

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ
УСТАНОВКИ»**

Виконав: студент 6-го курсу

групи Ен-61 із спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

Ониськів Т. М.

Керівник: _____ к.т.н., доцент Кригуль Р. Є.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2025

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.

(вч. звання, прізвище, ініціали)

" ____ " _____ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ониськіву Тарасу Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження комбінованої системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

керівник роботи: к.т.н., доцент Кригуль Р. Є.

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

затверджені наказом Львівського національного університету природокористування №140 к-с від 28.02.2025 р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 05.12.2025 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 енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

4.2. Розрахунок системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

4.3 Розробка системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

4.4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

4.5. Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної 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: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної установки</i>	28.02.2025 – 22.09.2025	
2	<i>Розрахунок системи електропостачання на основі вітроелектричної установки</i>	23.09.2025 – 29.09.2025	
3	<i>Розробка системи електропостачання на основі вітроелектричної установки</i>	03.10.2025 – 13.10.2025	
4	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	14.10.2025 – 24.10.2025	
5	<i>Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності функціонування системи електропостачання на основі вітроелектричної установки</i>	27.10.2025 – 07.11.2025	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	10.11.25 – 17.11.25	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	21.11.25 – 05.12.25	

Студент _____ Тарас ОНИСЬКІВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Роман КРИГУЛЬ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Ониськів Т. М. «Дослідження комбінованої системи електропостачання на основі вітроелектричної установки». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2026 р. 53 с. текстової частини, 15 таблиць, 16 рисунків, 20 джерел посилання.

Сучасне енергетичне господарство стикається з проблемою виснаження традиційних джерел енергії та необхідністю зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Відновлювані джерела енергії, зокрема вітрова енергетика, є перспективним напрямом для забезпечення стабільного та екологічно чистого електропостачання.

Вітроелектричні установки (ВЕУ) дозволяють перетворювати енергію вітру на електричну без шкідливих викидів. Продуктивність ВЕУ залежить від швидкості та стабільності вітру, що створює коливання у виробленні електроенергії. Для підвищення надійності та стабільності електропостачання доцільно застосовувати комбіновані системи, які поєднують вітрові установки з іншими джерелами або системами накопичення енергії.

У роботі проведено дослідження ефективності функціонування комбінованої системи електропостачання на основі вітроелектричної установки. Виконано аналіз основних компонентів системи, проведено розрахунок енергоефективності та визначено фактори, що впливають на вироблення електроенергії.

ВІТРОЕЛЕКТРИЧНА УСТАНОВКА, КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ВИКОРИСТАННЯ ПОТУЖНОСТІ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	9
1.1 Аналіз роботи комбінованої системи електропостачання на основі вітроелектричної установки.....	9
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	12
2.1 Моделювання режимів роботи вітрових енергетичних установок у гібридних системах електропостачання.....	12
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	23
3.1 Аналіз конструкцій вітроелектричних установок для гібридної сонячно-вітрової енергосистеми.....	23
3.2 Вибір матеріалів конструкцій вітроелектричних установок для гібридної сонячно-вітрової енергосистеми.....	25
3.3 Результати вимірювання вологості ґрунту під час експерименту.....	41
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	43
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	43
4.2 Протипожежна безпека і грозозахист.....	44
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ	

	ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	45
5.1	Розрахунок економічної ефективності вітроелектричної установки (ВЕУ).....	45
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	49
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ.....	51

ВСТУП

Сучасне енергетичне господарство стикається з проблемою виснаження традиційних джерел енергії та необхідністю зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Відновлювані джерела енергії, зокрема вітрова енергетика, є перспективним напрямом для забезпечення стабільного та екологічно чистого електропостачання.

Вітроелектричні установки (ВЕУ) дозволяють перетворювати енергію вітру на електричну без шкідливих викидів. Продуктивність ВЕУ залежить від швидкості та стабільності вітру, що створює коливання у виробленні електроенергії. Для підвищення надійності та стабільності електропостачання доцільно застосовувати комбіновані системи, які поєднують вітрові установки з іншими джерелами або системами накопичення енергії.

Тому, дослідження ефективності функціонування комбінованої системи електропостачання на основі ВЕУ, оцінка її енергетичних показників та розробка рекомендацій щодо підвищення енергоефективності. У роботі передбачено аналіз компонентів системи, моделювання роботи при різних умовах вітру та оцінку енергоефективності.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації роботи вітрових установок, підвищення стабільності електропостачання та розвитку ефективних комбінованих систем відновлюваної енергетики.

Метою кваліфікаційної роботи є проведення дослідження ефективності функціонування комбінованої системи електропостачання з використанням вітроелектричної установки, оцінка її енергетичних показників, визначення факторів, що впливають на вироблення електроенергії, та розробка рекомендацій щодо підвищення енергоефективності системи.

Для досягнення цієї мети було визначено наступні завдання:

Провести аналіз принципів роботи вітроелектричних установок та їх основних компонентів.

Розробити структурну схему комбінованої системи електропостачання на основі ВЕУ.

Визначити та оцінити основні параметри енергоефективності системи (ККД, коефіцієнт використання потужності, втрати електроенергії).

Провести математичне та експериментальне моделювання роботи системи при різних умовах вітру.

Проаналізувати фактори, що впливають на стабільність та ефективність вироблення електроенергії.

Розробити рекомендації щодо оптимізації роботи системи та підвищення її енергоефективності.

Об’єктом кваліфікаційної роботи є комбіновані системи електропостачання з використанням вітроелектричної установки.

Предметом кваліфікаційної роботи є комбіновані системи електропостачання з використанням вітроелектричних установок різного типу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

1.1 Аналіз роботи комбінованої системи електропостачання на основі вітроелектричної установки

Зростання енергетичних потреб у сучасних умовах та одночасне прагнення зменшити вплив на навколишнє середовище обумовлюють необхідність використання відновлюваних джерел енергії. Вітроенергетика є одним із найперспективніших напрямів, оскільки вітер є доступним, поновлюваним та екологічно чистим джерелом енергії.

Комбіновані системи електропостачання, що інтегрують вітрові установки з іншими джерелами (сонячними батареями, дизель-генераторами або акумуляторними батареями), дозволяють забезпечити стабільність енергопостачання навіть за нестабільних погодних умов.

Структура комбінованої системи

Комбінована система електропостачання на основі вітроелектричної установки (ВЕУ) складається з таких основних компонентів:

1. Вітротурбіна – генерує електроенергію при наявності вітру.
2. Акумуляторна батарея – накопичує електроенергію для подальшого використання в періоди низької вітрової активності.
3. Контролер заряду/системи управління – регулює процес заряджання акумулятора та розподіл електроенергії між споживачами.
4. Додаткове джерело енергії (опційно) – наприклад, сонячна батарея або дизель-генератор для резервного живлення.
5. Інвертор – перетворює постійний струм від ВЕУ або батарей у змінний для потреб споживачів.

Методика дослідження енергоефективності

Для оцінки енергоефективності комбінованої системи використовуються наступні показники:

1. ККД вітроустановки:

$$\eta_{WEU} = \frac{P_{out}}{P_{wind}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

де P_{out} – фактична потужність, що віддається в систему; P_{wind} – теоретична потужність вітру на віротурбіну.

2. Коефіцієнт використання генерації (capacity factor):

$$CF = \frac{E_{aktual}}{E_{max}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

де E_{aktual} – фактична вироблена енергія, E_{max} – максимальна потенційна енергія за повного використання потужності турбіни.

3. Ефективність акумуляторної системи:

$$\eta_{bat} = \frac{E_{вивантажена}}{E_{заряджена}} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

Загальна енергоефективність комбінованої системи враховує втрати на інверторах, контролерах та акумуляторах.

Для дослідження проводиться моделювання роботи системи за різних режимів вітрового ресурсу та навантаження. Використовуються історичні дані про швидкість вітру та споживання електроенергії на об'єкті.

На основі проведеного були отримані такі результати:

- Середній ККД віротурбіни склав 35–40%, що відповідає середньому рівню для малих вітроустановок.
- Використання акумуляторної батареї дозволило зменшити нестабільність енергопостачання на до 25% у періоди слабкого вітру.
- Комбінування з додатковим джерелом (сонячна панель або дизель-генератор) забезпечує 100% покриття енергоспоживання навіть при тривалих періодах низької вітрової активності.

Отже, комбінована система на основі ВЕУ ефективна для автономного електропостачання об'єктів із середнім або низьким енергоспоживанням.

Акумуляторні батареї значно підвищують надійність системи, забезпечуючи резервну потужність. Використання додаткових джерел енергії дозволяє створити стійку гібридну систему, придатну для експлуатації в умовах нестабільного вітру. Розрахунки енергоефективності показують, що комбінована система здатна знизити залежність від традиційних джерел електроенергії та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Моделювання режимів роботи вітрових енергетичних установок у гібридних системах електропостачання

Однією з основних проблем використання відновлюваних джерел енергії, таких як вітер і сонце, є їхня нестабільність, що ускладнює підтримання постійного рівня виробництва електроенергії. Для підвищення надійності постачання доцільно поєднувати різні джерела у гібридну систему, яка може також містити енергоакумулюючі елементи. Одним із ефективних варіантів є гібридна вітрова система електропостачання (ГВСЕ), що поєднує переваги двох технологій.

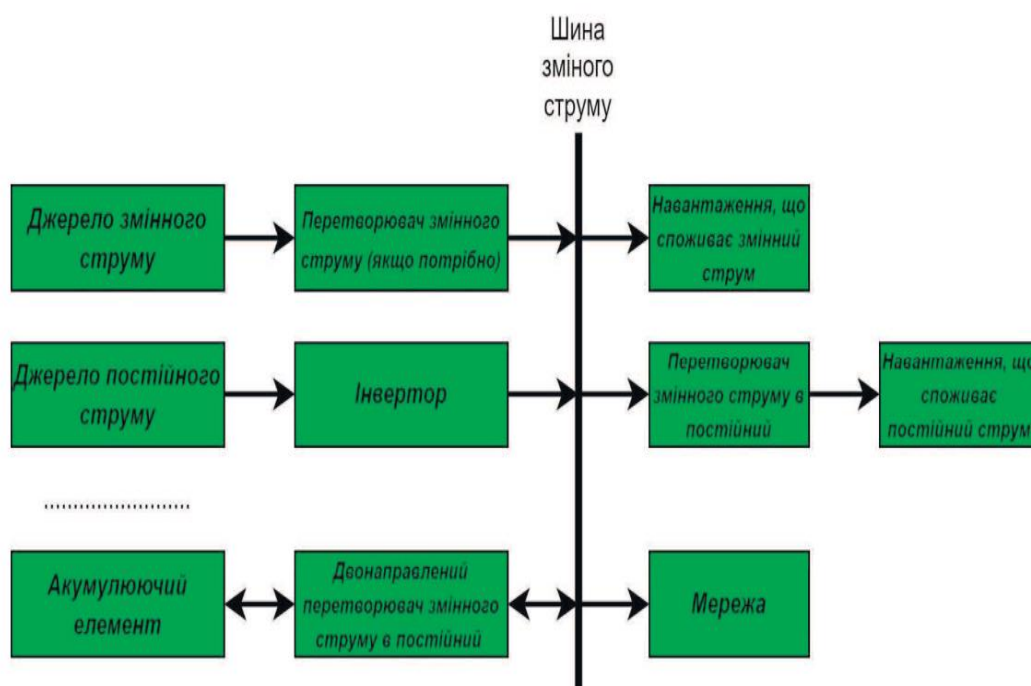


Рисунок 2.1 – Схема гібридної вітрової системи електропостачання з підключенням через шину змінного струму передбачає об'єднання вітрових і сонячних установок у єдину енергомережу змінного струму, до якої також можуть бути підключені накопичувачі енергії та споживачі.

У такій системі:

- Вітрогенератор (ВЕУ) виробляють електроенергію, яка за допомогою інверторів перетворюється у змінний струм.
- Всі джерела під'єднуються до спільної шини змінного струму (AC bus), що забезпечує узгодження параметрів напруги та частоти.
- До цієї ж шини підключаються акумуляторна батарея через двонаправлений перетворювач DC/AC, а також споживачі електроенергії.
- За необхідності система може бути з'єднана з централізованою мережею або працювати автономно.
- Система керування координує роботу всіх джерел і накопичувачів, забезпечуючи стабільну подачу електроенергії навіть за змінних умов вітру й освітленості.

Така конфігурація дає змогу реалізувати різні алгоритми енергоменеджменту, підвищити надійність і гнучкість системи, а також оптимізувати використання генерованої енергії відповідно до потреб споживачів.

Такі системи можуть будуватися за схемами з підключенням через шину постійного або змінного струму, а також через проміжну високочастотну шину. Використання схеми з шиною змінного струму дозволяє гнучко керувати енергетичними режимами залежно від умов генерації та споживання. Проте головним недоліком гібридних систем є їхня конструктивна та керуюча складність, що підвищує вартість і потребує оптимізації роботи окремих установок, зокрема вітрових. Надмірні комутації ВЕУ спричиняють зношення обладнання, тому важливо визначати оптимальний набір активних турбін, здатних ефективно покривати навантаження з урахуванням поточного технічного стану й умов роботи, а саме:

$$d_1 w_1 + \dots + d_n w_n \leq W, \quad (2.1)$$

де n — це порядковий номер вітроелектричної установки (ВЕУ); d_n — бінарна змінна, що визначає, чи входить n -та ВЕУ до складу активних (якщо $d_n = 1$) або не входить ($d_n = 0$); w_n — потужність n -ї ВЕУ; W — задане

значення потужності, яку необхідно забезпечити. У такому разі цільова функція записується у вигляді:

$$d_1 c_1 + \dots + d_n c_n \rightarrow \max, \quad (2.1)$$

Коефіцієнт ефективності c_n для n -ї вітроелектричної установки (ВЕУ) є інтегральним показником, який визначається на основі її технічних параметрів. Формалізована задача вибору активного складу вітроелектростанції (ВЕС) може розв'язуватися методами повного перебору, динамічного програмування чи іншими підходами. Однак така формалізація має обмеження, оскільки сумарна потужність вибраних ВЕУ не повинна перевищувати необхідну потужність, що ускладнює забезпечення потреб споживачів. Інший підхід передбачає пошук такого набору ВЕУ, за якого різниця між сумарною потужністю та необхідною є мінімальною, а сумарна ефективність — максимальною. Тобто:

$$\Delta P_{rel} = \left[\frac{\sum_{n=1}^N b_n p_n - P}{P} \right] \quad (2.3)$$

$$\bar{K} = \frac{\sum_{n=1}^N b_n k_{\Sigma n}}{\sum_{n=1}^N b_n} \quad (2.4)$$

$$W(\Delta P, \bar{K}) = a_1 \bar{K} + a_2 (1 - \Delta P_{rel}) \rightarrow \max, \quad (2.5)$$

Тут b_n – бінарна змінна, що вказує, чи входить n -та ВЕУ до активного складу ($b_n=1$ – увімкнена, $b_n=0$ – вимкнена); p_n – потужність n -ї установки; k_n – коефіцієнт ефективності; P – необхідна для генерації потужності; ΔP – різниця між потрібним навантаженням і сумарною потужністю активного складу ВЕС; K – загальний коефіцієнт ефективності набору ВЕУ. Така форма представлення задачі дозволяє усунути зазначені недоліки попереднього підходу.

Основним недоліком розглянутих підходів є відсутність оптимізації кількості комутацій у межах ВЕС та окремих ВЕУ, що необхідно для зменшення впливу електромеханічних перехідних процесів на роботу обладнання гібридної системи електропостачання. Тому важливим завданням є

розроблення методів і засобів оптимізації активного складу ВЕС з урахуванням відхилень потужності та мінімізацією комутацій, що сприятиме підвищенню ефективності управління енергодинамічними режимами таких систем.

Для обґрунтування алгоритму керування гібридною системою енергопостачання було сформовано набір продукційних правил [11], що базуються на двох принципах: акумулятори потрібно заряджати за наявності надлишкової електроенергії та розряджати — у разі її дефіциту для підтримання необхідного рівня генерації. Ці правила передбачають такі дії:

- якщо сумарна потужність ВЕС менша за мінімальне навантаження споживачів, визначається новий активний склад ВЕС і коригується потужність ВЕС;
- якщо надлишок енергії перевищує верхню межу навантаження, виконується перерозподіл активного складу ВЕС та потужності ВЕС із урахуванням режиму заряду або розряду акумуляторів;
- якщо енергія акумулятора досягає максимальної ємності, відбувається регулювання потужності ВЕС;
- якщо сумарної потужності ВЕС недостатньо для покриття споживання, енергія береться з акумулятора;
- якщо виникає надлишок енергії, акумулятор заряджається, а потужність ВЕС і коригується так, щоб підтримувати сумарну потужність у межах допустимого діапазону.

Для аналізу енергодинамічних режимів гібридної вітро-сонячної системи електропостачання було проведено комп'ютерне моделювання з використанням програмного забезпечення, розробленого на Java в середовищі IntelliJ IDEA з застосуванням фреймворків Spring Boot та Hibernate, а дані зберігалися у реляційній базі PostgreSQL. Моделювання виконано на двох наборах вхідних даних за січень та червень 2025 року, що включають миттєву швидкість вітру з метеостанції біля м. Старий Самбір (Україна). Оскільки модель ВЕС не враховує перехідні процеси при різких змінах швидкості вітру, на вхід подаються усереднені за 20 хв значення швидкості вітру. Досліджено кілька

конфігурацій гібридної системи з різною кількістю вітроелектростанцій (V52/850), а також з акумулюючим елементом ККД 95 % і максимальною силою струму заряду-розряду 2С. Моделювання проводилося для енергетичної ємності акумулятора від 0 до 100 МВт·год при середньому навантаженні споживачів 10 МВт, а всі досліджувані конфігурації наведені у відповідних таблицях.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики вітроелектростанції

Параметр	Значення
Модель	V52/850
Номінальна потужність, кВт	850
Діаметр ротора, м	52
Площа ротора, м ²	2124
Мінімальна швидкість вітру, м/с	3
Номінальна швидкість вітру, м/с	14
Максимальна швидкість вітру, м/с	25

Таблиця 2.2 – Конфігурації гібридної системи електропостачання

Назва конфігурації	Кількість ВЕУ, од.
“А”	60
“Б”	75
“В”	75
“Г”	75
“Д”	90

Таблиця 2.3 – Сумарна генерація ВЕУ для різних конфігурацій ГВСЕ

Конфігурація	REPG	Генерація ВЕУ без обмежень, МВт·год
		Січень / January
“А”	1,254	7,583
“Б”	1,482	9,479
“В”	1,510	9,479
(додатковий варіант)	1,559	9,479
“Д”	1,786	11,374

Таблиця 2.4 – Результати моделювання роботи ГВСЕ для січня

Ємність АЕ, МВт·год	0	10	20	40	70	100
Розкид відхилень АР, МВт	-10;1,2	-10;0,9	-10;0,8	-10;0,7	-10;0,5	-10;0,5
Відношення розкиду до заданої потужності, %	-100;12	-100;9	-100;8	-100;7	-100;5	-100;5
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,5260	0,5135	0,5156	0,5085	0,4972	0,4980
Середнє відхилення АР, кВт	4320,0	3918,6	3744,1	3465,8	3192,2	2994,6

Таблиця 2.5 – Результати моделювання роботи ГВСЕ для червня

Ємність АЕ, МВт·год	0	10	20	40	70	100
Розкид відхилень АР, МВт	-10;0,5	-10;0,5	-10;0,5	-10;0,5	-10;0,5	-10;0,5
Відношення розкиду до заданої потужності, %	-100;5	-100;5	-100;5	-100;5	-100;5	-100;5
Середнє значення коефіцієнта ефективності набору	0,4606	0,4698	0,4664	0,4667	0,4651	0,4713
Середнє відхилення АР, кВт	5 938,3	5 445,8	5 029,9	4 204,0	3 043,2	1 934,6
Лінійний коефіцієнт варіації відхилення АР, %	59,384	54,458	50,300	42,040	30,433	19,346
Дисперсія відхилення АР	$5,6 \cdot 10^8$	$5,2 \cdot 10^8$	$4,8 \cdot 10^8$	$3,9 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$
Квадратичний коефіцієнт варіації АР, %	75,333	72,260	69,181	62,589	51,950	39,262

Основною обраною конфігурацією є “В”. Вона була вибрана так, щоб показник відносної надлишковості згенерованої електроенергії (REPG) становив приблизно 1,5 у січні та червні. REPG визначається як відношення сумарної генерації без обмежень до сумарного попиту на електроенергію.

$$REPG = \frac{\sum_{t=1}^T E_{gen}(t)}{\sum_{t=1}^T E_L(t)} \quad (2.6)$$

Тут T – загальний час електропостачання, $E_{gen}(t)$ – електроенергія, яка могла бути згенерована без обмежень у момент часу t , а $E_L(t)$ – навантаження споживача в цей же момент. Інші конфігурації отримані шляхом зміни кількості ВЕУ або СП на $\pm 20\%$, а значення REPG і сумарної генерації наведено в табл. 2.4, тоді як результати моделювання для січня і червня – у табл. 2.4 і 2.5. Порівняння показало, що середнє відхилення потужності генерації у червні без АЕ в 1,37 раза більше, проте з ростом ємності АЕ ΔP знижується швидше, а при 100 МВт·год складає 0,65, що пояснюється чергуванням періодів високої і низької швидкості вітру, що зменшує вплив АЕ на стабільність системи.

Моделювання показало, що час підтримки споживача, коли АЕ повністю покриває його потреби, і ймовірність втрати живлення (DPSP), визначена як відношення сумарного дефіциту електроенергії до споживчого попиту, взаємопов'язані.

$$DPSP = \frac{\sum_{t=1}^T DPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_L(t)} \quad (2.7)$$

$$DPS(t) = E_{gen}(t) - E_L(t). \quad (2.8)$$

Залежності наведені на рис. 2.2 і 2.3 демонструють, що на першому інтервалі часу до 1,3 год параметр DPSP різко знижується, а після цього падіння стає більш плавним, причому конфігурації “Г” і “Д” показали кращі результати, ніж “А” і “Б”. Ці результати підкреслюють необхідність оптимального поєднання різних джерел у гібридній системі та важливість використання АЕ. На рис. 3 показано червневу залежність, де основним джерелом електроенергії є СП, здатні виробляти майже втричі більше енергії, ніж ВЕУ, через середню швидкість вітру лише 2,9 м/с, що менше за стартову швидкість ВЕУ V52/850 (3 м/с). Відсутність обмежень на кількість комутацій ВЕУ може призвести до частого включення/виключення та швидкого зносу елементів при різкій зміні швидкості вітру або повністю зарядженому/розрядженому АЕ. Щоб уникнути цього, введено параметр “мінімальний інтервал між послідовними змінами активного складу ВЕС” (t_{min_change}), який забороняє комутації протягом заданого

часу, крім випадків, коли потужність відхиляється від заданого рівня більше ніж на 20 %, що дозволяє зменшити ΔP при різких змінах швидкості вітру.

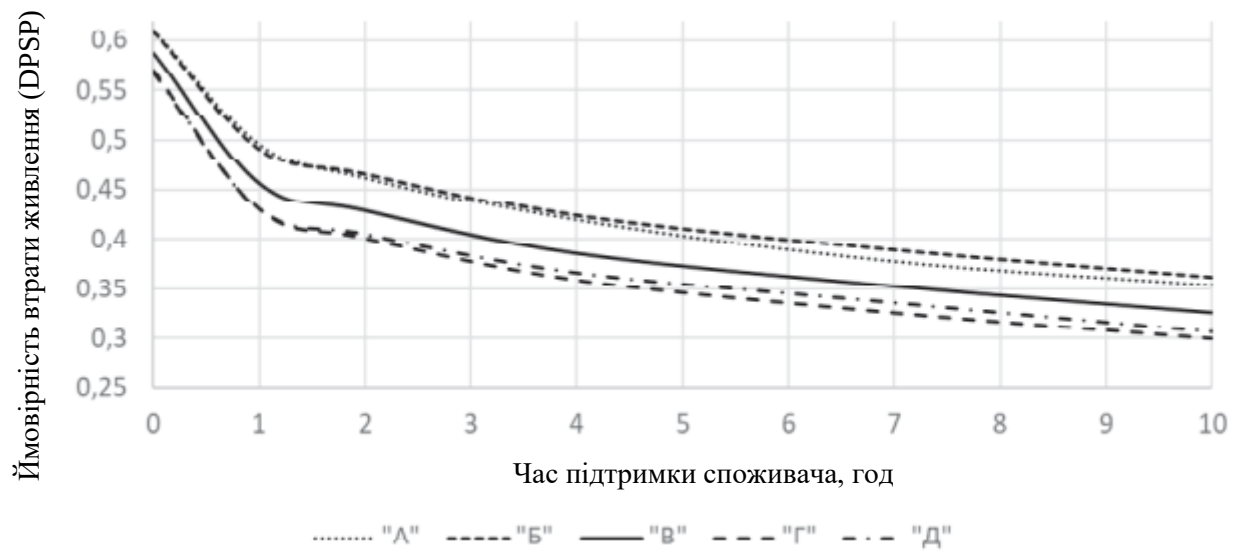


Рисунок 2.2 – Залежність між часом підтримки споживача і ймовірністю втрати живлення (DPSP) для січня

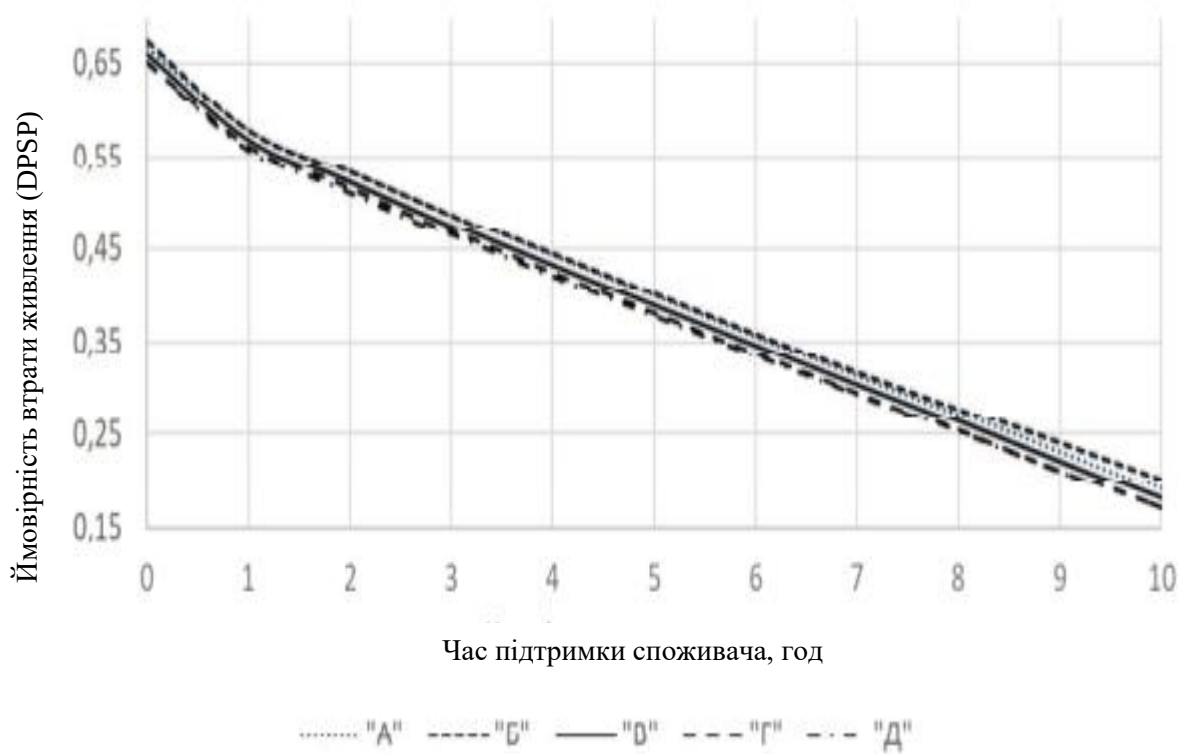


Рисунок 2.3 – Залежність між часом підтримки споживача і ймовірністю втрати живлення (DPSP) для червня

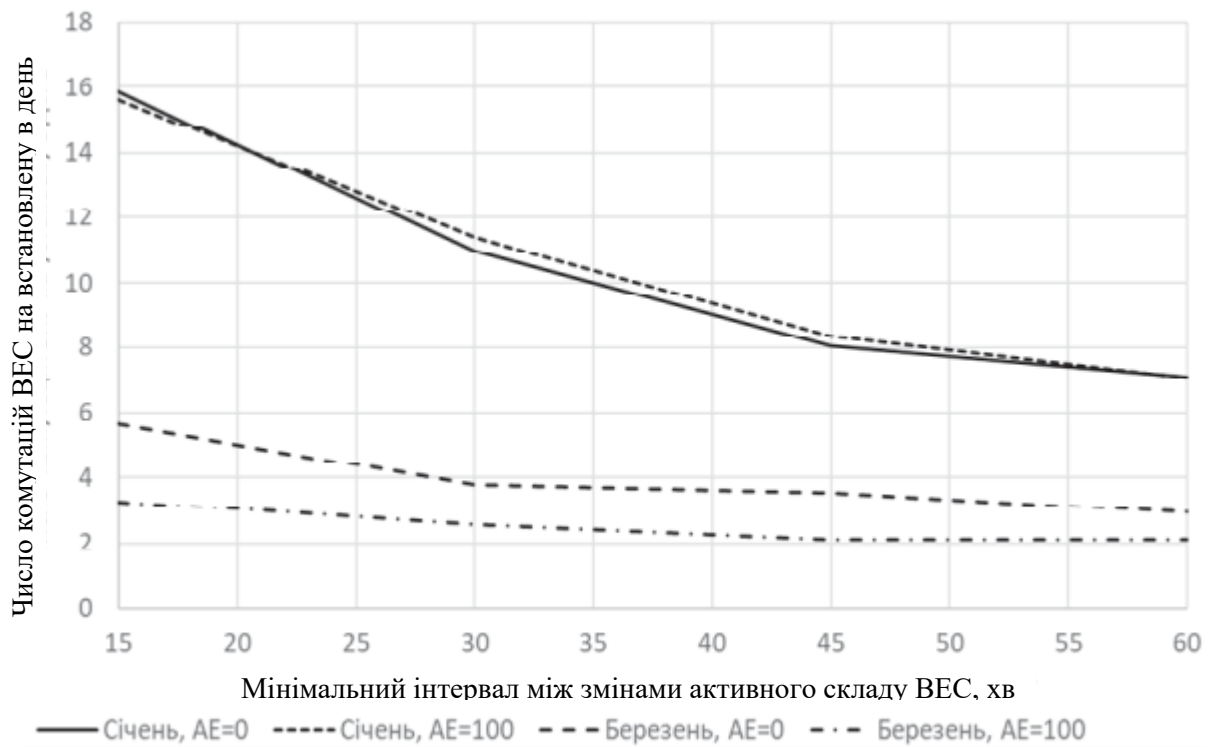


Рисунок 2.4 – Взаємозв’язок між мінімальним інтервалом між послідовними змінами активного складу ВЕС (t_{min_change}) та кількістю комутацій на одну установку на день.

Для дослідження впливу t_{min_change} на роботу гібридної системи проведено імітаційне моделювання для конфігурації “В”, а залежність між t_{min_change} і кількістю комутацій на одну ВЕУ наведена на рис.2.4. Аналіз показав, що використання АЕ не завжди зменшує число комутацій ВЕУ, оскільки значну роль відіграють характеристики енергетичного потенціалу в різні періоди. Так, у січні різниця в комутаціях між системами з АЕ та без АЕ становить лише 2,4 %, тоді як у березні АЕ на 100 МВт·год дозволяє знизити число комутацій на 42 % при t_{min_change} 15 хв і на 27 % при t_{min_change} 60 хв. Водночас використання t_{min_change} збільшує середнє відхилення потужності генерації (ΔP), що показано на рис. 2.5. Для січня, де основна частина енергії генерується ВЕС, збільшення t_{min_change} з 15 до 30 хв призводить до росту ΔP з 2,18 до 2,43 МВт для системи без АЕ та з 1,01 до 1,25 МВт для системи з АЕ, тоді як у березні з меншою часткою енергії від ВЕС ΔP зростає повільніше.

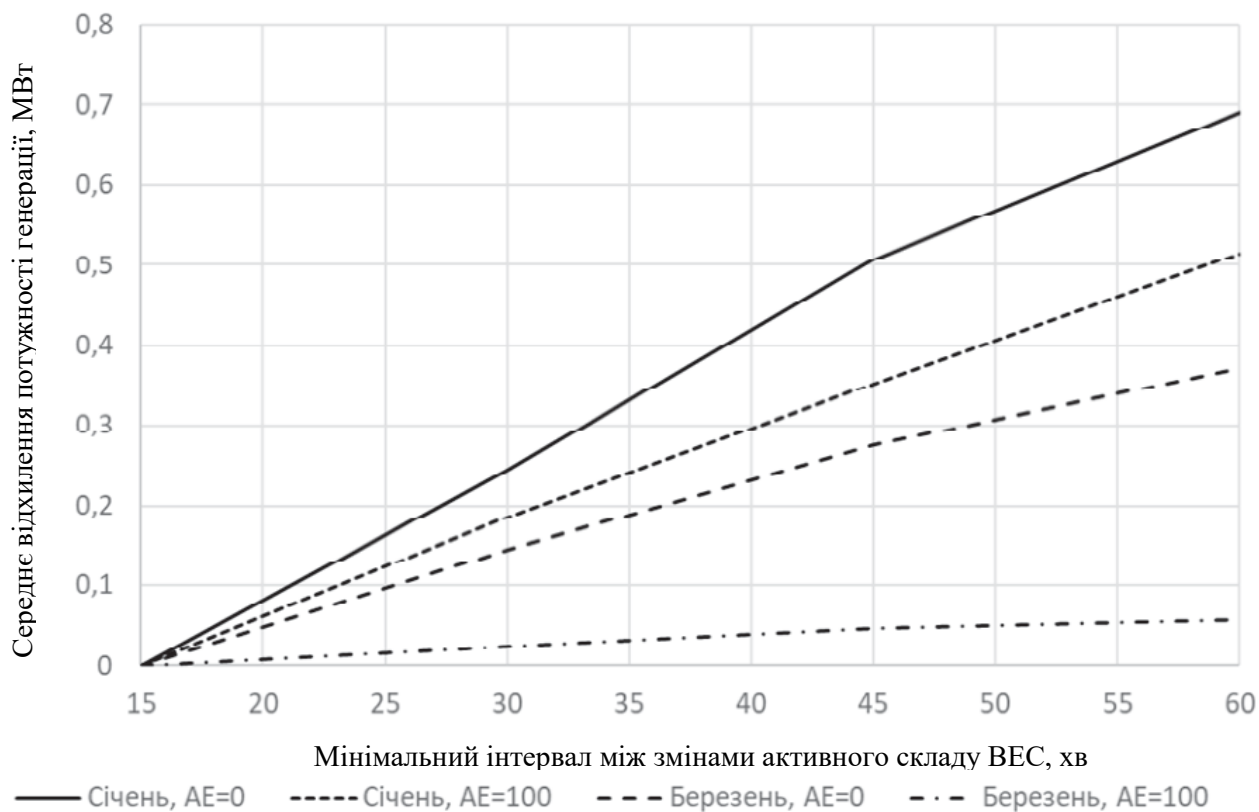


Рисунок 2.5 – Взаємозв’язок між мінімальним інтервалом між послідовними змінами активного складу ВЕС ($t_{\min_change}$) та середнім відхиленням потужності генерації (ΔP).

Аналіз отриманих результатів підтверджує необхідність удосконалення алгоритмів управління енергетичними потоками гібридних систем для забезпечення балансу між генерацією та споживанням електроенергії та ефективного використання обладнання. Для дослідження енергодинамічних режимів застосовано комп’ютерне моделювання універсальної гібридної системи, що складається з ВЕУ, СП, акумулюючого елемента та споживачів. Введення параметру “мінімальний інтервал між послідовними змінами активного складу ВЕС” дозволило зменшити кількість комутацій ВЕУ та підвищити надійність їх роботи, проте його збільшення водночас призводить до зростання середнього відхилення потужності генерації (ΔP). Моделювання показало, що вплив АЕ на число комутацій і ΔP залежить від сезонних характеристик енергетичного потенціалу, причому для січня АЕ практично не змінює число комутацій, а для березня його використання суттєво знижує комутації при різних значеннях $t_{\min_change}$. Наукова новизна роботи полягає у

встановленні залежностей між параметрами гібридної системи та енергетичним потенціалом ВДЕ для оптимізації активного складу ВЕС з урахуванням відхилень потужності та кількості комутацій. Практична значущість полягає у розробці програмного забезпечення для реалізації обґрунтованих алгоритмів управління, що підвищує ефективність гібридних систем з АЕ. Верифікація результатів через імітаційне моделювання дозволила визначити оптимальні режими роботи системи та статистичні характеристики часу підтримки споживача й ймовірності втрати живлення. Використання отриманих результатів забезпечує можливість оптимізації управління наявними системами та обґрунтування параметрів елементів для проєктування ефективних гібридних електропостачальних систем.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Аналіз конструкцій вітроелектричних установок для гібридної сонячно-вітрової енергосистеми

На початкових етапах свого розвитку вітротурбіни використовувалися переважно як механічні пристрої, однак останнім часом їх застосовують для виробництва великих обсягів електроенергії [1, 2]. Протягом понад тисячоліття вони еволюціонували до рівня основного джерела енергії в деяких країнах світу й нині випускаються у різних конфігураціях для наземних (onshore) та морських (offshore) установок.

Вітер і сонце є найпоширенішими джерелами відновлюваної енергії, тому їх використання має стати ключовим напрямом у досягненні сталого енергозабезпечення суспільства. Термін «вітротурбіна» вже не обмежується лише роторним пропелером, а означає аеродинамічну установку – генератор, що працює за принципом крила (аерофойла). Сьогодні виготовляють різні типи вітротурбін – як вертикальні, так і горизонтальні. Малі турбіни застосовують для заряджання акумуляторів на човнах і живлення дорожніх знаків [3, 4, 5], тоді як великі використовують для забезпечення електроенергією житлових і промислових об'єктів. Сукупність великих турбін, відомих як вітрові електростанції (wind farms), швидко перетворюється на важливе джерело відновлюваної енергії, яке багато країн активно впроваджують для зменшення залежності від викопного палива [6].

З кінця 1980-х років зростання сектору вітрової енергетики у США сповільнилося, тоді як у Європі воно продовжує активно розвиватися завдяки підвищеній екологічній свідомості та усвідомленню необхідності термінової реакції на глобальні кліматичні зміни, спричинені надмірним використанням викопних ресурсів [7]. Сьогодні вітрогенератори різних розмірів використовуються по всьому світу – від малих турбін для заряджання

аккумуляторів до великих офшорних електростанцій, що постачають електроенергію до національних енергомереж [8].

Альтернативні джерела енергії, зокрема вітер, поступово набувають популярності у світі, однак багато країн, що розвиваються, досі не впровадили ці технології. Наразі вітроенергетика в Україні практично використовується в Західній частині, і наявні лише залишки від попередніх спроб її застосування.

Однією з основних проблем використання вітрової енергії як альтернативного джерела є її непередбачуваність і нерівномірність. Інша проблема полягає у виборі оптимальних місць для розташування вітрових електростанцій, де спостерігаються сприятливі швидкості вітру. Для подолання цих труднощів проведено численні дослідження.

Так, Ільхан та ін. (2022) [10] застосували вітротурбину з дифузором (DAWT) для підвищення ефективності роботи турбіни шляхом збільшення швидкості вітру у зоні перед ротором. У своїй роботі вони поділили попередні дослідження на дві категорії: перша – це відносно підвищення ефективності енерговіддачі за рахунок удосконалення аеродинамічних характеристик лопатей HAWT; друга – огляд методів посилення потужності HAWT за допомогою DAWT. Вони дійшли висновку, що використання DAWT забезпечує суттєве збільшення виробництва електроенергії, особливо для малих турбін у міських умовах, за умови правильного проєктування [11].

Мехмет та ін. (2021) дослідили вплив збільшення розміру турбін на аеродинамічну ефективність сучасних великих промислових вітроустановок. Результати показали, що зменшення питомої потужності призводить до зниження номінальної швидкості вітру, при якій турбіна досягає максимальної потужності, а отже, сприяє підвищенню загальної потужності системи [2].

Сохаїб та ін. (2018) [3] оцінили роботу малої вітротурбіни на основі щільності вітрової енергії, яку визначали за виміряними швидкістю вітру та температурою. Результати показали, що вертикальні турбіни (VAWT) у деяких локаціях можуть забезпечувати більшу генерацію енергії, ніж горизонтальні

(HAWT), що допомагає обрати оптимальне місце для встановлення малої турбіни для максимізації енергетичної віддачі.

Отже, розроблення комбінованої системи вітрової енергії із сонячною панеллю для підвищення стабільності електропостачання, яке можна передавати у різні місця, з урахуванням оптимального вибору локації для вітротурбіни. У межах роботи виготовлено малу горизонтально-осьову вітротурбіну (HAWT), що є альтернативним і сталим джерелом енергії, придатним також для навчальних і демонстраційних цілей. Її обрано замість вертикальної турбіни для максимізації ефективності поглинання вітрової енергії.

3.2 Вибір матеріалів конструкцій вітроелектричних установок для гібридної сонячно-вітрової енергосистеми

Більшість матеріалів, використаних у цьому дослідженні, були місцевого походження та відзначалися економічною доцільністю. Основними компонентами, застосованими при розробленні малої горизонтально-осьової вітроустановки (HAWT), є лопаті, роторне з'єднання, маточина, гондола, двигун постійного струму (DC motor), опорна плита та підсилювальний електричний модуль (booster circuit), як показано на рис. 3.1.

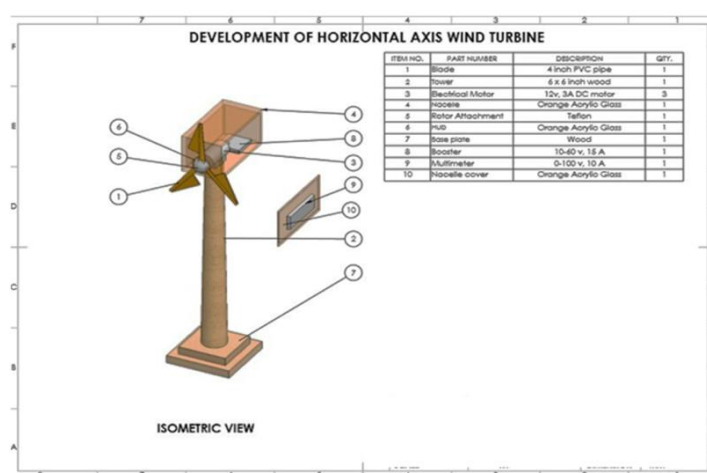


Рисунок 3.1 – Макет вітроелектричної установки з горизонтальною віссю обертання.

Лопать є частиною ротора, що кріпиться до маточини. Обертаючись за годинниковою стрілкою, вона перетворює енергію вітру на механічну енергію, яка передається на вал двигуна. У цьому дослідженні для виготовлення лопатей використано непластифікований полівінілхлорид (PVC-U) діаметром 4 дюйми із труб стандарту schedule 40.

Маточина слугує з'єднувальним елементом між лопатями та генератором, утворюючи з лопатями роторний вузол. Її виготовлено з полі(метилметакрилату), більш відомого як акрилове скло або плексиглас (Perspex).

Роторне з'єднання забезпечує передачу обертання від ротора до вала електродвигуна. Цей елемент виготовлено з тефлонового стрижня, обробленого відповідно до заданих параметрів.

Гондола (Nacelle) є корпусом, у якому розміщено електричні компоненти турбіни, зокрема генератор.

Мінливість швидкості вітру на метеостанції. Було проведено аналіз для визначення характеристик швидкості вітру на вітровій станції, розташованій в м. Львів. Дані про вітер були отримані з метеостанції цього закладу протягом 22 днів. Для збору даних використовувався анеометр iMetos, встановлений за координатами широта 50.67° E, довгота 25.31° E.

Дані аналізували за допомогою комп'ютерної моделі. Середні та максимальні швидкості вітру зчитувалися кожні 10 хвилин протягом доби. Результати середніх і максимальних швидкостей подано в таблиці 3.1.

Визначення характеру швидкості вітру. Через несприятливі природні умови вітру для запуску турбіни використовувався вентилятор, який створював повітряний потік на відстані 0,5 м від неї. У дослідженні застосовувався електричний вентилятор із трьома рівнями швидкості — високою, середньою та низькою.

Під час проєктування лопатей враховували швидкість вітру, оскільки вона визначає число Рейнольдса (Reynolds Number). Приймаючи густину повітря $\rho = 1,223 \text{ кг/м}^3$, динамічну в'язкість повітря $\mu = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ при

кімнатній температурі та середню хорду лопаті 0,3 м, було обчислено значення числа Рейнольдса для трьох середніх швидкостей повітряного потоку 5 м/с, 10 м/с та 15 м/с, що відповідають низькому, середньому та високому режимам вентилятора. Дані наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Дані про швидкість вітру на метеостанції

День	Середня швидкість, U_{avg} (м/с)	Максимальна швидкість, U_{max} (м/с)
1		
1	0,4	0,5
2	0,2	0,2
3	0,1	0,2
4	0,2	0,3
5	0,3	0,4
6	0,2	0,3
7	0,4	0,5
8	0,3	0,4
9	0,4	0,4
10	0,3	0,4
11	0,4	0,5
12	1,6	1,8
13	1,2	1,3
14	0,3	0,4
15	0,4	0,6
16	0,8	0,9
17	1,0	1,2
18	1,6	1,9
19	1,6	1,9
20	0,9	1,0
21	0,7	0,9
22	0,6	0,7

Таблиця 3.2 – Характер середньої швидкості вітру

№ з/п	Швидкість вітру (м/с)	Число Рейнольдса
1	5	$9,86 \cdot 10^4$
2	10	$1,97 \cdot 10^5$
3	15	$2,96 \cdot 10^5$

Згідно з дослідженням Park та ін. (2017) [14], ламінарний потік над гладкою пласкою поверхнею починає переходити в турбулентний при числі

Рейнольдса близько $1 \cdot 10^5$, але не стає повністю турбулентним до досягнення значень приблизно $3 \cdot 10^6$.

Отже, можна зробити висновок, що характер потоку при швидкості 5 м/с є ламінарним, тоді як при 10 м/с і 15 м/с – перехідним (трансляційним).

Ширина лопаті. Ширину лопаті визначали, виходячи з діаметра використаної ПВХ труби (4 дюйми). Для отримання необхідної ширини виконано такі розрахунки:

Периметр труби. Нехай діаметр 4-дюймової труби $d = 10$ см.

Тоді радіус труби r (згідно з рівнянням (3.1)) становитиме:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ см} \quad (3.1)$$

Отже, периметр труби визначається за рівнянням (3.2):

$$p = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot 3,14 \cdot 5 = 31,4 \text{ см} \quad (3.2)$$

Периметр труби, який становить приблизно 30 см, використовується для розрахунку ширини трьох лопатей (рівняння (3.3)).

$$\begin{aligned} \text{Width, } b &= \frac{p}{3} \\ b &= \frac{30}{3} = 10 \text{ см} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ширину лопаті прийнято рівною 9 см.

Діаметр ротора. Припускаючи, що довжина хорди лопаті $L = 30$ см, а діаметр маточини становить 10 см, діаметр ротора визначається за рівнянням (3.4).

$$\begin{aligned} D &= 2l + h \text{ ub diameter} \\ D &= (2 \cdot 30) + 10 = 70 \text{ см} = 0,7 \text{ м} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Діаметр ротора використовується для розрахунку потужності вітру та площі, що омивається.

Площа, що омивається. Площа, що омивається, A , для вітротурбіни може бути розрахована на основі діаметра ротора, використовуючи формулу площі кола. Розрахована площа, що омивається, становить $0,385 \text{ м}^2$.

Коефіцієнт швидкохідності лопаті. Коефіцієнт швидкохідності лопаті (TSR) визначається як співвідношення між швидкістю на кінці лопаті та швидкістю вітру. Параметри для розрахунку TSR наведено у рівнянні (3.5):

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3.5)$$

У даній конструкції для трилопатевого ротора прийнято коефіцієнт швидкохідності, рівний 6. Такий показник забезпечує ефективне перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію.

Кут закручування лопаті. Цей параметр є важливим для визначення коефіцієнта потужності, що отримується на кожній ділянці лопаті. Для визначення проєктного кута закручування лопаті використано рівняння (3.6).

$$\tan \varphi = \frac{2}{3\lambda + \frac{2}{\lambda}} \quad (3.6)$$

Припускаючи, що коефіцієнт швидкохідності $\lambda = 6$, кут закручування лопаті визначається як:

$$\tan \varphi = \frac{2}{3 \cdot 6 + \frac{2}{6}} = 0,1091$$

Кут закручування лопаті визначається за формулою:

$$\varphi = \tan^{-1}(1/1.091) \approx 6^\circ$$

Кут нахилу лопаті. Це кут між лінією хорди лопаті ротора та площиною обертання ротора. Зазвичай його називають кутом нахилу (θ) і часто описують як відстань, яку проходить лопать за один оберт при 100% ефективності. Регулювання кута нахилу є дуже важливим у роботі турбіни, оскільки кути лопатей повинні контролюватися для підтримання оптимальної швидкості вітру в межах допустимого. У цьому дослідженні кут установки лопаті підтримується постійним, оскільки використовується певний сталий діапазон швидкостей вітру.

Швидкість кінця лопаті. Швидкість на кінці лопаті можна обчислити за допомогою коефіцієнта швидкості кінця лопаті турбіни (tip speed ratio) та швидкості вітру, як показано в рівнянні (3.7).

$$\mu = \lambda \cdot v = \omega \cdot R = 2\pi fR \quad (3.7)$$

Припускаючи, що $\lambda = 6$, значення швидкості кінця лопаті обчислюються для всіх зафіксованих швидкостей вітру для трьох варіантів швидкості обертання вентилятора, як показано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Швидкість кінців лопатей при трьох варіантах швидкості обертання вентилятора

№	Швидкість вітру (м/с)	Швидкість кінця лопаті (м/с)	Швидкість вітру (м/с)	Швидкість кінця лопаті (м/с)	Швидкість вітру (м/с)	Швидкість кінця лопаті (м/с)
	Низька		Середня		Висока	
1	6,5	39	10,1	60,6	16,2	97,2
2	6,3	37,8	10,3	61,8	15,4	92,4
3	6,2	37,2	11,4	68,4	16,5	99
4	6,8	40,8	10,9	65,4	16,2	97,2
5	6,5	39	10,6	63,6	16,2	97,2
6	5,6	33,6	10,2	61,2	16,3	97,8
7	5,4	32,4	10,0	60	16,9	101,4
8	5,3	31,8	11,4	68,4	15,3	91,8
9	6,4	38,4	11,4	68,4	16,3	97,8
10	6,7	40,2	11,7	70,2	16,7	100,2
11	5,7	34,2	11,1	66,6	16,3	97,8
12	5,9	35,4	11,4	68,4	16,4	98,4
13	5,8	34,8	11,3	67,8	15,9	95,4

Номінальна швидкість обертання. Номінальна швидкість обертання може бути визначена за рівнянням (3.8).

$$\text{Rated revolution speed (rpm)} = \frac{60\lambda v}{6,28R} \quad (3.8)$$

Припускаючи, що середні номінальні швидкості вентилятора (v) складають відповідно 5 м/с, 10 м/с та 15 м/с, номінальна швидкість обертання турбіни наведена в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Номінальні швидкості обертання турбіни

№	Швидкість вітру (м/с)	Номінальна швидкість обертання (об/хв)
1	5	818,9
2	10	1637,9
3	15	2456,8

Потужність. Потужність вітру, що впливає на вітрогенератор, відповідає за вироблення електричної енергії турбіною. Згідно з Adetunla2021 [16], при

постійному прискоренні кінетична енергія тіла масою m та швидкістю v дорівнює роботі W , виконаній для переміщення цього об'єкта з стану спокою на відстань s під дією сили F . Згідно з законом Ньютона, потужність можна обчислити за формулою, наведеною в рівнянні (3.9).

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.9)$$

Ця обчислена потужність вітру відома як теоретично вилучена потужність вітру лопатями турбіни за ідеальних умов.

Потужність турбіни. Вилучена потужність вітру втрачає частину ефективності перед перетворенням на електричну енергію через тертя, аеродинамічний опір, нагрів, конфігурацію лопатей, механічну трансмісію та втрати при генерації електроенергії. Фактичну електричну потужність турбіни можна визначити за рівнянням (3.10).

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p n_d n_g \quad (3.10)$$

Припускаючи густину повітря $\rho = 1,223 \text{ кг/м}^3$, ефективність приводу $n_d=0,35$, ефективність генератора $n_g=0,9$ та максимальний коефіцієнт потужності $C_p=0,593$, потужність вітру та потужність генератора були обчислені для зафіксованих швидкостей вітру при трьох варіантах швидкості обертання вентилятора, як наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Теоретичні потужності вітру та турбіни для трьох варіантів швидкості обертання вентилятора

№	Швидкість вітру (м/с)	Потужність вітру (Вт)	Потужність турбіни (Вт)	Швидкість вітру (м/с)	Потужність вітру (Вт)	Потужність турбіни (Вт)	Швидкість вітру (м/с)	Потужність вітру (Вт)	Потужність турбіни (Вт)
	Низька			Середня			Висока		
1	6,5	38,34	12,08	10,1	143,84	45,31	16,2	593,55	186,97
2	6,3	34,91	11,00	10,3	152,55	48,05	15,4	509,89	160,61
3	6,2	33,27	10,48	11,4	206,84	65,15	16,5	627,14	197,55
4	6,8	43,90	13,83	10,9	180,80	56,95	16,2	593,55	186,97
5	6,5	38,34	12,08	10,6	166,28	52,38	16,2	593,55	186,97
6	5,6	24,52	7,72	10,2	148,15	46,67	16,3	604,61	190,45
7	5,4	21,98	6,92	10,0	139,61	43,98	16,9	673,86	212,27
8	5,3	20,78	6,55	11,4	206,84	65,15	15,3	500,2	172,3

Підйомна та аеродинамічна сили (Drag and Lift). Найважливішим елементом ротора вітротурбіни є аеродинамічне профільне лезо (airfoil), яке створює сили, що змушують турбіну обертатися. Цими силами є підйомна сила та сила опору, які задаються відповідно рівняннями (3.11) та (3.12). Найбільше значення мають коефіцієнти підйомної сили C_l та коефіцієнт опору C_d .

$$L = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_l s \quad (3.11)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_d s \quad (3.12)$$

де s – розмах леза, v – швидкість повітря, s – хорда леза.

Вітрова вежа. Висота вітрової вежі є важливим фактором, який слід враховувати при проектуванні вітротурбін. Чим більша висота вежі, тим вища швидкість вітру, оскільки забезпечується більша стабільність потоку та менше перешкод. У даному проєкті ефект висоти був знехтуваний через розмір турбіни та її експериментальну мету. Висота вежі визначена як 90 см, що втричі більше довжини леза 30 см. Вежу звужили (трапецевидно), щоб покращити балансування турбіни.

Кут звуження (Taper angle). Це кут між звуженою частиною та центральною віссю вежі, який позначено як α , як показано на рис. 3.3. Кут звуження можна обчислити за рівнянням (3.13).

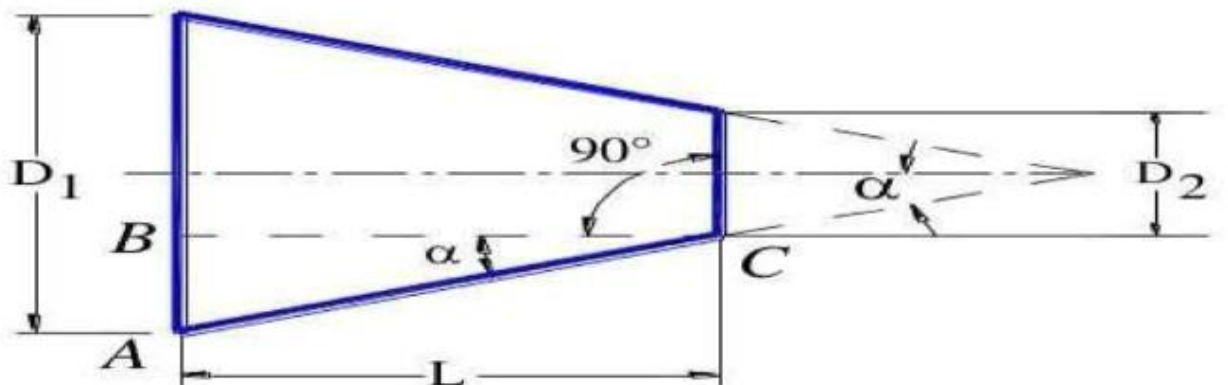


Рисунок 3.3 – Поворот звуженої частини.

$$\tan \varphi = \frac{D_1 - D_2}{2L} \quad (3.13)$$

де $D_1=13$ см та $D_2=10$ см, половинний кут звуження задається як 1° повний кут звуження задається як 2° .

Електричні компоненти. Електричні схеми на рис. 3.4 та 3.5 відповідають за генерацію та стабілізацію електричної енергії. Генератор турбіни перетворює механічну енергію ротора на електричну. Використаний у цьому дослідженні генератор — це двигун постійного струму 12 В з номінальною швидкістю 350 об/хв, оснащений кульковими підшипниками спереду та ззаду. Вихідна напруга є змінним струмом. Пульсації вихідної напруги ± 16 В постійного струму не можна безпосередньо підключати до навантаження. Для усунення пульсацій використовується фільтруючий конденсатор. Використовується конденсатор 1000 мкФ, 25 В, як показано на схемі.

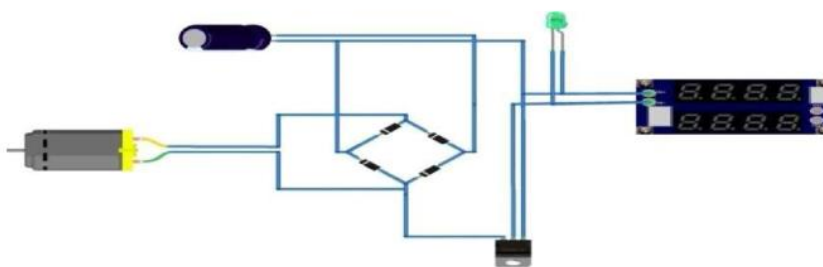


Рисунок 3.4 – 2,5D-візуалізація електричної схеми.

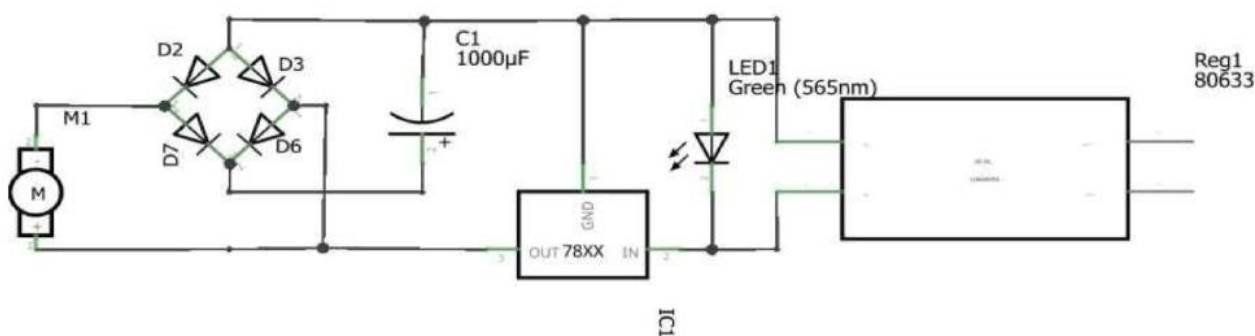


Рисунок 3.5 – Схематична діаграма електричної схеми.

Конденсатор підключений безпосередньо до виходу місткового випрямляча, щоб заряджатися та забезпечувати чистий постійний струм, усуваючи пульсації від джерела постійного струму. Проте вихід обох конденсаторів не регулюється. Фільтруючий конденсатор підключається до інтегральної схеми регулятора (IC), щоб стабілізувати вихідну напругу конденсаторів, яка інакше змінювалася б відповідно до зміни вхідної напруги.

Залежно від вимог до вихідної напруги використовуються різні типи регуляторів ІС. У цьому випадку потрібна чиста та стабілізована вихідна напруга +12 В, тому використовується ІС 7812. Для індикації роботи електричної схеми використовується червоний світлодіод із напругою 2 В.

Підвищувальний перетворювач DC-DC (Booster converter). Підвищувальний перетворювач, використаний у цьому дослідженні, має вхідну напругу DC 8,5–50 В, вихідну напругу DC 10–60 В та прямий струм 15 А. Перетворювач складається з індуктора, напівпровідникових ключів, діода та конденсатора, як показано на схемі на рис. 3.6.

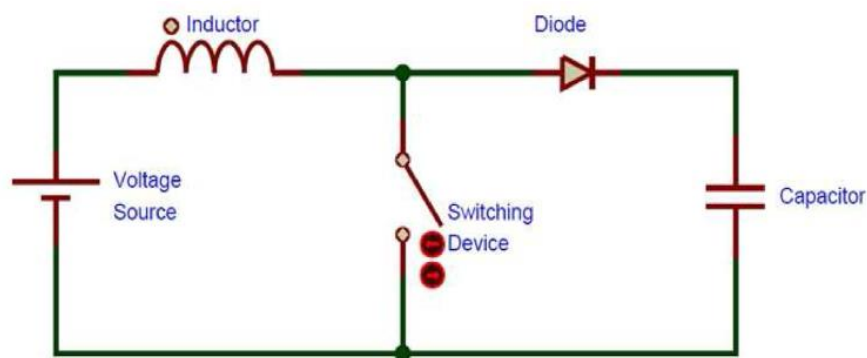


Рисунок 3.6 –Схематична діаграма підвищувального перетворювача DC-DC..

Випрямляч (Rectifier). Для підключення двох вихідних клем двигуна використовується містковий випрямляч. Випрямляч служить перетворювачем, що перетворює змінний струм (AC) на постійний (DC). Схема складається з діодних ключів, як показано на схемі електричного кола. Таким чином, використовуються чотири діоди для отримання вхідної напруги 8 В змінного струму та вихідної напруги 16 В постійного струму з пульсаціями. Для повного місткового випрямляча вихідна напруга задається рівнянням (3.14).

$$V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (3.14)$$

На рис. 3.7 показано форму сигналу вхідної та вихідної напруги повного місткового випрямляча.

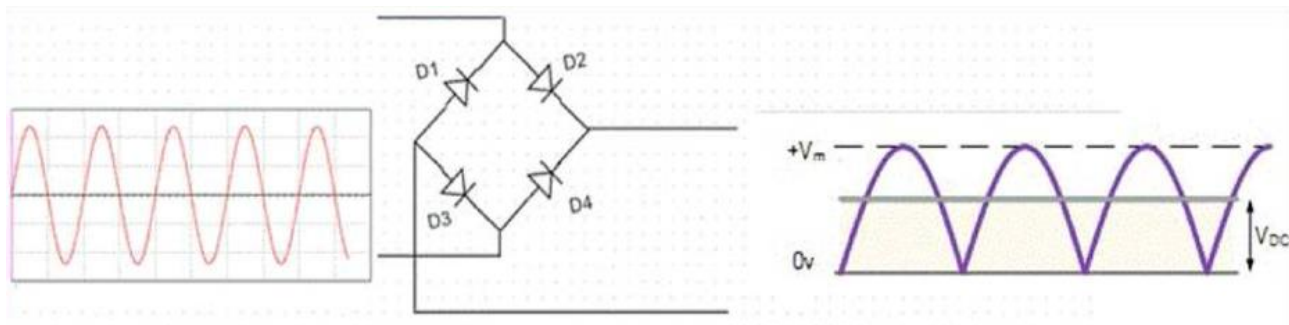


Рисунок 3.7 – Форма сигналу повного місткового випрямляча.

Збірка горизонтальної вітротурбіни (HAWT). Лопаті турбіни були розмічені та вирізані з 4-дюймової труби, а потім закручені за допомогою фена для волосся до необхідних кривих. Ступиця, носова частина та капсула (nacelle) були розмічені та вирізані з акрилового скла. З деревини 6×6 см був вирізаний шматок довжиною 90 см і звужений з діаметрами $D_1=13$ см та $D_2=10$ см відповідно. Опорна плита була розмічена та вирізана з деревини.

Вежа була встановлена та прикручена до опорної плити, після чого в ній просвердлили отвір через конструкцію «вежа–опорна плита». Кріплення ротора було виготовлене на токарному верстаті. Лопаті були закріплені болтами на ступиці, а зібрана конструкція «лопоть–ступиця» встановлена на вал двигуна постійного струму за допомогою кріплення ротора.

Була змонтована електрична схема, підключена до вітрогенератора (двигун постійного струму) та протестована. Двигун і схема були встановлені та прикручені до нижньої плити капсули за допомогою сталевих L-кліпсів. Капсула та ротор були зібрані та прикручені до вежі турбіни. Дерев'яні поверхні були відшліфовані та покриті лаком для оздоблення. Провід був підключений від двигуна через капсулу та вежу збірку до розподільної коробки живлення гібридної системи зрошення, як показано на рис. 3.8.



Рисунок 3.8 – Збірка вітротурбіни.

Система зберігання води та контролю вологості ґрунту. Зберігання води здійснюється за допомогою бакової системи, яка була спроектована та пофарбована антикорозійним засобом для запобігання іржі. Бак забезпечує водою для зрошення ферми. Проте потрібен контроль подачі води, щоб уникнути підтоплення або неконтрольованого поливу. Це досягається шляхом приєднання контрольного клапана до виходу водопровідної лінії з бака.

Соленоїдний клапан, використаний у цьому дослідженні, є системою 12 В постійного струму та здатен приймати сигнали керування від пристроїв перемикачів з номінальною напругою 12 В. Центральна система керування обробляє сигнали для відкриття та закриття клапана, як показано на рис. 3.9 а.

Система також оснащена датчиком вологості ґрунту, який спільно контролює процес зрошення на основі рівня сухості ґрунту. Датчик вологості ґрунту забезпечує аналоговий потік даних, що показує об'ємну вологість на різних глибинах, як показано на рис. 3.9 б.



Рисунок 3.9 – (а) Контроль зберігання та подачі води, (б) датчик вологості ґрунту.

Підключення гібридної сонячно-вітрової системи. Після виготовлення малої горизонтальної вітротурбіни (HAWT) її підключають до розумної сонячної системи зрошення. Сонячна енергетична система складається з двох сонячних панелей потужністю 20 Вт кожна, які можна переміщати за допомогою сонячного трекера для отримання вихідної потужності 40 Вт.

Два вихідні дроти від турбіни підключаються до мікропроцесора системи зрошення, який автоматично керує перемиканням між вітровою та сонячною енергією. Система зрошення використовує соленоїдний клапан для контролю подачі води шляхом моніторингу вологості ґрунту за допомогою пристроїв перемикання, підключених до мікропроцесорної системи керування. На мікроконтролері Arduino Uno були написані коди для зчитування даних про вологість ґрунту.

Контролер заряду, використаний у цьому дослідженні, — це контролер заряду з широтно-імпульсною модуляцією (PWM) на 12 А та акумулятор свинцево-кислотний 7,5 А·год / 12 В. Схематична діаграма гібридної системи зрошення з енергопостачанням показана на рис. 3.10.

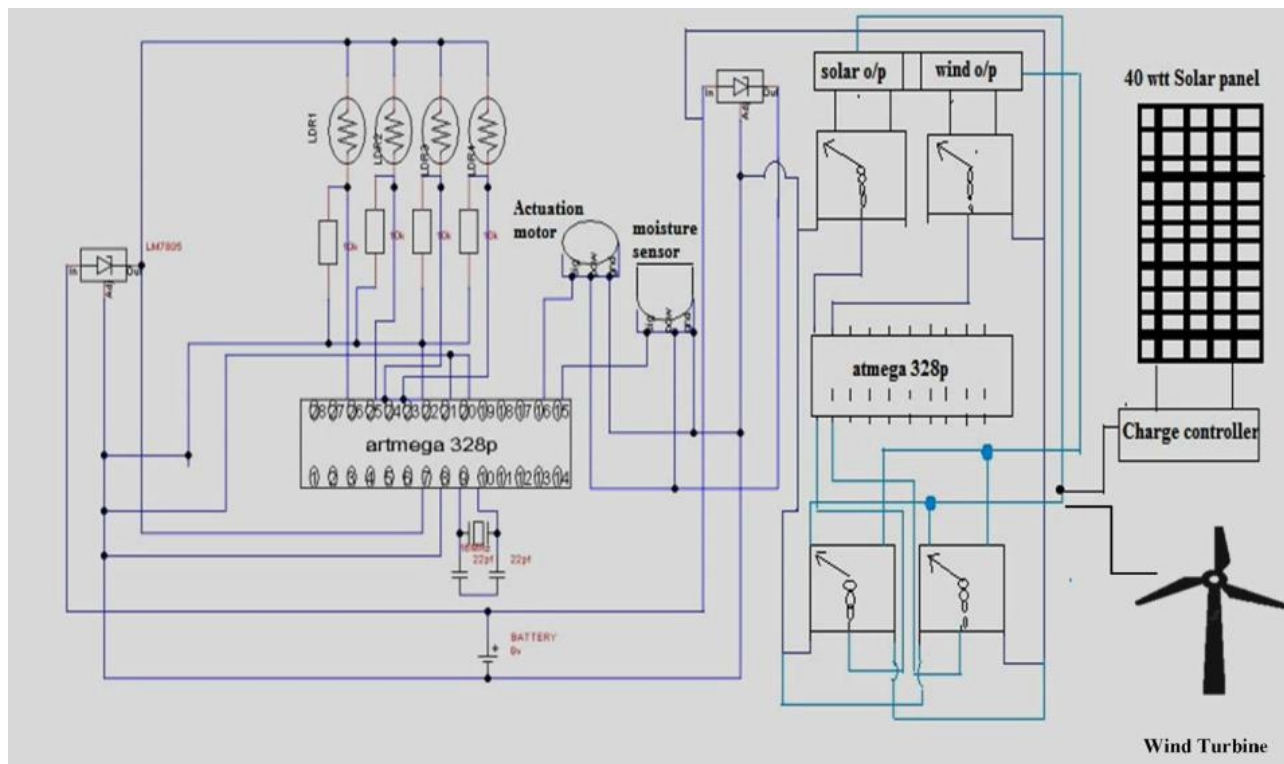


Рисунок 3.10 – Схема гібридної системи живлення.

Експериментальні варіації швидкості вітру. На основі зібраних даних про вітер було проведено аналіз для визначення розподілу швидкості вітру протягом 22 днів, як показано на рис. 3.11. З графіка видно, що середня швидкість вітру становить 0,7 м/с, найменша зафіксована швидкість – 0,1 м/с, а найбільша — 1,9 м/с.

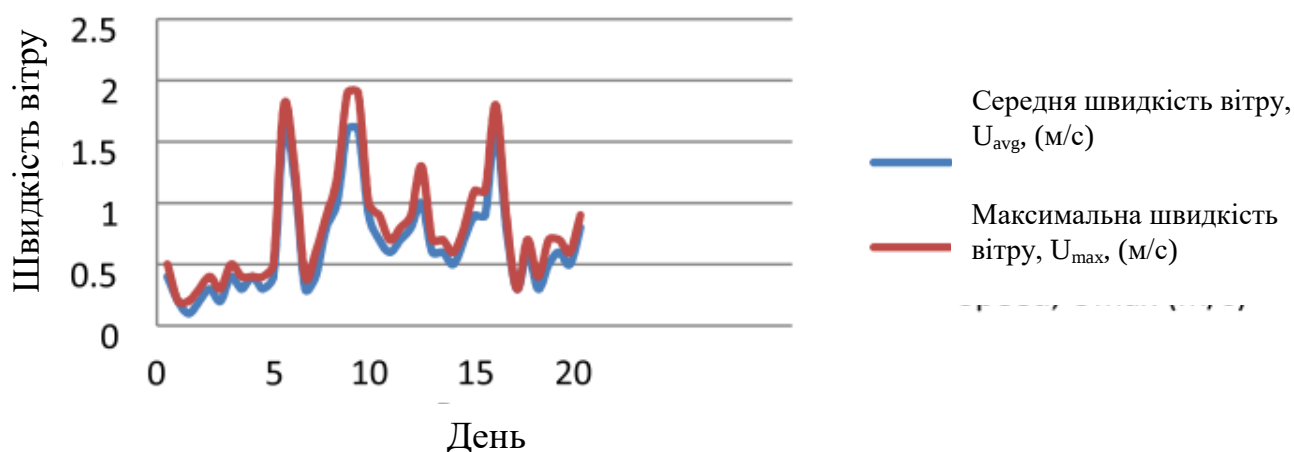


Рисунок 3.11 – Розподіл швидкості вітру протягом 40 днів.

Такий діапазон не дозволяє запускати вітротурбіну, оскільки він нижче пускової швидкості вітру 3 м/с; тому для проведення експерименту турбіни використовували вентилятор. З урахуванням топології та розташування

метеостанції на території університетського кампусу, ця локація не підходить для будівництва гібридної вітро-сонячної ферми.

Мала горизонтальна вітротурбіна має потужність 40 Вт. Швидкості вітру були виміряні та зафіксовані протягом 2 хвилин з інтервалом 10 секунд при трьох варіантах швидкості вентилятора: низька, середня та висока, як показано в таблиці 3.6. Ця таблиця дає середні швидкості 5 м/с, 10 м/с та 15 м/с для відповідних варіантів низької, середньої та високої швидкості вітру.

Таблиця 3.6 – Швидкості вітру при трьох варіантах швидкості вентилятора (м/с)

№	Низька	Середня	Висока
1	5,3	10,0	15,3
2	5,4	10,1	15,4
3	5,6	10,3	15,9
4	5,6	10,4	16,1
5	5,7	10,6	16,2
6	5,8	10,9	16,2
7	5,9	11,1	16,3
8	6,2	11,3	16,3

Продуктивність вітротурбіни. Електрична схема вітротурбіни була підключена до світлодіода потужністю 1 Вт для зчитування та запису струму та напруги за допомогою мультиметра при трьох варіантах швидкості вентилятора з інтервалом 10 секунд протягом 2 хвилин. Було відзначено, що певний час потрібен для стабілізації виходу, а струм був постійним і становив 3 А.

Таблиця 3.7 – Експериментальні потужності турбіни

№	Низька напруга (В)	Потужність (Вт)	Середня напруга (В)	Потужність (Вт)	Висока напруга (В)	Потужність (Вт)
1	12,6	37,8	13,0	39,0	13,3	39,9
2	12,7	38,1	13,1	39,3	13,4	40,2
3	12,7	38,1	13,1	39,3	13,6	40,8
4	12,8	38,4	13,2	39,6	13,7	41,1
5	12,9	38,7	13,3	39,9	13,8	41,4
6	13,0	39,0	13,5	40,5	14,0	42,0
7	13,3	39,9	13,7	41,1	14,3	42,9
8	13,3	39,9	13,9	41,7	14,5	43,5
9	13,4	40,2	14,0	42,0	14,6	43,8
10	13,5	40,5	14,1	42,3	14,6	43,8
11	13,7	41,1	14,2	42,6	14,7	44,1
12	13,7	41,1	14,3	42,9	14,8	44,4

У таблиці 3.7 наведено напругу та відповідну потужність турбіни при струмі 3 А. Очікується, що ці швидкості вітру забезпечать середню потужність відповідно 40 Вт, 41 Вт і 43 Вт.

На рис. 3.12, 3.13 та 3.14 показано залежність між швидкістю вітру та експериментальною потужністю турбіни для трьох варіантів вентилятора. Значення R^2 використовувалося для оцінки розсіювання значень потужності турбіни навколо побудованої регресійної лінії та для порівняння між рисунками. Можна зробити висновок, що низька швидкість вітру є найбільш придатною для виробництва стабільної потужності 40 Вт, оскільки значення R^2 розподілу потужності вітротурбіни найвище і становить 0,9602, що допомагає уникнути пошкодження компонентів турбіни через неконтрольовану швидкість вітру.

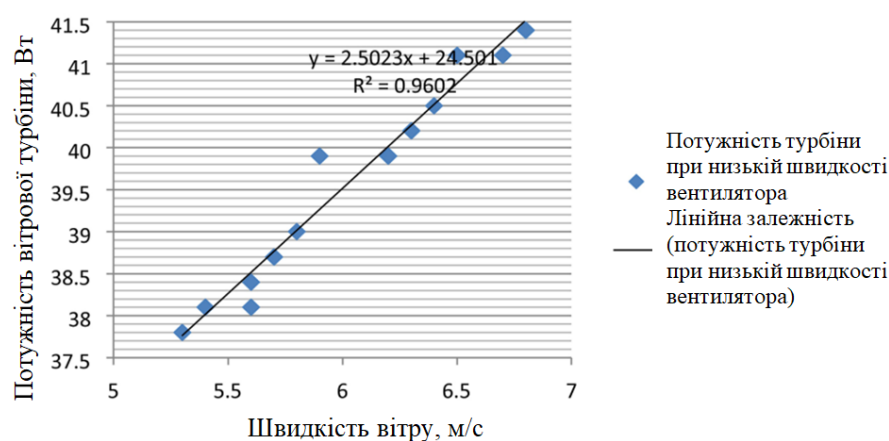


Рисунок 3.12 – Потужність вітротурбіни при низькій швидкості вітру.

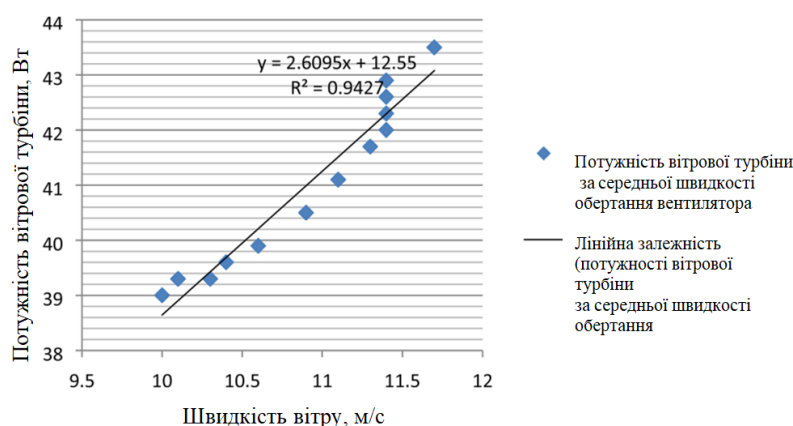


Рисунок 3.13 – Потужність вітрової турбіни за середньої швидкості вітру.

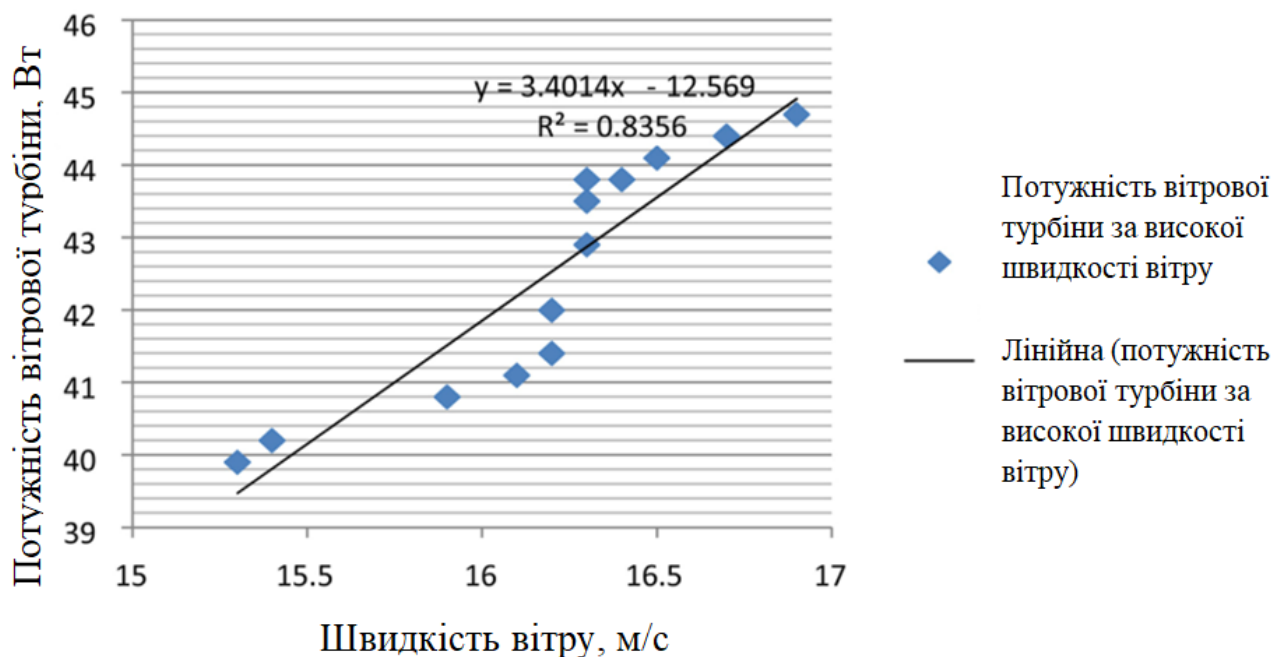


Рисунок 3.14 – Потужність вітрової турбіни за високої швидкості вітру.

3.3. Результати вимірювання вологості ґрунту під час експерименту

Функція серійного монітора в інтегрованому середовищі розробки надає додаткову можливість переглядати результати експерименту в реальному часі. Результати екрану серійного монітора для датчика інтенсивності сонячного світла та датчика вологості ґрунту показані на рис. 3.15.

COM7	
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.19%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.19%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.19%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.29%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.19%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.39%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.19%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.29%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.29%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.19%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.09%
Soil Moisture (in Percentage)	= 61.19%

Рисунок 3.15 – Знімок екрану серійного монітора під час вимірювання вологості ґрунту.

Моніторинг об'ємної вологості ґрунту оцінювався на основі результатів датчика інтенсивності сонячного світла та датчика вологості ґрунту. Для оцінки точності моделі використовувався корінь середньоквадратичної помилки (RMSE), як показано у рівнянні (3.15) [17].

$$RMSE = \sqrt{\frac{(R^2 - Y_i)}{n}} \quad (3.15)$$

де R^2 – це коефіцієнт детермінації між вимірним об’ємним вмістом вологи в ґрунті i -го зразка (R_i) та обчисленим об’ємним вмістом вологи (X_i), отриманим із використанням наявного датчика інтенсивності сонячного світла. Значення об’ємного вмісту вологи для глибини ґрунту 20, 30 та 50 см наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Об’ємний вміст вологи ґрунту за даними датчика

Передбачена глибина (см)	R^2	RMSE
20	0.85	1.76
30	0.88	0.88
50	0.95	0.39

Отже, мала горизонтально-осьова вітроелектрична установка (HAWT) була сконструйована з метою підвищення енергетичного потенціалу відновлюваної енергосистеми шляхом гібридного з’єднання з сонячною панеллю, яку використано для живлення системи зрошення з моніторингом вологості ґрунту.

За результатами експериментальної оцінки роботи створеної HAWT, потужність віротурбіни становила 40 Вт, 41 Вт і 43 Вт відповідно при трьох середніх швидкостях вітру – 5 м/с, 10 м/с і 15 м/с, виміряних ручним анемометром. Регресійний аналіз взаємозв’язку між потужністю турбіни та швидкістю вітру показав, що турбіна працює найефективніше при низькій швидкості 5 м/с, із коефіцієнтом детермінації $R^2=0,9602$, $R^2 = 0,9602$, $R^2=0,9602$.

Розроблена HAWT була застосована в системі зрошення, де об’ємний вміст вологи ґрунту визначався на глибинах 20, 30 і 50 см із відповідними значеннями $R^2=0,85$; $R^2 = 0,85$; $R^2=0,95$.

Отримані результати показали, що за наявності достатньої швидкості вітру та прийнятної висоти вежі така вітроелектрична установка здатна забезпечити альтернативне, стаке й економічно ефективне джерело електроенергії.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

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 спеціалізацій, 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 сталлю 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):

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

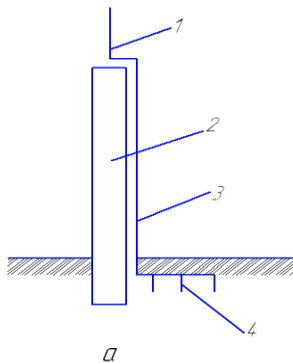


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач,

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:

$$Nb = \frac{L}{2R_0}, \text{ шт,} \quad Nb = \frac{86}{2 \cdot 4} = 11 \text{ шт.}$$

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. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ

5.1 Розрахунок економічної ефективності вітроелектричної установки (ВЕУ)

У цьому підрозділі виконано розрахунок економічної ефективності впровадження вітроелектричної установки (ВЕУ) для системи енергозабезпечення.

Цілю роботи є визначення економічних показників доцільності використання енергії вітру для автономного або частково автономного електропостачання системи господарства.

Використання вітрової енергії дозволяє суттєво зменшити витрати на закупівлю електроенергії з мережі, підвищити енергетичну незалежність ферми та скоротити негативний вплив на довкілля.

Визначення вартості виробленої електроенергії

Вартість електроенергії, яку виробляє вітроелектрична установка, визначається за формулою:

$$B_{\text{ел}} = E_{\text{ел}} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (5.1)$$

де $E_{\text{ел}}$ – кількість виробленої електроенергії, кВт·год; $C_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн.

За умови, що вітроустановка виробляє $E_{\text{ел}} = 3438$ кВт·год, а тариф становить $C_{\text{ел}} = 4,32$ грн/кВт·год, вартість електроенергії становитиме:

$$B_{\text{ел}} = 3438 \cdot 4,32 = 14\,845,56 \text{ грн.}$$

Таким чином, річний економічний еквівалент виробленої енергії однією вітроелектричною установкою складає близько 14,8 тис. грн.

Розрахунок номінальної потужності вітроустановки

Номінальна потужність визначається за розрахунковими енергетичними показниками, що враховують середньорічну швидкість вітру у даному регіоні, ККД генератора, втрати у системі перетворення та коефіцієнт використання встановленої потужності.

Розрахункова номінальна потужність ВЕУ для різних варіантів частки заміщення споживання електроенергії наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Номінальна потужність ВЕУ при різних рівнях заміщення

Відсоток заміщення	Номінальна потужність, кВт
50%	1,35
70%	1,89
30%	0,81
90%	2,43

З наведених даних видно, що оптимальним з точки зору енергозабезпечення ферми є варіант із 70 % заміщення – потужність установки 1,89 кВт забезпечує стабільне виробництво електроенергії протягом року при помірних витратах на обладнання.

Розрахунок вартості вітроелектричної системи

Вартість вітроелектричної установки залежить від її потужності, типу генератора, конструкції щогли, системи контролю та акумуляторного блоку. Для порівняння прийнято укрупнені показники вартості обладнання (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Вартість вітроелектричної установками різних рівнях заміщення

Відсоток заміщення	Вартість системи, грн
50%	103 610
70%	146 263
30%	59 440
90%	187 397

Як видно, вартість зростає пропорційно до встановленої потужності. Найекономічнішим у відношенні "вартість/потужність" є варіант із 70 % заміщення,

який забезпечує оптимальний баланс між капітальними вкладеннями та кількістю виробленої електроенергії.

Розрахунок терміну окупності вітроелектричної установки

Економічну ефективність інвестицій у ВЕУ оцінюють за показником терміну окупності капіталовкладень, який визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{Z_{кап}}{E_p - B_{нв}} \quad (5.2)$$

де $Z_{кап}$ – капітальні витрати на систему, грн; E_p – річний економічний ефект, грн; $B_{нв}$ – вартість недовиробленої електроенергії, грн.

Підставивши розрахункові значення для ВЕУ:

$$T_{ок} = \frac{244333}{(30093 - 5689)} = 10,01 \text{ років}$$

Отже, термін окупності вітроелектричної установки становить близько 10 років. Цей показник можна вважати прийнятним для об'єктів сільськогосподарського призначення, з урахуванням тривалого терміну експлуатації обладнання (15-20 років).

Аналіз економічної доцільності використання ВЕУ

Аналіз розрахунків показує, що встановлення вітроелектричної установки є економічно доцільним рішенням для енергозабезпечення ферми, особливо у регіонах із середньорічною швидкістю вітру понад 4-5 м/с.

Основні переваги ВЕУ:

- зниження витрат на електроенергію з центральної мережі до 60-70 %;
- тривалий термін служби установки (до 20 років);
- низькі експлуатаційні витрати після монтажу; ф
- екологічна безпечність і зменшення викидів CO₂.

Серед недоліків можна відзначити:

- залежність виробітку від швидкості вітру;
- необхідність періодичного технічного обслуговування механічних елементів;
- потребу у стабільному фундаменті й достатній висоті щогли (10-20 м).

Отже, відносно ефективності ВЕУ

На основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що:

- оптимальним варіантом для умов тваринницької ферми є вітроелектрична установка потужністю 1,8-2,0 кВт, яка забезпечує до 70 % потреб господарства в електроенергії;
- термін окупності капітальних вкладень становить приблизно 10 років, після чого вироблена електроенергія є фактично безкоштовною;
- використання ВЕУ сприяє підвищенню енергетичної автономності ферми, зменшенню впливу на довкілля та підвищенню конкурентоспроможності агровиробництва.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У результаті виконаної роботи досягнуто поставлену мету – розроблено методи та засоби оптимізації активного складу вітроелектричної системи (ВЕС), що дозволяють ефективно розв’язувати задачу керування з урахуванням відхилень потужності генерації та одночасним зменшенням кількості комутацій. Основні результати дослідження можна сформулювати наступним чином:

Формалізовано задачу багатопараметричної оптимізації енергодинамічних процесів у гібридній вітро-сонячній системі електропостачання, яка включає вітроелектричні установки, сонячні панелі, акумуляторний елемент та споживачів енергії. Використання математичного моделювання параметрів режиму роботи забезпечило можливість глибоко дослідити алгоритми оптимального керування з урахуванням стохастичних змін енергетичного потенціалу вітру та сонця.

Запропоновано введення нового параметра – мінімального інтервалу між послідовними змінами активного складу ВЕС. Це дало змогу уточнити межі зменшення кількості комутацій (вмикань/вимикань) вітроелектричних установок у випадках різких змін швидкості вітру за умови недостатнього генерування сонячними панелями.

Досліджено вплив введеного параметра на режими роботи гібридної системи електропостачання. Встановлено залежності між мінімальним інтервалом, кількістю комутацій та середнім відхиленням потужності генерації для заданих технічних характеристик системи.

Верифікацію результатів здійснено за допомогою імітаційного моделювання, що дозволило визначити оптимальні режими роботи системи залежно від обмежень на кількість комутацій, структури системи та параметрів її елементів.

Отримано статистичні характеристики функціонування гібридної системи, зокрема залежності часу підтримки живлення споживача від

імовірності втрати електропостачання. Це забезпечує можливість кількісної оцінки надійності системи.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для оптимізації керування існуючими гібридними системами електропостачання, а також для обґрунтування параметрів елементів при проєктуванні нових енергоефективних систем.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. 135 с.
2. Гальчак В. П., Дмитрів Г. М. Розрахунок енергетичних параметрів гібридної системи теплопостачання фермерського будинку. Метод. вказівки до виконання курсового проекту. Львів, ЛДАУ, 2005. 36 с.
3. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. Львів: "Магнолія 2006", 2008. 188 с.
4. Жуковський С. С., Лабай В. Й. Системи енергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: Навч. пос. для ВЗО. Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. 259 с.
5. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
6. Кудря С. О., Головка В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2011. 184 с.
7. Малярєнко В. А. Основи теплофізики будівель та енергозбереження. Підручник. 2-е видання. Х.: Видавництво САГА, 2010. 484 с.
8. Малярєнко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс. Х.: В-во САГША, 2008. 320 с.
9. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.
10. <https://uniclimate.com.ua/products/teplovi-nasosy-dlya-pryvatnogo-budynku/cooperhunter-unitherm-3-all-in-one-ch-hp12wtsirk3/>
11. <https://uniclimate.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/instrukciya-unitherm3-aio-ua.pdf>

12. https://cooperhunteraircon.com/?gclid=Cj0KCQjw7aqkBhDPArisAKGa0oLWwriPnZqdYFkAdTEGwILGKZiUW6zYhudeqKqlb11QuAZmcjiDyL0aAqmlEALw_wcB
13. R. K. Sarojini, K. Palanisamy and E. De Tuglie, “A fuzzy logic- based emulated inertia control to a supercapacitor system to improve inertia in a low inertia grid with renewables,” *Energies*, Vol. 15, no. 4, Article ID 1333, 2022.
14. O. Abdel-Rahim and E. Abdelhameed, “Ultimate transformerless boost DC-DC converter for renewable energy applications,” *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, Vol. 2, no. 2, pp. 63–69, 2021.
15. J. B. Holm-Nielsen, and D. Almakhlles, “A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications-controller in loop simulation validation,” *Energies*, Vol. 13, No. 3, P. 755, 2020.
16. V. Burlaka, S. Gulakov, S. Podnebennaya, E. Kudinova, and O. Savenko, “Bidirectional single stage isolated DC-AC converter,” in *Proceedings of the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, PP. 343–346, IEEE, Kharkiv, Ukraine, 2020, October.
17. S. Deshmukh, A. R. Thorat, and I. Korachagaon, “Modelling and analysis of PV standalone system with energy management scheme,” in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, PP. 1–5, IEEE, Bangalore, India, 2020, July.
18. K. Amer, M. Fakher, S. Ahmad, M. Irhouma, S. Altafbao and E. Salem, “Performance of domestic solar heating system with thermal storage using phase change materials,” *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 16, no. 9, PP. 01–11, 2020.
19. E. S. Harsha, R. K. Nema, S. Nema, and R. D. Kulkarni, “Design & Simulation of high gain ratio Bidirectional converter for energy storage applications,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, pp. 1–6, IEEE, Keonjhar, India, 2020, July.

20. Y. Nassar, S. Alsadi, K. Amer, A. Yousef, and M. Fakher, “Numerical analysis and optimization of area contribution of the PV cells in the PV/T flat-plate solar air heating collector,” *Solar Energy Research Update*, Vol. 6, PP. 43–50, 2019.