумської області. Цей ефект досягається застосуванням систем керування кутом атаки лопаті до основного потоку вітру.

Для продовження аналізу пропонується навести графік зміни потужності установки в залежності від швидкості вітру, при цьому враховане максимально можливе значення швидкості для регіону. Дані наведено на рисунку 3.1.

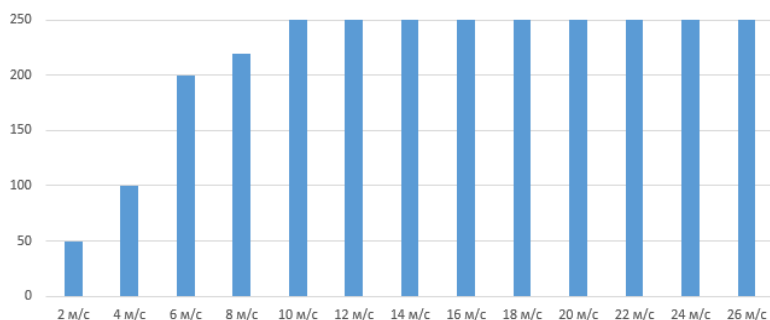


Рисунок 3.1 – Особливості зміни потужності обраної ВЕ в залежності від швидкості вітру

Відповідно до наведених даних бачимо, що вихід установки на повну потужність спостерігається вже при 10 м/с. При цьому в умовах низької швидкості потоку вітру ВЕ фактично здатна видавати 70 % потужності.

Наступним кроком в організації електропостачання від ВЕ є вибір необхідного трансформатора. Основна умова вибору трансформатора має наступний вигляд:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{\text{НОМ}} \quad (3.1)$$

де $S_{\text{НОМ}}$ – номінальне значення потужності необхідного трансформатора підстанції.

Відповідно до загальної потужності ВЕ (250 кВт) та з врахуванням значно менших показників виробітку обираємо трансформатор ТМ 250/6/0,4. Загальна технічна характеристика даного трансформатора наведена в таблиці додатку В.

Необхідно зазначити, що відповідно до розробленої блок-схеми в розділі 2, всі елементи та датчики контролю системи розміщуються в установці, а отже необхідною умовою є визначення місця розміщення блоку керування електростанцією. При цьому пропонується виконати його розміщення на відстані 100 м від ВЕ, що унеможливить вплив генераторного обладнання на систему обробки сигналів. Для забезпечення роботи загальної системи керування обираємо систему від компанії Simatic типу ET-200PRO. Дана система повністю задовольнить реалізацію програм керування ВЕ в заданих умовах з максимальною якістю виконання команд.

Вибір високовольтних вимикачів пропонується виконати з врахуванням максимально можливості потужності ВЕ. Вибір вимикачів виконується з розрахункових даних:

$$I_{\text{Н}} = \frac{S_{\text{Н}}}{U_{\text{Н}}} \quad (3.2)$$

де $S_{\text{Н}}$ – значення номінальної величини потужності ВЕ;

U_H – значення номінальної напруги ВЕ.

$$I_H = \frac{250}{6} = 42A$$

Відповідно до отриманих даних пропонується обрати вакуумні вимикачі типу ВРС-6-31,5/360. Загальна технічна характеристика яких наведена в таблиці додатку В.

Вибір вимикачів необхідно також провести і для кола що утворюється генератором та трансформатором ВЕ:

$$I_H = \frac{250}{0,4} = 625A$$

Відповідно до отриманих даних необхідно обрати вимикачі розраховані на дане значення, а отже пропонується обрати вимикачі типу ВВА-0,4-20. Загальна технічна характеристика даних вимикачів наведена в таблиці додатку В.

Також для ефективної роботи загальної системи необхідно обрати запобіжники. Відповідно запропонована ВЕ має фактично два кола, а отже виконаємо вибір:

- для кола від трансформатора ВЕ до трансформатора мережі обираємо запобіжник типу ПК012-6-40;

- для кола від генератора ВЕ до трансформатора обираємо запобіжник типу ПК012-0,4-100.

На даному етапі фактично виконано вибір всієї необхідної апаратури ВЕ, що дозволить забезпечити максимально надійну роботу установки.

Наступним кроком є вибір необхідних кабелів ВЕ. Відповідно до цього номінальне значення напруги в колі роботи генератора та трансформатора становить 380 В. Виходячи з цього використовуємо рівняння:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}\cos\varphi} \quad (3.3)$$

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,9} = 400\text{А}$$

Для вибору основного перерізу кабелів використовуємо формулу:

$$S = \frac{I_{\text{НОМ}}}{J_{\text{ЕК}}} \quad (3.4)$$

Величину $J_{\text{ЕК}}$ приймаємо рівну $1,7 \text{ А/мм}^2$. А отже:

$$S = \frac{400}{1,7} = 235\text{мм}^2$$

Для забезпечення ефективної роботи обираємо кабель перерізом дещо більшим від розрахованого значення. Обираємо трижильний кабель, що має переріз 285 мм^2 . Для даного перерізу підходить кабель АСБ 3×95 .

Загальне значення номінального струму в колі між двома трансформаторами складає 6 кВт , а отже:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,9} = 40,1\text{А}$$

$$S = \frac{40,1}{1,7} = 23,6\text{мм}^2$$

Відповідно до нормативних даних обираємо кабель, що має переріз 25 мм^2 , а саме АСБ-1 3×25 .

3.2 Аналіз прогнозування виробітку електроенергії запропонованою установкою ВЕ

Для виконання прогнозування виробітку електроенергії ВЕ застосовують різноманітні математичні параметри проведення оптимізації загальної системи. При цьому необхідно враховувати, що жоден з них не дає достатньої точності та достовірності результатів.

В енергетиці доволі часто використовують модель проведення аналізу запропоновану Боксом-Дженкінсом, що описується загальним рівнянням:

$$ARIMA(p, d, q) \cdot (P_s, D_s, Q_s)s \quad (3.5)$$

де p – значення складової порядку регресії;

d – порядок похідної дискретного типу;

q – порядок середнього значення змінного параметру;

P_s – порядок врахування сезонності величини авторегресії;

D_s – порядок врахування сезонності величини регресії;

Q_s – порядок середнього сезонного значення змінного параметру;

s – параметри сезонності різних періодів.

Першочергово проводять визначення сезонності для аналізу виробітку електроенергії, а далі виконують врахування особливостей їх рядів. Подальше моделювання дозволяє отримати ряд, що має вигляд:

$$\Delta Y_t = \Delta^d Y_t + \Delta^{D_s} Y_t \quad (3.6)$$

$$\Delta^d Y_t = a_1 Y_{t-1} + \dots + a_p Y_{t-p} + \varepsilon_t - \beta_1 \cdot \varepsilon_{t-1} - \dots - \beta_q \cdot \varepsilon_{t-q} - 1 \quad (3.7)$$

де $\Delta^d Y_t$ – складова частина врахування не сезонності ряду p, d, q ;

β – характеристика ряду помилок;

$\Delta^{D_s} Y_t$ – сезонна складова ряду P_s, D_s, Q_s .

Повернення до вихідного ряду з врахуванням особливостей тимчасовості потрібно використати рівняння:

$$Y_t = Y_{t-1} + Y_t \quad (3.9)$$

Доволі часто застосовують рівняння, що дозволяє виконати експоненціальне вирівнювання, що має вигляд:

$$S_t = a \cdot \gamma_t + (1 - a)S_{t+1} \quad (3.10)$$

де t – задане значення періоду аналізу;

$t + 1$ – прогнозоване значення періоду;

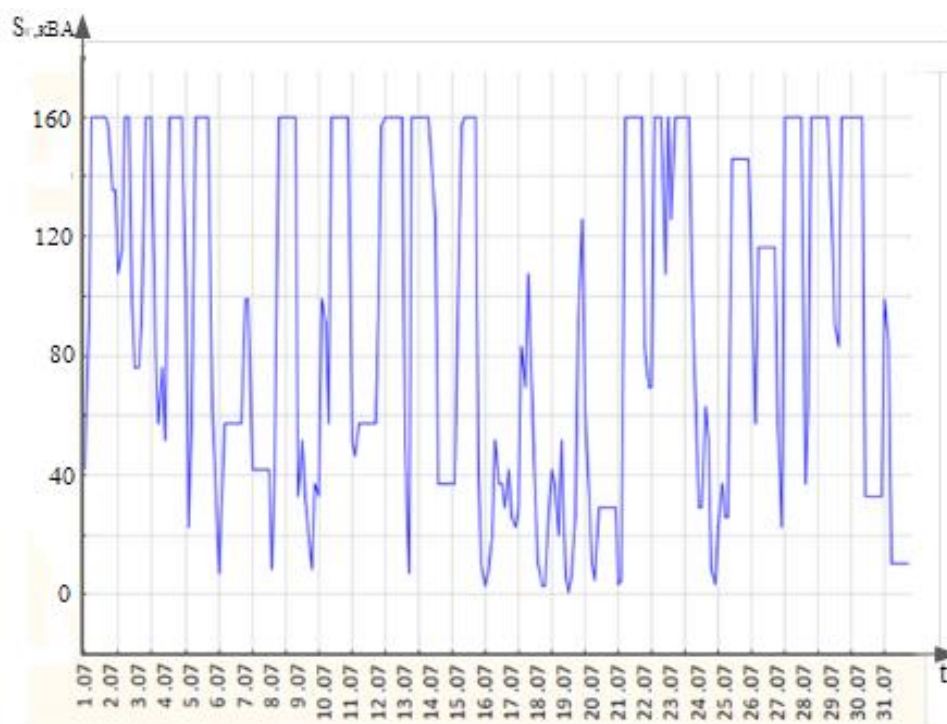
S_{t+1} – показник для задання основного значення прогнозу;

a – коефіцієнт проведення вирівнювання;

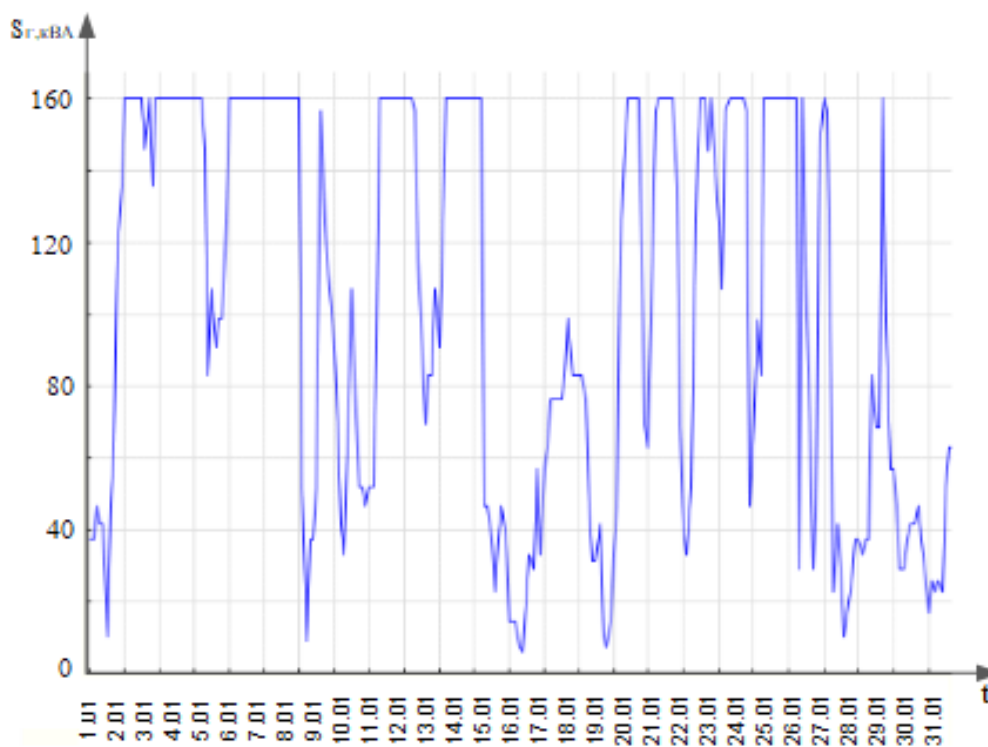
γ_t – необхідний показник проведення прогнозування.

Відповідно для проведення аналізу особливостей за даним показників швидкості вітру та показників роботи основного обладнання ВЕ було проведено моделювання особливостей виробітку електроенергії загальною установкою ВЕ.

Моделювання виконувалось з використанням програмного комплексу моделювання Statistica. Використовувались два основні місяці (липень та січень). На основі отриманих даних побудовано відповідні графіки виробітку електроенергії (рис. 3.2).



а



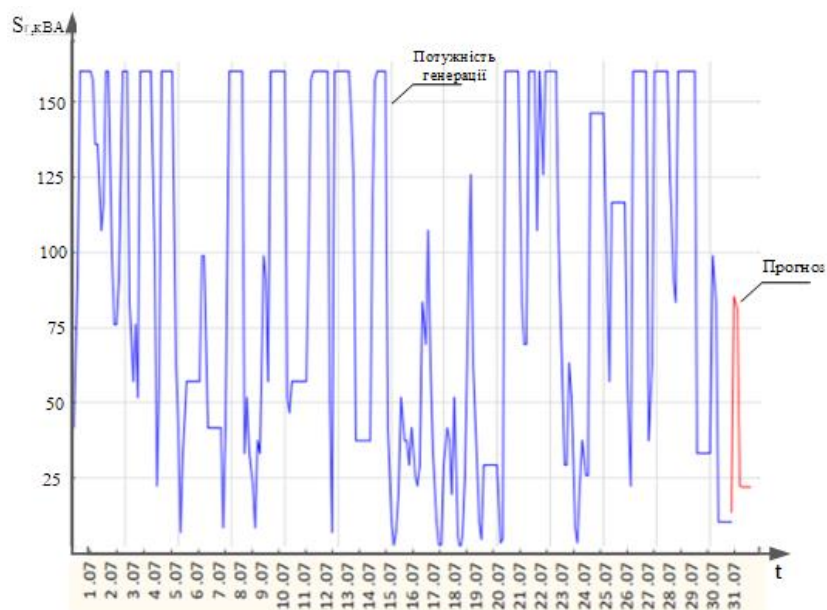
б

а – виробіток електроенергії в липні

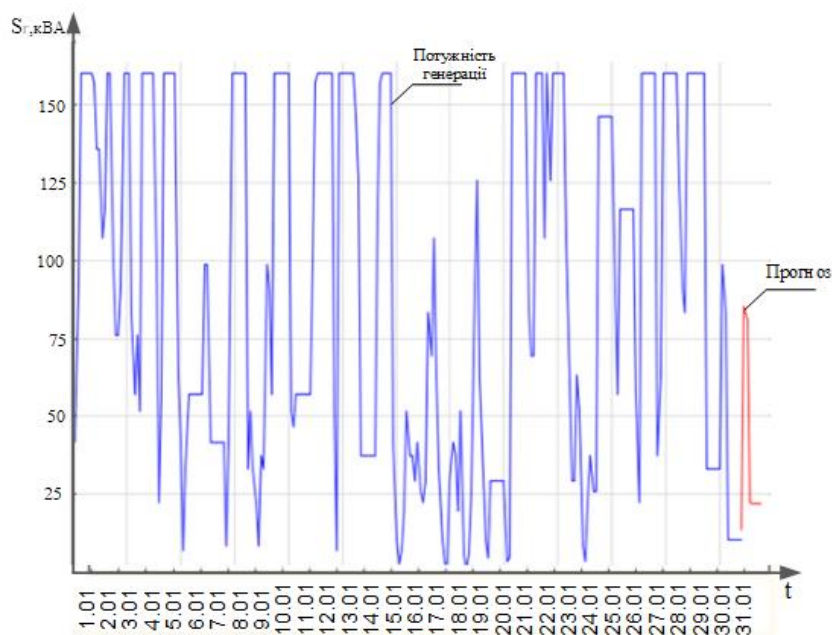
б – виробіток електроенергії в січні

Рисунок 3.2 - Графіки фактичного виробітку електроенергії

При проведенні прогнозування виробітку електроенергії для Сумської області пропонується також застосувати модель авторегресії за ці ж місяці проведення попереднього аналізу. Отримані дані наведені на рисунку 3.3.



а



б

а – прогнозування виробітку електроенергії в липні;

б – прогнозування виробітку електроенергії в січні.

Рисунок 3.3 – Особливості прогнозованого виробітку електроенергії ВЕ

Отримані дані моделювання ВЕ різними способами дають дещо різні результати. При цьому прогнозований виробіток електроенергії в літні та в зимові місяці фактично є однаковим.

Також відповідно до отриманих графіків спостерігається значне коливання генерації протягом місяця, що пояснюється значною нестабільністю потоків вітру в Сумській області. Отримані піки показують певну кількість днів, що мають максимально можливу швидкість вітру. При цьому необхідно зауважити, що жоден порив вітру не здатен дати максимальне значення роботи ВЕ, а отже установка працює не на повну потужність, що і пояснює знижену ефективність потоків вітру відповідно до проведеного аналізу в першому розділі.

Висновки до розділу

Проведений аналіз та вибір обладнання для побудови ВЕ на території Сумської області дає можливість спроектувати провести моделювання загальної системи. При цьому в моделі враховано всі можливі особливості, що дозволяють врахувати ефективність потоків вітру та технічний потенціал ВЕ.

В результаті обраної установки та подальшого моделювання виробітку електроенергії, досягти максимального значення не вдалось. В першу чергу це пояснюється низьким потенціалом потоків вітру регіону. Але в загальному випадку запропонована ВЕ показує доволі гарні результати та може бути реалізована на території області.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Використання вітроустановок має певний ряд значних небезпек, що пов'язані з великою кількістю рухомих частин, шумом, вібрацією, електромагнітним полем, різними струмами та іншими небезпеками. Відповідно до цього маємо обмеження в використанні їх поблизу житлових та промислових зон.

Враховуючи доволі велику кількість небезпек ефективного використання ВЕ можливе лише з дотриманням всіх санітарних норм та норм охорони праці. При цьому роботи на ВЕ станціях мають ряд небезпек для людини, що пов'язані з виконанням робіт на значній висоті, роботи з електроустановками високого значення напруги. Іншою проблемою є роботи в обмеженому та замкненому просторі щогли та вітроустановки.

Відповідно до цього при проведенні робіт на ВЕ необхідне обов'язкове використання систем для страхування. Це є першочерговим заходом роботи. При цьому заборонено виконувати роботи з працюючою ВЕ, а отже першочергово її необхідно зупинити і вже потім приступати до проведення всіх необхідних робіт.

При роботі з електрообладнанням необхідною умовою є наявність відповідної групи допуску з електробезпеки. Також при виконанні робіт необхідно використовувати ЗІЗ та спецодяг. Все спеціальне обладнання, що необхідне для роботи з високою напругою повинно бути сертифікованим та перевіреном.

Для забезпечення необхідного рівня пожежогасіння, кожен з елементів ВЕ повинен бути забезпечений необхідними засобами пожежогасіння (вогнегасниками).

З точки зору безпеки переміщення по основним елементам ВЕ використовуються стаціонарні драбини, що повинні періодично проходити перевірку. Всі огороження також повинні бути повністю справними.

При проведенні робіт на ВЕ обов'язковим елементом ЗІЗ є використання навушників для захисту від шуму та вібрації, а також використання спеціальних рукавичок та інших ЗІЗ.

Найбільшій небезпеці підлягають працівники, що проводять огляди лопатей ВЕ. При цьому весь персонал повинен пройти спеціальне навчання, мати відповідні підтверджуючі документи та повинні мати допуски до роботи на висоті. Також ці працівники повинні пройти підготовку з надання першої медичної допомоги при проведенні робіт на висоті. Також всі працівники, що задіяні в обслуговуванні ВЕ повинні періодично проходити медичні огляди та мати документи, що підтверджують придатність їх до виконання робіт.

У випадку приватного використання ВЕ до проведення робіт на електроустановці наймаються спеціальні бригади працівників. При цьому всі вимоги до них такі ж, як описано вище.

ВЕ складається не лише з вітроустановки. Як зазначалось вище для ефективної роботи ВЕ необхідне використання різних трансформаторів. Необхідно зазначити, що за умови підключення ВЕ до централізованої мережі електропостачання дані трансформатори належать саме розподільчим компаніям, і вони вже виконують їх обслуговування.

Пропонується також навести основні заходи з охорони праці для проведення робіт з трансформаторами. Першочергово всі роботи проводяться з видачою наряду-допуску. Де вказуються склад бригади та перелік необхідних робіт для виконання.

Обов'язково перед початком проведення робіт обов'язково проводять інструктаж з техніки безпеки та електробезпеки проведення робіт.

При проведенні робіт обов'язково проводять зняття напруги з основного обладнання. Наступним кроком проводять заземлення обладнання і вже потім виконують всі роботи. Виконання всіх робіт обов'язково проводиться при знеструмлених установках.

При обслуговуванні трансформаторів доволі складним процесом є заміна оливи. При цьому всі операції проводяться з використанням ЗІЗ, таких, як рукавички, окуляри та спецодяг.

Також проведення даних робіт чітко контролюється та забезпечується необхідними засобами пожежогасіння.

Висновки до розділу

Виконання робіт в електроустановках в тому числі і ВЕ потребує значної уваги з точки зору охорони праці оскільки дані процеси мають доволі велику кількість небезпечних факторів та процесів. При цьому виконання заходів з охорони праці є обов'язковим та дозволить забезпечити гарний її рівень та відсутність травматизмі і летальних наслідків.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Економічну оцінку проведемо з визначенням особливостей витрат на експлуатацію ВЕ, що запропонована до реалізації. Загалом даний тип витрат розраховують з рівняння:

$$E_{BE} = A_0 + P_{TO} + P_p \quad (5.1)$$

де A_0 – значення відрахувань витрачених на амортизацію, грн

P_{TO} – затрати пов'язані з проведенням ремонтів та технічного обслуговування ВЕ, грн;

P_p – різні витрати на інші заходи, грн.

Витрати на проведення амортизації визначаються з рівняння:

$$A_0 = K_B \frac{a}{100} \quad (5.2)$$

де a – нормативне значення відрахування на амортизацію;

Витрати на проведення операцій з ремонту чи технічного обслуговування визначаються з виразу:

$$P_{TO} = K_B \frac{Z}{100} \quad (5.3)$$

де Z – нормативна величина відрахувань на проведення ремонту та ТО.

Відповідно до даних компанії вартість всіх експлуатаційних витрат становить станом на 2025 рік:

$$E_{BE} = 354653764 \text{ грн}$$

Також необхідно виконати розрахунок втрат електроенергії в обраних трансформаторах. Розрахунок виконують відповідно до рівнянь:

$$P_T = P_{xx} T_\Gamma + P_{кз} k_3^2 \tau \quad (5.4)$$

$$Q_T = Q_{xx} T_\Gamma + Q_{кз} k_3^2 \tau \quad (5.5)$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \quad (5.6)$$

Для розрахунку необхідно визначити втрати реактивної величини потужності, при роботі трансформатора на холостому ході:

$$\Delta Q_{xx} = S_H \frac{I_{xx}}{100} \quad (5.7)$$

$$\Delta Q_{xx} = 250 \frac{1,3}{100} = 3,25 \text{кВАр}$$

$$\Delta Q_{кз} = S_H \frac{U_{кз}}{100} \quad (5.8)$$

$$\Delta Q_{кз} = 250 \frac{5,5}{100} = 13,75 \text{кВАр}$$

$$\Delta P_T = 2,05 \cdot 7008 + 18 \cdot 0,72^2 \cdot 3000 = 44,4 \text{МВт} \cdot \text{рік}$$

$$\Delta Q_T = 16 \cdot 7008 + 104 \cdot 0,72^2 \cdot 3000 = 307,5 \text{МВА} \cdot \text{рік}$$

$$\Delta S_T = \sqrt{44,4^2 + 307,5^2} = 310,7 \text{МВА} \cdot \text{рік}$$

Доцільність побудови ВЕ оцінюється терміном окупності витрачених капіталовкладень в реалізацію проекту.

Першочергово необхідно розрахувати економічний ефект ВЕ за річний період:

$$E = P_p - (E_a + E_p) \cdot K_3 \quad (5.9)$$

де P_p – значення річного прибутку від реалізації ВЕ, грн;

E_a – загальні втрати на виконання амортизації, обираємо 10 %;

E_p – загальні втрати пов'язані з проведенням ремонту, обираємо 15 %;

K_3 – початкове значення капіталовкладень в реалізацію ВЕ, грн.

Економія коштів через використання ВЕ за рахунок електроенергії, що генерується нею в річний період:

$$P_p = (N_{BE} \cdot C_{ee}) - E_{BE} \quad (5.10)$$

де N_{BE} – вироблена річна потужність ВЕ, кВт;

C_{ee} – ціна 1 кВт потужності, що становить 11,9 грн/кВт·год.

$$P_p = (9887341 \cdot 11,9) - 22500 = 117636858 \text{ грн}$$

$$E = 117636858 - (0,1 + 0,15) \cdot 354657264 = 28972542 \text{ грн}$$

Для визначення терміну окупності необхідно використати рівняння:

$$T_o = \frac{K_3}{E} \quad (5.11)$$

$$T_o = \frac{354657264}{28972542} = 12,2 \text{ роки}$$

Термін окупності більше 12 років визначається пониженим значенням виробітку електроенергії ВЕ. Відповідно до цього для Сумської області даний показник є доволі прийнятним.

Висновки до розділу

Проведений економічний аналіз підтверджує ефективність застосування ВЕ в умовах Сумської області. При цьому термін окупності становить більше 12 років, що пов'язано зі зменшеним виробітком електроенергії ВЕ, а отже є допустимим для реалізації подібного проекту.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Вітроенергетика є доволі перспективним напрямком виробництва електроенергії як в Україні так і в межах Сумської області. При цьому необхідною умовою є особливість ефективного використання потужності потоків вітру. При цьому найбільшу ефективність для Сумської області та відповідно найбільший потенціал мають саме ВЕ з малою потужністю. Використання великих ВЕУ на території області не має значної ефективності. При цьому підключення всіх типів ВЕ до мережі виконується з використанням проаналізованих технічних рішень.

2. Відповідно проведеного аналізу особливостей розміщення та визначення необхідної кількості установок можна сказати, що для умов Сумської області найбільш ефективно є шахове розміщення ВЕ, що дозволить також враховувати особливості впливу інших об'єктів на генерацію електричної енергії. При цьому генерація електроенергії установкою повністю буде залежати від ефективності самої установки ВЕ. Відповідно до цього рекомендовано використання в умовах Сумської області лише високопродуктивних установок здатних отримувати електроенергію при низьких швидкостях вітру. За умови використання декількох ВЕ та формуванням їх в загальну систему необхідно використовувати запропоновану блок-схему узгодження їх роботи між собою та з електричною мережею.

3. Проведений аналіз та вибір обладнання для побудови ВЕ на території Сумської області дає можливість спроектувати провести моделювання загальної системи. При цьому в моделі враховано всі можливі особливості, що дозволяють врахувати ефективність потоків вітру та технічний потенціал ВЕ.

В результаті обраної установки та подальшого моделювання виробітку електроенергії, досягти максимального значення не вдалось. В першу чергу це пояснюється низьким потенціалом потоків вітру регіону. Але в загальному випадку запропонована ВЕ показує доволі гарні результати та може бути реалізована на території області.

4. Виконання робіт в електроустановках в тому числі і ВЕ потребує значної уваги з точки зору охорони праці оскільки дані процеси мають доволі велику кількість небезпечних факторів та процесів. При цьому виконання заходів з охорони праці є обов'язковим та дозволить забезпечити гарний її рівень та відсутність травматизмі і летальних наслідків.

5. Проведений економічний аналіз підтверджує ефективність застосування ВЕ в умовах Сумської області. При цьому термін окупності становить більше 12 років, що пов'язано зі зменшенням виробітком електроенергії ВЕ, а отже є допустимим для реалізації подібного проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кудря С. О., Яценко О. М. Енергетика України: перспективи розвитку та інтеграції відновлюваних джерел. Київ : Наукова думка, 2023. 320 с.
2. Селіванов О. С., Іванов С. В. Оптимізація роботи вітроенергетичних установок в умовах нестабільного вітрового режиму. Харків : ФОП Панов А. М., 2022. 250 с.
3. Голодний О. Я., Марченко О. О. Моделювання та прогнозування генерації енергії вітровими електростанціями. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. 180 с.
4. Васильєв В. Г. Економічні та екологічні аспекти розвитку вітроенергетики в Україні. Одеса : Астропринт, 2020. 215 с.
5. Степура В. М., Мельник Р. А. Системи керування вітротурбінами: сучасні підходи та алгоритми. Київ : НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2024. 290 с.
6. Криворучко В. В. Підвищення ефективності експлуатації вітрових електростанцій шляхом впровадження систем накопичення енергії. Полтава : РВВ ПДАА, 2019. 165 с.
7. Коваленко О. І. Інтеграція вітрової генерації в об'єднану енергетичну систему України. Дніпро : Наука і освіта, 2023. 270 с.
8. Павленко Д. С., Петренко А. В. Аналіз вітрового потенціалу регіонів України для промислової вітроенергетики. Суми : Сумський державний університет, 2022. 140 с.
9. Бойко Л. М. Особливості проектування та підключення вітроелектростанцій до розподільчих мереж. Вінниця : ВНТУ, 2021. 195 с.
10. Захарченко Т. Г. Вплив вітроенергетики на стабільність енергосистеми: український контекст. Київ : Знання України, 2020. 245 с.
11. Semenov, A., & Vorobyova, E. Optimal Placement and Control of Wind Farms in Weak Grids: A Case Study of the Ukrainian Energy System. Energy Systems Research Journal. 2024. Vol. 12, No. 3. P. 45–60.

12. Burlaka, O., & Kovalenko, M. Enhancing the Efficiency of Wind Turbine Performance using Predictive Maintenance based on Neural Networks. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 650–662.

13. Zubko, S., & Polishchuk, V. The Role of Wind Energy in Decarbonization of the Ukrainian Power Sector: Challenges and Prospects. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29, No. 15. P. 21950–21965.

14. Yermolenko, I., & Tkachenko, P. Techno-Economic Assessment of Small-Scale Wind Turbines for Rural Electrification in Ukraine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 45. Article 101168.

15. Popov, R., & Sidorenko, N. Impact of Wind Power Variability on Grid Stability: Adaptive Control Strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 132. Article 110190.

16. Kostenko, D., & Lyubymov, S. Forecasting Wind Power Generation Using Machine Learning Techniques: A Comparative Analysis for Eastern Europe. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 430. Article 139598.

17. Melnyk, V., & Fomenko, A. Development of High-Efficiency Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Energy Converters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023. Vol. 38, No. 1. P. 350–360.

18. Gerasymov, Y. Challenges of Grid Integration of Large-Scale Wind Farms in Post-Soviet Countries: The Ukrainian Example. *Energy Policy*. 2021. Vol. 150. Article 112101.

19. Savchenko, M., & Kostiuk, V. Improving Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithms for Variable Speed Wind Turbines. *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 182. Article 106263.

20. Andriychuk, B., & Shulha, O. Offshore Wind Energy Potential Assessment in the Black Sea Area of Ukraine. *Energies*. 2019. Vol. 12, No. 19. P. 3770.

21. Горбатюк С. М. Аналіз сучасних методів прогнозування виробітку вітроелектричної станції з використанням нейронних мереж. *Технічні вісті*. 2024. № 1 (68). С. 112–119.

22. Кравченко І. В. Оцінка економічної ефективності впровадження вітроенергетичних проектів у Сумській області. Економіка та управління національним господарством. 2023. № 2. С. 45–53.

23. Михайленко О. Р. Вплив технічного стану механічної частини вітрогенератора на загальний ККД установки. Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Технічні науки. 2022. Вип. 128. С. 98–105.

24. Свиридов П. Л., Назаренко А. Б. Дослідження режимів роботи приводу вітроелектроустановки при змінних вітрових навантаженнях. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження. 2021. № 3. С. 77–84.

25. Панасюк Л. П. Оптимальний вибір потужності вітроелектроустановки для малих сільськогосподарських підприємств України. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Технічні науки. 2020. № 322. С. 138–145.

26. Демченко В. О. Інтеграція вітроенергетичних установок у локальні електричні мережі: питання якості електроенергії. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 1. С. 25–34.

27. Гусак В. В., Романенко М. І. Аналіз та моделювання вітрового потенціалу Східного регіону України. Збірник наукових праць НТУ. 2023. Вип. 2 (67). С. 55–62.

28. Лисенко В. П. Автоматизація системи керування вітрогенератором на базі мікроконтролерних систем. Електромеханічні та енергозберігаючі системи. 2022. Вип. 2 (19). С. 19–26.

ДОДАТКИ

Додаток А

Додаткові данні для проведення розрахунків

Таблиця А.1 – Степеневий показник k для різних класів шорсткості

| Клас шорсткості | Характеристика ландшафту | Степеневий показник (k) |
|-----------------|--|-------------------------|
| 0 | Водяна поверхня | 0,0 |
| 0,5 | Повністю відкритий ландшафт з м'якою поверхнею типу злітно-посадкових полос, скошеною травою і т. п. | 0,12 |
| 1,0 | Відкриті сільськогосподарські землі з поодинокими спорудами | 0,245 |
| 1,5 | Сільськогосподарські землі з окремими будинками і 8-ми метровими огорожами на відстані 1250 м | 0,275 |
| 2,0 | Сільськогосподарські землі з окремими будинками і 8-ми метровими огорожами на відстані » 500 м | 0,30 |
| 2,5 | Сільськогосподарські землі з групами будинків і 8-ми метровими огорожами на відстані » 250 м | 0,335 |
| 3,0 | Села, малі міста, сільськогосподарські землі з окремими будинками і високими огорожами, лісом і різко пересіченою місцевістю | 0,37 |
| 3,5 | Великі міста з великими будинками | 0,405 |
| 4,0 | Дуже великі міста з високими будинками і хмарочосами | 0,44 |

Структурна схема ВЕ

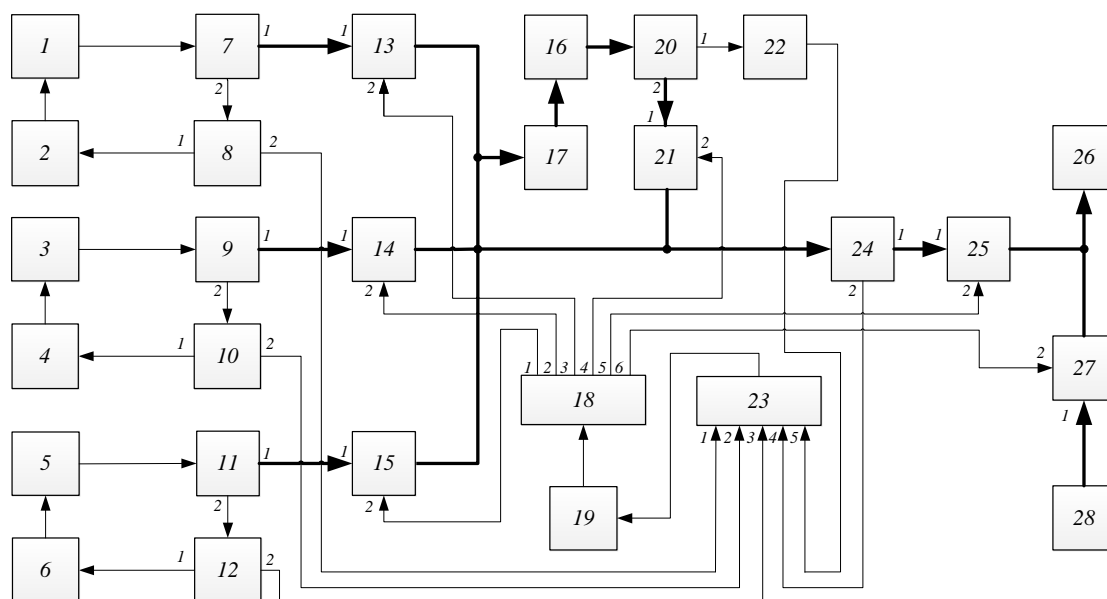


Рисунок Б.1 – Структурна схема електротехнічного комплексу електропостачання з використанням ВЕС:

1 – блок системи управління першої вітроелектричної установки; 2 – перший погоджуючий пристрій; 3 – блок системи управління другої вітроелектричної установки; 4 – другий погоджуючий пристрій; 5 – блок системи управління третьої вітроелектричної установки; 6 – третій погоджуючий пристрій; 7 – перша вітроелектрична установка; 8 – перший блок датчиків; 9 – друга вітроелектрична установка; 10 – другий блок датчиків; 11 – третя вітроелектрична установка; 12 – третій блок датчиків; 13 – перший керований роз'єднувач; 14 – другий керований роз'єднувач; 15 – третій керований роз'єднувач; 16 – зарядний пристрій; 17 – випрямляч; 18 – погоджуючий пристрій виводу; 19 – електронно-обчислювальна машина; 20 – акумуляторні батареї; 21 – інвертор; 22 – датчик рівня заряду; 23 – погоджуючий пристрій вводу; 24 – четвертий блок датчиків; 25 – керований роз'єднувач підключення навантаження; 26 – навантаження; 27 – керований роз'єднувач підключення мережі; 28 – мережа.

Додаток В

Технічні характеристики обладнання

Таблиця В.1 – Технічні параметри вітрогенераторів EWT DirectWind 250

| Показник | Значення |
|----------------------------------|----------|
| Номінальна потужність, кВт | 250 |
| Діаметр ротора, м | 54 |
| Омахувана площа, м ² | 2291 |
| Кількість лопатей | 3 |
| Початкова швидкість вітру, м/с | 2,5 |
| Номінальна швидкість вітру, м/с | 9 |
| Максимальна швидкість вітру, м/с | 25 |
| Максимальна висота башти, м | 75 |

Таблиця В.2 – Технічна характеристика трансформатора ТМ-250 6/0,4

| Показник | Значення | |
|----------------------------|---|-------|
| Номінальна потужність, кВт | ТМ-250 | |
| Напруга, кВт | ВН | 6; 10 |
| | ПН | 0,4 |
| Група з'єднань обмоток | У/У _Н -0 У/З _Н -11 Д/У _Н -11 | |
| Втрати, Вт | ХХ | 650 |
| | КЗ | 3100 |
| Струм ХХ, % | 2,3 | |
| Напруга КЗ, % | 4,5 | |
| Габарити, мм | 1550×950×1680 | |
| Маса, кг | 1500 | |

Таблиця В.3 – Технічні параметри обраного вимикача ВРС

| Показник | Значення |
|--|----------|
| Параметри напруги, кВ | 10 (6) |
| Параметри струму, А | до 630 |
| Параметр струму відключення (номінальне значення), А | до 32 |
| Параметр струму термічна стійкість, кА | 31,5 |
| Повний час відключення, мс | 70 |
| Власний час включення, мс | 120 |
| Власний час відключення, мс | 35-55 |

Таблиця В.4 – Технічні параметри обраних вимикачів ВВА

| Показник | Значення |
|-----------------------------------|----------|
| Номінальна напруга, кВ | 0,4 |
| Номінальний струм, А | 1000 |
| Номінальний струм відключення, кА | 20 |
| Власний час включення, мс | 60 |
| Власний час відключення, мс | 40 |