

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:

**«ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО
ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА З
ВИКОРИСТАННЯМ ОБЛАДНАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ
ЕНЕРГЕТИКИ»**

Виконав: студент 7-го курсу

групи Ен-71з із спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

Біляк А. О.

Керівник: _____ к.т.н., доцент Бабич М. І.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЗАОЧНОЇ
ТА ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ
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**

Біляку Андрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів системи резервного енергозабезпечення підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики»

керівник роботи: к.т.н., доцент Бабич М. І.

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

затверджені наказом ЛНУП №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. Загальні відомості, щодо використання фото- та вітроенергетики в Україні для системи резервного енергозабезпечення підприємства.

4.2. Визначення потенціалу сонячної радіації та вітропотенціалу місцевості де знаходиться об'єкт енергоживлення системи резервного енергозабезпечення підприємства.

4.3 Розрахунок фото- та вітроелектричної станції з урахуванням можливості роботи з мережею для системи резервного енергозабезпечення підприємства.

4.4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

4.5. Енергетичний розрахунок потужності та виробітку фотоелектричною та вітроелектричною станцій для системи резервного енергозабезпечення підприємства.

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>Загальні відомості, щодо використання фото- та вітроенергетики в Україні для системи резервного енергозабезпечення підприємства</i>	28.02.2025 – 22.09.2025	
2	<i>Визначення потенціалу сонячної радіації та вітропотенціалу місцевості де знаходиться об'єкт енергоживлення системи резервного енергозабезпечення підприємства</i>	23.09.2025 – 29.09.2025	
3	<i>Розрахунок фото- та вітроелектричної станції з урахуванням можливості роботи з мережею для системи резервного енергозабезпечення підприємства</i>	03.10.2025 – 13.10.2025	
4	<i>Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях</i>	14.10.2025 – 24.10.2025	
5	<i>Енергетичний розрахунок потужності та виробітку фотоелектричною та вітроелектричною станцій для системи резервного енергозабезпечення підприємства.</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 _____ Андрій БІЛЯК
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Михайло БАБИЧ
 (підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 631.3.45.9

Біляк А. О. «Обґрунтування параметрів системи резервного енергозабезпечення підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025 р. 50 с. текстової частини, 15 таблиць, 16 рисунків, 25 джерел посилання.

У роботі розглянуто питання обґрунтування параметрів системи резервного енергозабезпечення підприємства із застосуванням обладнання відновлювальної енергетики. Основна увага приділена аналізу можливостей використання обладнання ВДЕ і систем, як альтернативних джерел живлення у випадках аварійного або планового відключення від основної мережі. Проведено оцінку енергетичних ресурсів місцевості, визначено потенціал сонячної радіації та вітропотенціал, необхідні для ефективної роботи резервної системи. Розроблено структурну схему інтеграції ВДЕ з мережею підприємства, а також виконано розрахунок основних параметрів системи з урахуванням її здатності забезпечувати стабільне енергопостачання споживачів.

РЕЗЕРВНЕ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СТАБІЛЬНІСТЬ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ МАЛОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА ФОТОЕНЕРГЕТИКИ.....	9
1.1 Вітроенергетика, як джерело відновлюваної енергії.....	9
1.2 Сонячна енергетика як джерело відновлюваної енергії.....	10
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОБРАНОЇ МІСЦЕВОСТІ.....	12
2.1 Вибір місця розташування системи резервного енергозабезпечення підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики.....	12
2.2 Розподіл Вейбулла.....	13
2.3 Оцінка інсоляції на нахилену поверхню.....	15
2.4 Аналіз графіку навантаження підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики.....	17
РОЗДІЛ 3. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВІТРО- ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	19
3.1 Аеродинамічний розрахунок ротора вітроустановки.....	19
3.2 Вибір обладнання ВЕС та ФЕС.....	31
3.3 Розрахунок фотоелектростанції	32
3.4 Аналіз річного виробітку енергії.....	37
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	41
4.1 Організація роботи служби з охорони праці та довкілля.....	41
4.2 Протипожежна безпека і грозовзахист.....	42
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЛАДНАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.....	43

5.1	Оцінка економічної ефективності використання системи резервного енергозабезпечення підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики.....	43
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	46
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ.....	48

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості та підприємницької діяльності неможливий без стабільного енергопостачання. Безперебійна робота виробничих процесів, технологічного обладнання, систем автоматизації та інформаційних комплексів потребує надійного джерела електроенергії. Проте в умовах зростання навантаження на енергетичну систему України, дефіциту генеруючих потужностей та частих відключень електроенергії особливої актуальності набуває питання резервного енергозабезпечення підприємств.

Традиційні системи резервного живлення (дизельні або бензинові генератори) характеризуються значними експлуатаційними витратами, високим рівнем шуму, викидами шкідливих речовин та залежністю від постачання палива. У зв'язку з цим усе більшого поширення набувають системи резервного енергозабезпечення з використанням обладнання відновлюваної енергетики — сонячних панелей, вітроустановок та гібридних систем накопичення енергії. Такі системи забезпечують не лише стабільність енергопостачання, але й сприяють енергетичній незалежності підприємств, зменшенню витрат на електроенергію та покращенню екологічної ситуації.

Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у резервних системах дозволяє ефективно акумулювати надлишки енергії, зменшувати навантаження на мережу, а також забезпечувати автономну роботу критично важливих споживачів під час аварій або відключень. Крім того, це повністю відповідає пріоритетним напрямам розвитку енергетики України, визначеним у Національній стратегії сталого розвитку та Програмі енергоефективності.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування параметрів фото- та вітроелектричної станції з урахуванням можливості роботи з мережею для системи резервного енергозабезпечення підприємства.

Для досягнення цієї мети було визначено наступні завдання:

1. Здійснити аналіз сучасного стану фотоенергетики та малої вітроенергетики, а також окреслити перспективні напрями їх розвитку;

2. Оцінити потенціал сонячної радіації та вітрових ресурсів у районі розміщення об'єкта енергопостачання;
3. Виконати розрахунок фотоелектричної та вітроелектричної станцій із урахуванням можливості їхньої паралельної роботи з електричною мережею;
4. Провести енергетичний аналіз отриманих результатів розрахунків.

Об'єктом кваліфікаційної роботи є обґрунтування параметрів фото- та вітроелектричної станції з урахуванням можливості роботи з мережею для системи резервного енергозабезпечення підприємства.

Предметом кваліфікаційної роботи є обґрунтування параметрів фото- та вітроелектричної станції з урахуванням можливості роботи з мережею для системи резервного енергозабезпечення підприємства.

РОЗДІЛ 1

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ МАЛОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА ФОТОЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Вітроенергетика, як джерело відновлюваної енергії

Енергія вітру посідає важливе місце серед відновлюваних джерел енергії завдяки своїй екологічності, відновлюваності та здатності забезпечувати значні обсяги генерації. Вона розглядається як перспективна альтернатива традиційним енергоресурсам у контексті зростання цін на паливо та необхідності скорочення викидів CO₂. Поряд із розвитком великих вітрових ферм дедалі більшої уваги набувають малі вітрові турбіни, які забезпечують децентралізоване, гнучке та надійне енергопостачання. Такі установки дозволяють споживачам генерувати власну електроенергію, зменшуючи втрати під час передачі та підвищуючи енергетичну незалежність.

За даними Всесвітньої вітроенергетичної асоціації, світова встановлена потужність вітрових турбін у 2018 році досягла 600 ГВт, що свідчить про стрімкий технологічний розвиток галузі. Малі вітрові турбіни дедалі частіше застосовуються у побутових, фермерських, офшорних та автономних енергетичних системах, демонструючи стабільне зростання встановленої потужності у світі. Станом на 2015 рік їхня сукупна потужність перевищила 948 МВт, що на 14% більше, ніж попереднього року, а середня одинична потужність турбін постійно зростає завдяки вдосконаленню конструкції лопатей, генераторів і систем керування. Це робить малі вітроустановки ефективнішими, надійнішими та доступнішими для приватних споживачів і малого бізнесу.

Попри позитивні тенденції, сектор малої вітроенергетики стикається з низкою викликів, серед яких — висока вартість обладнання, відсутність стандартизації, а також потреба у чітких правових та економічних механізмах підтримки. Вирішальну роль у розвитку галузі відіграють політичні стимули:

«зелені» тарифи, податкові пільги, субсидії та програми фінансування. Очікується, що у майбутньому поширення малих вітрових систем особливо активно відбуватиметься у країнах, що розвиваються, сприяючи електрифікації віддалених територій і підвищенню енергетичної незалежності.

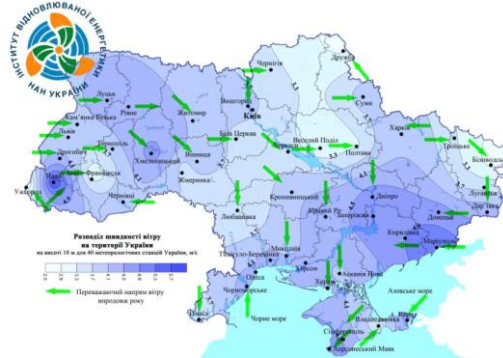


Рисунок 1.1 – Розподіл швидкості вітру на території України [5]

В Україні розвиток малої вітроенергетики відбувається повільними темпами, переважно завдяки приватним інвесторам. Незважаючи на значний потенціал вітрових ресурсів (рис. 1.1), кількість малих вітроустановок залишається обмеженою, а їх сумарна потужність — незначною. Найсприятливіші умови для використання таких систем спостерігаються у південних, гірських та прибережних регіонах, де швидкість вітру є найвищою.

Малі вітротурбіни мають особливе значення для електрифікації віддалених сільських районів, де будівництво традиційних енергетичних мереж є економічно невиправданим. Для активізації розвитку цієї галузі в Україні необхідні комплексна державна підтримка, стимулювання інвестицій, а також налагодження власного виробництва вітроустановок, що сприятиме підвищенню енергетичної безпеки та сталому розвитку країни.

1.2 Сонячна енергетика як джерело відновлюваної енергії

Сонячна енергетика наразі забезпечує близько 3,6% світового виробництва електроенергії, але є важливою складовою відновлюваних джерел енергії, займаючи майже 31% від загальної встановленої потужності у 2022

році, поступаючись лише гідроенергетиці. Фотоелектричні системи застосовуються від малих побутових пристроїв до великих електростанцій, а сектор демонструє середньорічне зростання близько 49,5% завдяки технологічним інноваціям, підвищенню ефективності панелей та державним стимулам. У 2022 році світове виробництво сонячної енергії зросло на 26%, досягнувши майже 1300 ТВт·год, а ринок фотовольтаїчних систем оцінювався у 150 млрд доларів США з прогнозом зростання до 383,78 млрд доларів до 2032 року, при цьому активне зростання очікується у Європі та регіоні Азії, зокрема України рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Розподіл сумарної радіації сонячної радіації України [11]

Загальна потужність встановлених систем може зрости майже в шість разів до 2030 року, досягаючи 2840 ГВт, при цьому комунальні проекти складатимуть близько 60% потужності, а дахові установки також активно розвиватимуться. Україна має значний потенціал для розвитку сонячної та вітрової енергетики завдяки сприятливим природним умовам і географічному розташуванню, а стабільне зростання сектору домашніх сонячних станцій і розвиток малих вітроустановок сприяють підвищенню енергетичної незалежності; для подальшого розвитку цих секторів необхідно створити сприятливі умови для інвесторів, вдосконалити нормативно-правову базу та забезпечити державну підтримку через стимули та субсидії.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОБРАНОЇ МІСЦЕВОСТІ

2.1 Вибір місця розташування системи резервного енергозабезпечення підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики

Вибір місця розташування енергозабезпечення підприємства у м. Львові із застосуванням обладнання відновлювальної енергетики ґрунтується на поєднанні технічних, кліматичних та економічних чинників. Львів має сприятливі умови для впровадження сонячних фотоелектричних систем: середньорічна сонячна радіація становить близько 1100–1250 кВт·год/м², що забезпечує ефективну роботу сонячних панелей упродовж більшої частини року. Оптимальним є розміщення сонячних установок на дахах або відкритих промислових майданчиках з орієнтацією на південь і кутом нахилу близько 35–40°, що відповідає географічній широті міста.

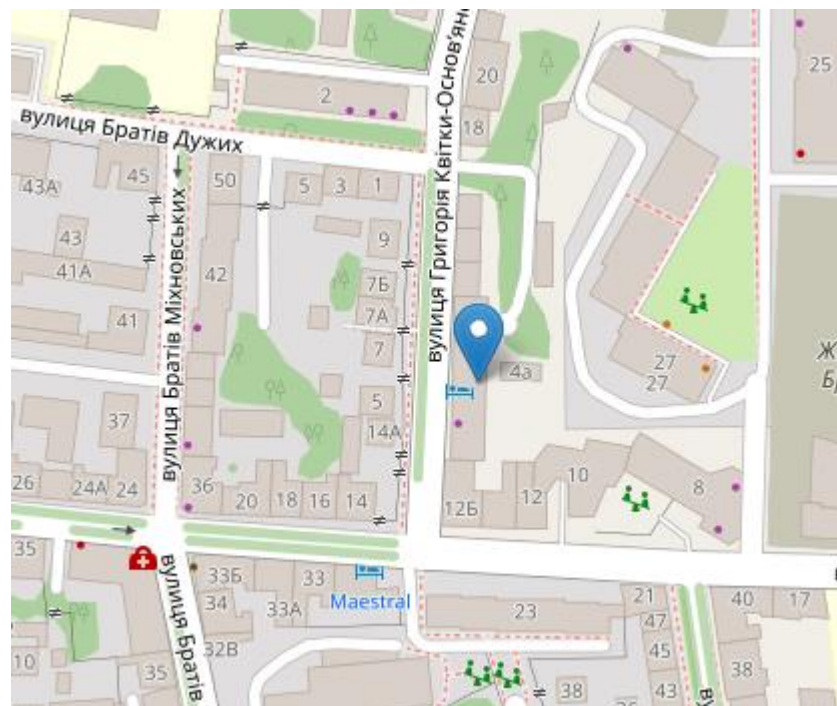


Рисунок 2.1 – Розміщення системи резервного енергозабезпечення підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики__

Крім того, Львівська область характеризується наявністю помірних вітрових потоків (середня швидкість вітру 3,5–5 м/с), що дозволяє розглядати

встановлення малопотужних вітроустановок для покриття нічних або пікових навантажень. Для забезпечення стабільного електропостачання доцільно створити гібридну енергетичну систему, яка поєднує сонячну, вітрову та резервну мережеву енергію з системами накопичення. Таке рішення дозволить підприємству у Львові підвищити енергонезалежність, зменшити експлуатаційні витрати та скоротити викиди парникових газів відповідно до екологічних стандартів ЄС.

2.2 Розподіл Вейбулла

Розподіл Вейбулла — це універсальна статистична модель, що завдяки своїй гнучкості та двом параметрам — масштабу (c) та форми (k) — застосовується для точного опису ймовірнісного розподілу швидкостей вітру в різних кліматичних умовах, а саме:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (2.1)$$

де $p(v)$ — густина ймовірності повторення швидкості вітру зі значенням v — швидкість вітру, м/с; c — параметр масштабу розподілу Вейбулла, який визначається за формулою (2.2).

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (2.2)$$

де $\Gamma(1+1/k)$ — гамма-функція, а $\bar{v}$ — середня швидкість вітру, що визначається за формулою (2.3).

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (2.3)$$

де v_i — значення швидкості вітру i -го вимірювання, отримане за результатами метеорологічних спостережень за певний період (м/с); n — загальна кількість спостережень; k — параметр форми розподілу Вейбулла, який характеризує асиметрію кривої та визначається за формулою (2.4).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\vartheta_c} \right) \quad (2.4)$$

де c — коефіцієнт масштабу; ϑ_c — середня швидкість вітру; σ — середньоквадратичне відхилення швидкості вітру, яке визначається за виразом (2.5).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}\right)^2} \quad (2.5)$$

Для виконання розрахунків у межах проєкту було використано погодинні дані швидкості вітру, зафіксовані на висоті 25 м протягом року [15]. У середовищі MATLAB проведено обчислення середнього значення та середньоквадратичного відхилення швидкості вітру. За отриманими результатами середня швидкість вітру становить 5,275 м/с. Параметр форми k дорівнює 2,68, а параметр масштабу $c = 6,24$. На основі цих даних про річну повторюваність швидкостей вітру побудовано гістограму, подану на рис. 2.2.

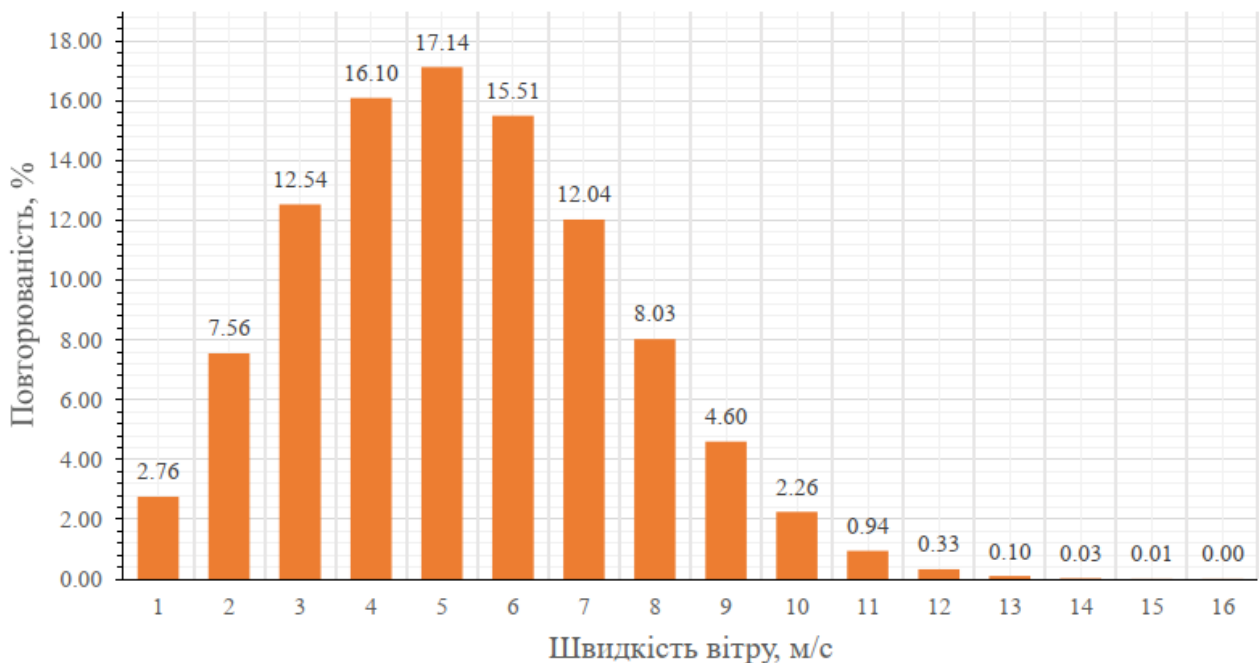


Рисунок 2.2 — Розподіл швидкостей вітру для обраної місцевості

Аналіз розподілу швидкостей вітру за допомогою гістограми ймовірностей та моделі Вейбулла дав змогу виявити основні закономірності вітрової активності. Найбільш типовою швидкістю вітру протягом року є 5 м/с, що спостерігається приблизно у 17,14% випадків. Основний інтервал швидкостей становить від 2 до 10 м/с, що охоплює переважну частину річних спостережень, тоді як значення нижче 1 м/с не враховувалися через їх незначну

частку. Модель Вейбулла дозволяє розрахувати потенціал генерації потужності для кожного діапазону швидкостей і точніше оцінити річний виробіток електроенергії. Такий підхід сприяє оптимізації роботи вітрових електростанцій, підвищенню стабільності енергопостачання та ефективніший інтеграції вітрових установок у загальну енергомережу.

2.3 Оцінка інсоляції на нахилену поверхню

Оцінку інсоляції на нахилену поверхню виконують за методикою [16], враховуючи основний чинник — кут схилення, тобто кут між напрямком на Сонце та площиною екватора, який визначається за формулою Купера (2.6).

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (2.6)$$

Параметр n позначає порядковий номер дня в межах календарного року. Після визначення кута схилення здійснюється обчислення коефіцієнта транспозиції. Цей коефіцієнт (формула 2.7) використовується для перерахунку інтенсивності дифузної складової сонячної радіації.

$$R_D = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.7)$$

Кут встановлення фотоелектричних панелей (β) у даній роботі прийнято рівним 35° , що є оптимальним для даної місцевості та забезпечує максимальне надходження сонячної енергії протягом року, причому перерахунок інтенсивності прямої радіації виконується за формулою (2.8).

$$I_{Bt} = I_B \cdot \cos \theta \quad (2.8)$$

Під позначенням B_t розуміють інтенсивність прямої сонячної радіації. Позначення θ відповідає куту між напрямком сонячного випромінювання та нормаллю до похилої поверхні. Значення цього кута визначається за формулою (2.9):

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos \alpha + \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot \cos(z - z_s) \quad (2.9)$$

Позначення α відповідає висоті Сонця над горизонтом, яка визначає його положення у небесній сфері протягом дня. Параметр z характеризує азимут Сонця, тобто напрямок на нього відносно півдня, виміряний у горизонтальній площині. Величина z_s позначає азимут проекції нормалі до досліджуваної поверхні на горизонтальну площину, що використовується для оцінки орієнтації поверхні відносно сонячного випромінювання.

Урахування цих параметрів є необхідним для точного визначення інтенсивності сонячного потоку, який потрапляє на нахилену поверхню.

Інтенсивність відбитого від поверхні ландшафту випромінювання, що досягає похилої поверхні, розраховується за формулою (2.10), яка дозволяє врахувати вплив альбедо ґрунту та навколишнього середовища на загальну енергію сонячного надходження.

$$I_{Rt} = \frac{(1 - \cos \beta) \cdot \rho \cdot (I_B + I_D)}{2} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт відбиття (альбедо) ρ визначено на основі річних даних [17] із розрахунком середніх місячних значень, а повна сонячна радіація на похилу поверхню визначається як сума прямої I_{Bt} (2.8), дифузної I_D та відбитої I_{Rt} (2.10) компонент за формулою (2.11).

$$I_t = I_{Bt} + I_D \cdot R_D + I_{Rt} \quad (2.10)$$

Для розрахунків використано погодинні середньодобові метеодані сонячної радіації [11], інтерпольовані для підвищення точності, на основі яких побудовано профіль інсоляції протягом року (рис. 2.3), що показує мінімальне надходження енергії у грудні через низький кут підйому Сонця та короткий світловий день.

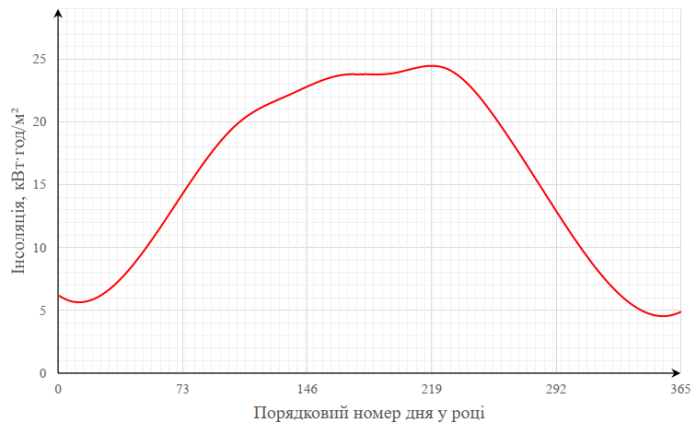


Рисунок 2.3 – Погодинний розподіл інсоляції на приймальну поверхню

2.4 Аналіз графіку навантаження підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики

Початковим етапом проєктування вітрової та сонячної електростанції є аналіз навантаження споживача, що дає змогу визначити середньодобові та пікові показники споживання електроенергії, зокрема встановлено, що у грудні середньодобове навантаження досягає максимального значення – 63,35 кВт·год (рис. 2.4).

Для розрахунку джерела генерації енергії важливо враховувати максимальне пікове навантаження, яке наочно показане на рис. 2.5 через середнє погодинне споживання у грудні, коли основна частина навантаження припадає на робочий час закладу з 9:00 до 22:00, формуючи високі піки електроспоживання.

Львів обрано, як місце розташування закладу швидкого харчування через сприятливі умови для використання відновлюваних джерел енергії, зокрема високий рівень сонячної активності та стабільний вітер, найчастіше зі швидкістю 5 м/с (повторюваність 17,14%), при основному діапазоні від 2 до 10 м/с.

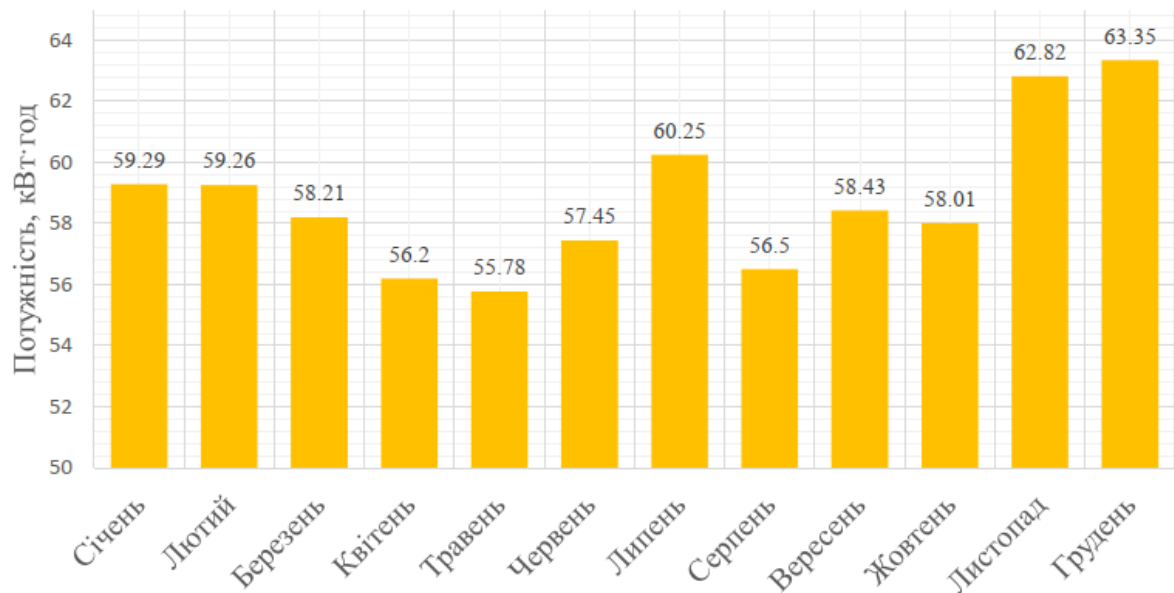


Рисунок 2.4 – Середньодобове щомісячне споживання електроенергії підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики

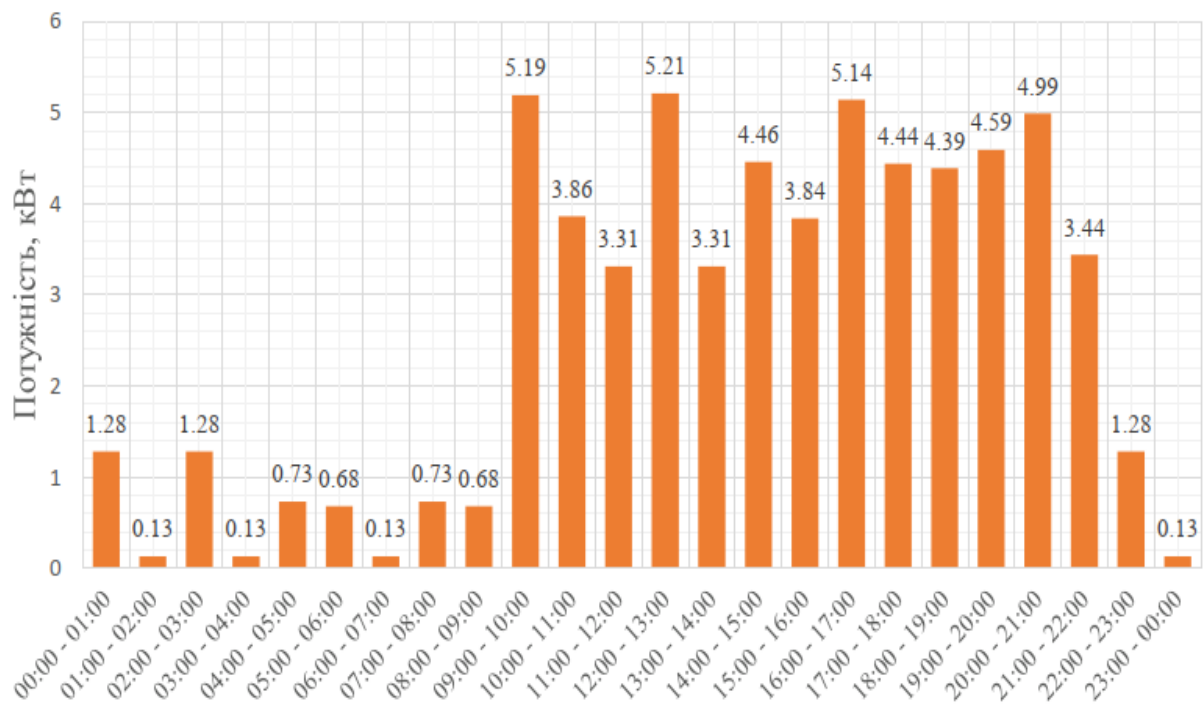


Рисунок 2.5 – Погодинне навантаження для дня у грудні

Для розрахунків інсоляції використано оптимальний кут нахилу поверхні 35° , при цьому грудень є місяцем з мінімальною сонячною радіацією через низький кут підйому Сонця. Аналіз графіку навантаження закладу показав, що найбільше середньодобове споживання електроенергії спостерігається в грудні (63,35 кВт·год), а максимальне пікове навантаження протягом доби досягає 5,21 кВт о 12:00, зосереджуючись переважно у робочий час з 9:00 до 22:00.

Проектування вітроустановки та фотоелектростанції враховує розподіл швидкостей вітру та інсоляції і дозволяє забезпечити значну частину енергетичних потреб закладу.

РОЗДІЛ 3. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВІТРО- ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Аеродинамічний розрахунок ротора вітроустановки

Для приведення отриманих даних до висоти розташування осі ротора використовують формулу Д. Т. Лайхтмана, що враховує зміну швидкості вітру з висотою. Це дозволяє точніше визначити вітроенергетичний потенціал обраного об'єкта.

$$v = v_{cp} \cdot \frac{\log\left(\frac{h}{h_0}\right)}{\log\left(\frac{h_1}{h_0}\right)} = 5,275 \cdot \frac{\log\left(\frac{20}{25}\right)}{\log\left(\frac{10}{0,05}\right)} = 5,086 \text{ м/с}$$

Позначимо через v швидкість вітру на висоті h , яку необхідно визначити. Швидкість вітру v_1 вимірюється поблизу земної поверхні на висоті h_1 . Параметр h_0 характеризує висоту, на якій швидкість вітру дорівнює нулю, і залежить від шорсткості підстильної поверхні: для снігового покриву вона становить близько 0,5 см, для ділянок із низькою травою – приблизно 3,2 см, а для місцевостей із високою рослинністю – 5–7 см (максимальне значення – 20 см). На основі цих параметрів виконаємо розрахунок номінальної швидкості вітру:

$$v = 1,966 \cdot v = 1,966 \cdot 5,086 = 10 \text{ м/с}$$

З урахуванням пікового навантаження, яке становить 5,21 кВт, попередньо обираємо вітрогенератор потужністю 5 кВт. Відповідно до розподілу Вейбула, у вибраній місцевості швидкість вітру зазвичай змінюється в межах 2–7 м/с. Це свідчить про доцільність використання установки саме такої номінальної потужності. Отже, розрахункова потужність вітроелектричної установки приймається рівною $N = 5$ кВт.

Для обраної вітроелектричної установки коефіцієнт потужності становить $\xi = 0,3$. Значення діаметра ротора обчислюється за формулою (3.3)

$$D = 45,6 \cdot \sqrt{\frac{N}{v_h^3 \cdot \xi}} = 5,6 \cdot \sqrt{\frac{5}{10^3 \cdot 0,3}} = 5,888 \approx 6 \text{ м}$$

Радіус ротора ВЕУ (3.4):

$$R = \frac{D}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ м}$$

Для подальших розрахунків приймаємо, що вітроустановка має три лопаті ($i = 3$) та швидкохідний модуль $z = 7$, що відповідає оптимальним умовам для досягнення максимального коефіцієнта потужності й визначення номінальної швидкості вітру, а саме:

$$\zeta = \zeta_i \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} - T_j - T_p - T_\phi \right) \quad (3.1)$$

Ідеальний коефіцієнт потужності визначається за формулою (3.2) з урахуванням конструкційного параметра, а також втрат на крутіння потоку, профільних і кінцевих втрат лопатей:

$$\zeta_i = 4e \left(\frac{1-e}{1+e} \right) \quad (3.2)$$

Послідовно приймаємо значення коефіцієнта e : 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45. Кінцеві втрати, спричинені вихорами на кінцях лопатей, розраховуються за формулою (3.3):

$$\bar{T}_j = \frac{e}{1-e} \left[\frac{\sqrt[8]{1 + \left(\frac{1-e}{z} \right)^2}}{i \cdot z \cdot (1+e)} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{i \cdot z}{\pi(1-0,5e)} \right]^2}} \right] \quad (3.3)$$

Таблиця 3.1 – Дані профілю лопаті НАСА-33012

Кут атаки $\alpha, ^\circ$	Коефіцієнт підйомної сили C_y	Коефіцієнт сили опору C_x	Зворотна якість лопаті $\mu = C_x/C_y$
0,0	0,12	0,0078	0,065
2,0	0,28	0,014	0,050
4,0	0,43	0,019	0,044
6,0	0,58	0,029	0,050
8,0	0,72	0,040	0,056
10,0	0,88	0,056	0,064
12,0	1,03	0,063	0,061
14,0	1,18	0,093	0,079
16,0	1,31	0,114	0,087
18,0	1,46	0,140	0,096
20,0	1,58	0,167	0,106

Для розрахованої вітроелектричної установки (ВЕУ) було обрано профіль лопаті типу NACA-33012. У табл. 3.1 подано значення кута атаки α , коефіцієнтів підйомної сили C_x , сили опору C_y та зворотної якості лопаті μ , які відповідають цьому профілю. Табл. 3.1 містить основні аеродинамічні характеристики профілю NACA-33012, необхідні для подальших розрахунків.

Середнє значення зворотної якості лопаті для обраного профілю становить $\mu = 0,113$. Втрати, пов'язані з профілем лопаті, зумовлені силами тертя повітряного потоку об її поверхню. Ці втрати враховуються під час аеродинамічного аналізу лопаті. Розрахунок профільних втрат виконується за формулою (3.4).

$$\bar{T}_p = 2\mu' \left[\frac{1-e}{z} + \frac{z}{3(1-e)} \right] \quad (3.4)$$

Втрати енергії, спричинені закручуванням повітряного потоку за ротором, визначаються за формулою (3.5). Цей вид втрат виникає внаслідок утворення обертального руху повітря за площиною ротора. Його врахування є важливим для точного розрахунку ефективності вітроустановки. Формула (3.5) використовується для кількісної оцінки втрат на крутіння струменя.

$$\bar{T}_\phi = \frac{\zeta_i \cdot \eta_1^2}{2z^2} \ln \frac{R}{r_0} \quad (3.5)$$

де η_1 – відносний коефіцієнт корисної дії, який характеризує частку енергії, що зберігається після врахування втрат на закручування повітряного потоку за ротором.

$$\eta_1 \approx \frac{1 - \mu'z}{1 + \frac{\mu'}{z}} = \frac{1 - 0,113 \cdot 7}{1 + \frac{0,113}{7}} = 0,205$$

У таблиці 3.2 подано значення параметра ε .

З аналізу отриманих даних видно, що при зростанні коефіцієнта гальмування максимальний коефіцієнт потужності спостерігається за $\varepsilon = 0,2$, де $\xi = 0,137$. Подальші розрахунки кількості модулів елемента лопаті виконуються за формулою (3.6).

$$z_u = \frac{z}{2(1-e)} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\xi_i}{z^2}} \right] \quad (3.6)$$

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнта гальмування, при якому досягається максимальне значення коефіцієнта потужності

ϵ	r_0/R	ζ	T_j	T_r	T_ϕ	%
0,2	0,1	0,533	0,047	0,686	0,00053	0,137
0,25		0,6	0,059	0,728	0,00059	0,121
0,3		0,646	0,072	0,777	0,00064	0,091
0,35		0,674	0,087	0,833	0,00066	0,047
0,4		0,686	0,103	0,899	0,00068	-0,009
0,45		0,683	0,121	0,978	0,00067	-0,075

З аналізу отриманих даних видно, що при зростанні коефіцієнта гальмування максимальний коефіцієнт потужності спостерігається за $\epsilon = 0,2$, де $\xi = 0,137$. Подальші розрахунки кількості модулів елемента лопаті виконуються за формулою (3.6).

$$z_u = \frac{z}{2(1-e)} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\xi_i}{z^2}} \right] \quad (3.6)$$

де $z = Z \cdot \frac{r_0}{R} r_0/R = 1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$, при цьому $\xi_i=0,533$ відповідає максимальному значенню $\xi=0,137$.

Кут між площиною обертання лопаті ротора та напрямком повітряного потоку визначається за формулою (3.7):

$$\beta = \arccot(z_u) \quad (3.7)$$

Значення $i_b C_y$ визначається за умовою мінімального коефіцієнта μ . Мінімальне значення μ приймається рівним 0,044. При цьому коефіцієнт підйомної сили становить $C_y = 0,43$. Отже, розрахунок $i_b C_y$ здійснюється з урахуванням цих параметрів:

$$i_b C_y = \frac{8\pi \frac{r_0}{R} \frac{e}{R(1+e)(1-e)}}{(z_u + \mu) \sqrt{1 + z_u^2}} \quad (3.8)$$

Ширина лопаті:

$$b = \frac{i_b C_y}{i \cdot C_y} \cdot R \quad (3.9)$$

Для подальшого розрахунку обираємо значення ширини лопаті при $r/R=1$, яке становить $b_0=0,195$ м. У наступному перетині ширина лопаті приймається як $b_{0,2}=1,5 \cdot b_1 = 1,5 \cdot 0,195 = 0,293$ м.

Ширина лопаті на заданому перетині визначається за формулою (3.10):

$$b_k = b_{(1,0)} \frac{b_{(0,2)} - b_{(1,0)}}{n-1} \cdot (k-1) \quad (3.10)$$

Ширина лопаті на перетині:

$$C_y^{(k)} = \frac{(i_b C_y)}{i \cdot b_k} \cdot R \quad (3.11)$$

На основі отриманих значень $C_y^{(k)}$ визначають кут атаки α та коефіцієнт μ за графіками $C_y=f(\alpha)$ і $\mu=f(\alpha)$. Всі результати розрахунків заносяться до табл. 3.3. Кут заклинення лопаті обчислюється за формулою (3.12). Ці дані використовуються для подальших розрахунків.

$$\varphi = \beta - \alpha \quad (3.13)$$

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків параметрів лопаті

r_0/R	z	z_u	$i b C_y$	$C_y^{(k)}$	μ	b	α	β	$\varphi = \beta - \alpha$
1	7	8,774	0,084	0,431	0,046	0,195	4°	6,502°	2,502°
0,8	5,6	7,03	0,104	0,475	0,053	0,219	4,9°	8,096°	3,196°
0,6	4,2	5,289	0,137	0,561	0,059	0,244	5,9°	10,707°	4,807°
0,4	2,8	3,559	0,197	0,733	0,068	0,268	8°	15,694°	7,694°
0,2	1,4	1,862	0,325	1,111	0,765	0,293	13°	8,238°	15,238°

Зміна питомого моменту у відносних величинах для заданих значень параметрів лопаті:

$$\Delta \bar{M} = \frac{8 \left(\frac{r_0}{R} \right) 1 - \mu_{(k)} z_{u(k)}}{1 + e_{(k)} \frac{z_{u(k)} + \mu_{(k)}}{e_{(k)}}} \quad (3.14)$$

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків ротора вітрової електроустановки

r_0/R	$\varphi, ^\circ$	ib	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	z_u	μ	C_y	e	ΔM	z	Z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2,50	0,586	0	2,5	22,8	0,07	0,12	0,185	-0,03	18,64	18,6
			2	4,5	12,7	0,05	0,28	0,269	0,05	9,27	9,27
			4	6,5	8,77	0,04	0,43	0,291	0,13	6,20	6,20
			6	8,5	6,69	0,05	0,88	0,302	0,18	4,63	4,63
			8	10,5	5,39	0,06	0,72	0,304	0,24	3,71	3,71
			10	12,5	4,51	0,06	0,88	0,314	0,30	3,04	3,04
			12	14,5	3,87	0,06	1,03	0,318	0,38	2,57	2,57
			14	16,5	3,38	0,08	1,18	0,321	0,41	2,22	2,22
			16	18,5	2,99	0,09	1,31	0,318	0,46	1,96	1,96
			18	20,5	2,67	0,10	1,46	0,32	0,52	1,73	1,73
			20	22,5	2,41	0,11	1,58	0,315	0,57	1,55	1,55
			22,2	24,7	2,17	0,12	1,68	0,304	0,60	1,41	1,41
			22,2	24,7	2,17	0,20	1,33	0,228	0,36	1,59	1,59
			24	26,5	2,01	0,25	1,23	0,187	0,28	1,55	1,55
			28	30,5	1,70	0,37	1,08	0,127	0,16	1,42	1,42
0,8	320	0,962	0	3,2	17,9	0,07	0,12	0,165	-0,01	14,9	18,6
			2	5,2	11,0	0,05	0,28	0,278	0,05	7,92	9,90
			4	7,2	7,92	0,04	0,43	0,316	0,10	5,39	6,73
			6	9,2	6,18	0,05	0,58	0,337	0,14	4,05	5,07
			8	11,2	5,05	0,06	0,72	0,345	0,18	3,26	4,07
			10	13,2	4,26	0,06	0,88	0,359	0,23	2,67	3,34
			12	15,2	3,68	0,06	1,03	0,365	0,28	2,27	2,83
			14	17,2	3,23	0,08	1,18	0,37	0,31	1,95	2,44
			16	19,2	2,87	0,09	1,31	0,369	0,35	1,72	2,15
			18	21,2	2,58	0,10	1,46	0,373	0,39	1,51	1,89
			20	23,2	2,33	0,11	1,58	0,369	0,43	1,36	1,70
			22,2	25,4	2,11	0,12	1,68	0,358	0,46	1,23	1,53
			22,2	25,4	2,11	0,20	1,33	0,277	0,28	1,42	1,77
			24	27,2	1,95	0,25	1,23	0,232	0,22	1,40	1,75
			28	31,2	1,65	0,37	1,08	0,163	0,14	1,30	1,62
0,6	4,81	0,965	0	4,8	11,8	0,07	0,12	0,116	0,01	10,5	17,51
			2	6,8	8,38	0,05	0,28	0,253	0,04	6,23	10,39
			4	8,8	6,45	0,04	0,43	0,315	0,08	4,38	7,31
			6	10,8	5,24	0,05	0,58	0,351	0,10	3,35	5,58
			8	12,8	4,40	0,06	0,72	0,369	0,13	2,71	4,52
			10	14,8	3,78	0,06	0,88	0,391	0,16	2,23	3,72
			12	16,8	3,31	0,06	1,03	0,402	0,20	1,89	3,16
			14	18,8	2,94	0,08	1,18	0,412	0,21	1,63	2,71
			16	20,8	2,63	0,09	1,31	0,414	0,24	1,43	2,38
			18	22,8	2,38	0,10	1,46	0,421	0,27	1,25	2,09
			20	24,8	2,16	0,11	1,58	0,419	0,29	1,12	1,87
			22,2	27,0	1,96	0,12	1,68	0,411	0,31	1,01	1,68
			22,2	27,0	1,96	0,20	1,33	0,328	0,20	1,19	1,99
			24	28,8	1,82	0,25	1,23	0,28	0,16	1,19	1,98
			28	32,8	1,55	0,37	1,08	0,205	0,02	1,12	1,87

Продовження табл 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,4	7,69	0,928	0	7,7	7,40	0,07	0,12	0,1	0,01	6,65	16,62
			2	9,7	5,85	0,05	0,28	0,264	0,03	4,27	10,68
			4	11,7	4,83	0,04	0,43	0,353	0,05	3,07	7,68
			6	13,7	4,10	0,05	0,58	0,408	0,07	2,36	5,90
			8	15,7	3,56	0,06	0,72	0,439	0,09	1,91	4,78
			10	17,7	3,13	0,06	0,88	0,47	0,10	1,56	3,90
			12	19,7	2,79	0,06	1,03	0,489	0,12	1,31	3,28
			14	21,7	2,51	0,08	1,18	0,505	0,13	1,11	2,78
			16	23,7	2,28	0,09	1,31	0,511	0,15	0,97	2,41
			18	25,7	2,08	0,10	1,46	0,521	0,16	0,83	2,08
			20	27,7	1,91	0,11	1,58	0,523	0,17	0,73	1,82
			22,2	29,9	1,74	0,12	1,68	0,518	0,19	0,64	1,61
			22,2	29,9	1,74	0,20	1,33	0,438	0,13	0,80	2,01
			24	31,7	1,62	0,25	1,23	0,39	0,11	0,81	2,04
			28	35,7	1,39	0,37	1,08	0,309	0,08	0,79	1,98
0,2	15,24	0,914	0	15,2	3,67	0,07	0,12	0,086	0,01	3,33	16,67
			2	17,2	3,22	0,05	0,28	0,271	0,02	2,28	11,42
			4	19,2	2,87	0,04	0,43	0,39	0,03	1,65	8,25
			6	21,2	2,57	0,05	0,58	0,468	0,03	1,24	6,22
			8	23,2	2,33	0,06	0,72	0,516	0,04	0,98	4,91
			10	25,2	2,12	0,06	0,88	0,558	0,05	0,77	3,84
			12	27,2	1,74	0,06	1,03	0,585	0,05	0,62	3,08
			14	29,2	1,79	0,08	1,18	0,608	0,06	0,49	2,44
			16	31,2	1,65	0,09	1,31	0,62	0,06	0,39	1,97
			18	33,2	1,53	0,10	1,46	0,635	0,07	0,30	1,51
			20	35,2	1,42	0,11	1,58	0,642	0,07	0,23	1,15
			22,2	37,4	1,31	0,12	1,68	0,642	0,07	0,17	0,84
			22,2	37,4	1,31	0,20	1,33	0,575	0,06	0,28	1,38
			24	39,2	1,22	0,25	1,23	0,537	0,05	0,28	1,41
			28	43,2	1,06	0,37	1,08	0,469	0,04	0,26	1,32

Число модулів елементів лопаті розраховуємо за формулою:

$$z = z_{u(k)} (1 + e_{(k)}) - \frac{1}{z_{u(k)} \frac{1 + e_{(k)}}{e_{(k)}}} \quad (3.15)$$

Кількість модулів для вибраних перерізів, віднесених до кінцевої частини лопаті визначаємо за формулою:

$$Z = z \frac{r_0}{R} \quad (3.16)$$

Результати розрахунків наведені у зведеній табл. 3.4. У ній представлено основні параметри, отримані в ході моделювання, що відображають зміну

характеристик лопаті за різних умов. Аналіз отриманих даних дозволяє оцінити вплив геометричних параметрів на ефективність роботи ротора.

На основі даних, наведених у табл. 3.4, побудовано графік залежності $\Delta M = f(Z_{(k)})$ при сталих значеннях $(r_0/R)_k$ (рис. 3.1).

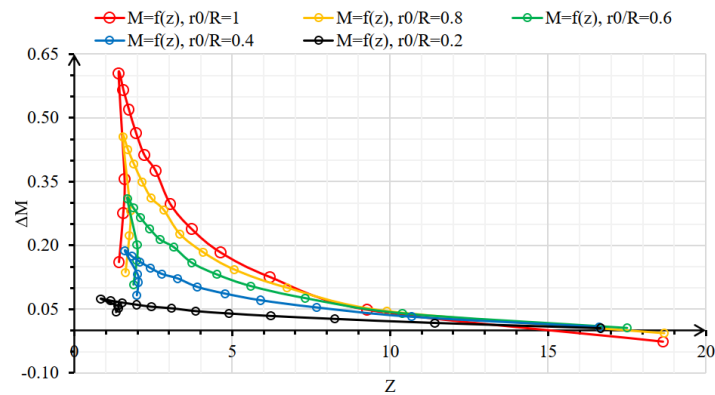


Рисунок 3.1 – Залежність $\Delta M = f(Z_{(k)})$ при сталих значеннях $(r_0/R)_{(k)}$.

Таблиця 3.5 – Результати обчислення ΔM при сталих значеннях $r_0/R_{(k)}$.

Z	r_0/R	ΔM_k	Z	r_0/R	ΔM_k	Z	r_0/R	ΔM_k
1,5	1	0,566	3	1	0,297	5	1	0,183
	0,8	0,456		0,8	0,284		0,8	0,143
	0,6	0,310		0,6	0,195		0,6	0,104
	0,4	0,187		0,4	0,133		0,4	0,086
	0,2	0,065		0,2	0,052		0,2	0,040
	0	0		0	0		0	0
2	1	0,464	3,5	1	0,239	6	1	0,126
	0,8	0,391		0,8	0,227		0,8	0,101
	0,6	0,165		0,6	0,159		0,6	0,104
	0,4	0,114		0,4	0,122		0,4	0,071
	0,2	0,083		0,2	0,045		0,2	0,034
	0	0		0	0		0	0
2,5	1	0,376	4	1	0,183	9,5	1	0,049
	0,8	0,311		0,8	0,184		0,8	0,045
	0,6	0,239		0,6	0,131		0,6	0,040
	0,4	0,147		0,4	0,102		0,4	0,032
	0,2	0,052		0,2	0,045		0,2	0,027
	0	0		0	0		0	0

Виконуємо перетворення залежності, наведеної на рис. 3.1, у форму $\Delta M = f(r_0/R_{(k)})$ при сталих значеннях $Z_{(k)}$. Отримані результати розрахунків подано в таблиці 3.5.

Обчислюємо величину ΔM при сталих значеннях $Z_{(k)}$ (рис. 3.2).

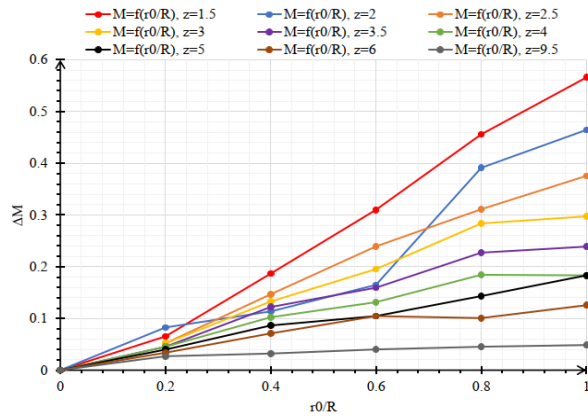


Рисунок 3.2 – Залежність величини ΔM при сталих значеннях $Z_{(k)}$

У таблиці 3.6 наведено результати розрахунку моментів. Моменти були визначені інтегральним методом. Крім того, наведено значення кінцевих втрат моменту. Ці дані дозволяють оцінити вплив втрат на характеристику ротора.

Таблиця 3.6 – Значення моментів та кінцевих втрат моментів

Z	M	M_j	ΔM_{real}	ζ	e
2	0,243	0,102	0,141	0,282	0,318
2,5	0,225	0,062	0,163	0,407	0,318
3	0,192	0,041	0,151	0,453	0,314
3,5	0,159	0,028	0,130	0,456	0,304
4	0,129	0,021	0,108	0,432	0,302
5	0,111	0,013	0,098	0,490	0,302
6	0,087	0,009	0,078	0,470	0,291
9,5	0,039	0,003	0,036	0,338	0,269

Приріст моменту для кожної кривої визначається графічним методом – як площа під кривою $\int_{r_0}^R \Delta \bar{M} d\bar{r}$. Однак, для побудови повної характеристики ротора вітроустановки необхідно врахувати кінцеві втрати моменту згідно з виразом (3.17).

$$\bar{M}_j = \frac{4e^2}{z(1+e)} \left[\frac{8\sqrt{1+\left(\frac{1-e}{z}\right)^2}}{i \cdot z \cdot (1+e)} - \frac{1}{\sqrt{1+\left[\frac{i \cdot z}{\pi(1-0,5e)}\right]^2}} \right] \quad (3.17)$$

На рис. 3.3 побудовано загальну характеристику ротора вітроустановки (зелений колір), дійсну характеристику моментів (синій колір), отриману відніманням кінцевих втрат від загальної характеристики, а також характеристику коефіцієнта потужності (помаранчевий колір), розраховану за формулою $\xi = M \cdot z$.

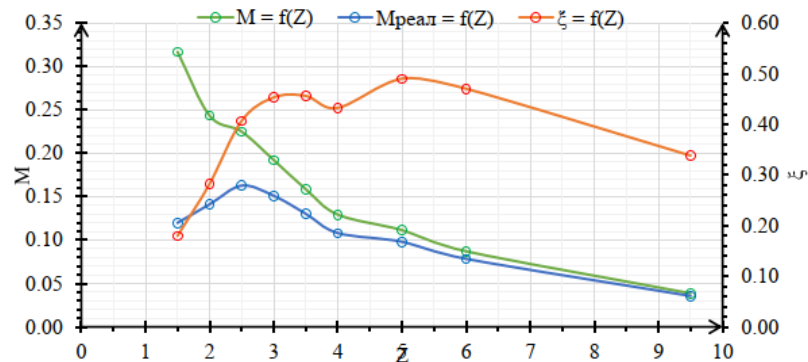


Рисунок 3.3 – Характеристика ротора вітроустановки

Таблиця 3.7 – Результати розрахунку потужності вітроустановки від швидкості вітру

Швидкість вітру, м/с	Потужність, кВт
0	0
1	0
2	0
3	0,234
4	0,554
5	1,082
6	1,870
7	2,970
8	4,433
9	6,312
10	8,659
11	8,659
12	8,659
13	8,659
14	8,659
15	8,659

Отже, для розрахунку потужності вітроустановки використовуємо дійсне значення моменту, яке відповідає максимальному коефіцієнту використання енергії вітру $\xi=0,49$. Дійсний момент у цьому режимі становить $\Delta M_{real}=0,098$. Враховуємо також параметр z , який дорівнює 5. На основі цих вихідних даних проводимо обчислення потужності вітроустановки для швидкостей вітру в діапазоні від 3 до 10 м/с.

$$N_{diic} = \Delta M_{real} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot z \quad (3.18)$$

де ρ – густина повітря, v – робочі швидкості вітроустановки.

Таблиця 3.8 – Річний виробіток енергії ВЕУ

Швидкість вітру, м/с	Повторюваність, %	Потужність, кВт	Згенерована енергія, кВт год
1	2,758	0	0
2	7,557	0	0
3	12,540	0,23379	256,828
4	16,102	0,55418	781,702
5	17,140	1,08238	1625,11
6	15,507	1,87035	2540,74
7	12,036	2,97004	3131,43
8	8,031	4,43342	3118,92
9	4,601	6,31242	2543,97
10	2,255	8,65902	1710,85
11	0,942	8,65902	714,795
12	0,334	8,65902	253,279
13	0,100	8,65902	75,724
14	0,025	8,65902	19,0008
15	0,005	8,65902	3,97984

На рис. 3.4 представлено криву потужності вітроустановки. Використовуючи розподіл Вейбула, можна обчислити кількість енергії, яку виробляє розрахована вітроустановка. Результати місячного виробітку наведені табл.3.8 демонструє розподіл річного виробітку по місяцях.. Загальна річна вироблена енергія вітроустановки становить 16 776,33 кВт·год.

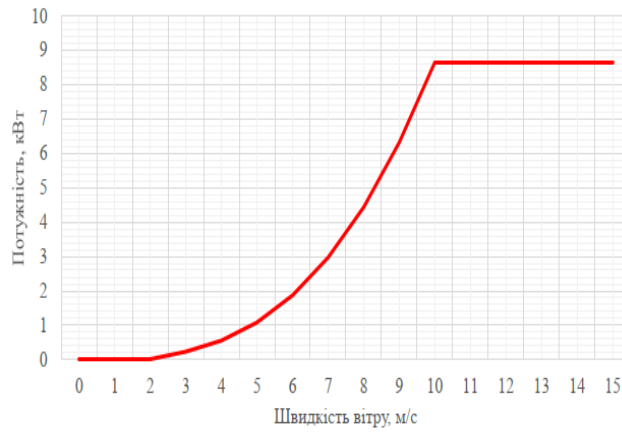


Рисунок 3.4 – Крива потужності вітроустановки

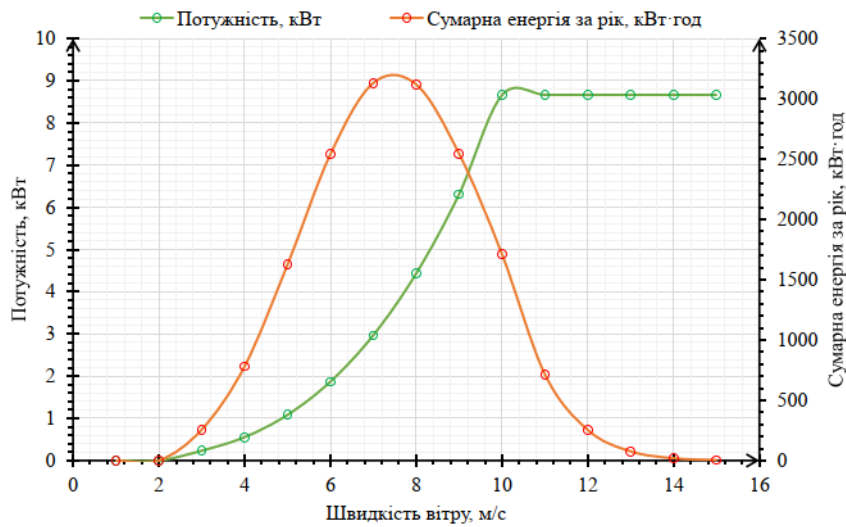


Рисунок 3.5 – Виробіток енергії в залежності від швидкості вітру

Середня швидкість вітру бралася на висоті $h=20$ м. Через це мінімальну висоту опори вітроустановки приймаємо $H=20$ м. Для швидкохідної установки вибираємо циліндричний тип опори. Конструкційний параметр β визначається через відношення H/D_0 . Діаметр опори приймаємо рівним $D_0=0,75$ м. Відповідне відношення $H/D_0=26,7$. Згідно з графіком це дає значення коефіцієнта $\beta=1,5$. Вітрове навантаження на опору розраховується за відповідною формулою:

$$P_o = 7,1 \cdot \beta \cdot H^2 = 7,1 \cdot 1,5 \cdot 20^2 = 4260 \text{ кг}$$

Площу лопаті, має тип трапеції:

$$S = 0,5 \cdot (b_1 + b_2) \cdot R = 0,5 \cdot (0,195 + 0,293) \cdot 3 = 0,732 \text{ м}^2$$

Кутова частота обертання ВЕУ визначається за формулою:

$$\omega = \frac{z \cdot v_n}{R} = \frac{5 \cdot 10}{3} = 8,332 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (3.19)$$

Радіус лопаті ВЕУ визначається за формулою:

$$r_u = \sqrt{\frac{R^2 \cdot Rr_0 + r_0^2}{3}} = \sqrt{\frac{3^2 \cdot 30,3 + 0,3^2}{3}} = 1,825 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (3.20)$$

Коефіцієнт перевантаження ВЕУ визначається за формулою:

$$n = \frac{\omega^2 \cdot r^2 + v_n^2}{\omega^2 \cdot r^2 + v_n^2} = \frac{0,332^2 \cdot 3^2 + 15^2}{0,332^2 \cdot 3^2 + 15^2} = 1,377 \quad (3.21)$$

де v – швидкість вітру під час зупинки робота ВЕУ.

Лобовий тиск на ротор ВЕУ визначається за формулою:

$$P_n = C_y \cdot S \cdot \frac{\rho}{2} (\omega^2 \cdot r^2 + v_n^2) \cdot i \cdot n = 0,43 \cdot 0,732 \cdot \frac{1,25}{2} \cdot (8,332^2 \cdot 1,825^2 + 10^2) \cdot 3 \cdot 1,377 = 269,22 \text{ кг} \quad (3.22)$$

Момент основи опори ВЕУ визначається за формулою:

$$M = P_n \cdot H_n + P_o \cdot H_o = 269,22 \cdot 20 + 4260 \cdot 10 = 87892,2 \text{ кг} \cdot \text{м} \quad (3.23)$$

де H_n , H_o – межі тисків від основи точок прикладання до фундаменту.

Вага опори ВЕУ визначається за формулою:

$$G_{\text{опори}} = \pi \cdot H \cdot (R_{\text{зовн}}^2 - R_{\text{внутр}}^2) = 3,14 \cdot 20 \cdot (0,75^2 - (0,75 - 0,02)^2) \cdot 7800 = 7155,3 \text{ кг} \quad (3.24)$$

де $R_{\text{внутр}}$ – внутрішній радіус, мм.

Площа фундаменту ВЕУ визначається за формулою:

$$S_\phi = \frac{M + G}{20 \cdot 10^3 - \gamma \cdot h} = \frac{87892,2}{20 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3 \cdot 4,5} = 8,756 \text{ м}^2 \quad (3.25)$$

де h – глибина закладки фундаменту, $h = 4.5$ м.

3.2 Вибір обладнання ВЕС та ФЕС

Детальні технічні параметри та зовнішній вигляд вибраної вітроустановки наведено в Додатку А. Для роботи обрано установку HAWT 5KW Wind Generator, технічні характеристики якої повністю відповідають розрахованим параметрам і вимогам роботи. Вона має горизонтальний ротор діаметром 6 м з трьома лопатями довжиною 2,9 м, виготовленими зі склопластика, а також трифазний синхронний генератор з постійними магнітами. Номінальна

потужність установки становить 5 кВт, максимальна – 7 кВт, при цьому вона починає роботу за швидкості вітру 3 м/с і досягає номінального режиму при 10 м/с. Безпечна експлуатація забезпечується до швидкості вітру 35 м/с. Для перетворення виробленої енергії обрано інвертор ENERSUN Wind 10, який завдяки діапазону MPPT 60–300 В забезпечує ефективне відстеження точки максимальної потужності та стабільну роботу системи.

Для реалізації сонячної частини системи обрано фотомодуль RSM132-8-655M-675M [1], який завдяки монокристалічним елементам та ККД 21,7% забезпечує високу енергоефективність. Потужність однієї панелі становить 675 Вт, напруга холостого ходу – 46,35 В, а струм короткого замикання – 18,48 А, що робить її придатною для систем із великим енергоспоживанням. Для перетворення енергії використовується інвертор X1-HYBRID G4 [2] номінальною потужністю 10 кВт, який оснащений двома MPPT-трекерами для підключення окремих рядів панелей. Його максимальна ефективність становить 98%, що мінімізує втрати енергії та підвищує економічність роботи системи. З огляду на коливання потужності вітроустановки та зниження виробітку сонячних модулів у періоди низької інсоляції, доцільно використовувати акумуляторні батареї. Для цього обрано LP LiFePO4 48V (51,2V) – 230Ah [3], які вирізняються швидким зарядженням, довговічністю та компактністю.

3.3 Розрахунок фотоелектростанції

Необхідну кількість фотоелектричних панелей визначають за методикою, наведеною в джерелі [16]. Середнє значення енергії, яку виробляє масив фотомодулів, обчислюється за спеціальною формулою. У цій формулі P_{PV} позначає електричну потужність одного модуля за стандартних тестових умов. Параметр N_{PV} відображає кількість встановлених фотомодулів, а $PSH(n)$ характеризує тривалість періоду пікового сонячного випромінювання у вибраний день n . Коефіцієнт корисної дії фотомодулів позначається символом η_{PV} , тоді як S відповідає сумарній площі панелей. Величина I_{tot} визначає

інсоляцію, тобто кількість сонячної енергії, що надходить на одиницю площі поверхні панелей.

$$E_{PV}(n) = P_{PV} \cdot N_{PV} PSH(n) = \eta_{PV} \cdot I_{tot} \cdot (n, T_i) \cdot S \quad (3.26)$$

Розрахунок кількості фотоелектричних модулів проводився з урахуванням енергоспоживання, потужності вітроустановки та параметрів акумуляторних батарей. За результатами ітераційного підбору визначено, що для стабільного енергозабезпечення системи потрібно 44 сонячні панелі та 8 акумуляторів ємністю 1840 А·год, що відповідає 88,32 кВт·год при глибині розряду до 70%. Кожен модуль має потужність 675 Вт, напругу холостого ходу 46,35 В, струм короткого замикання 18,48 А і ККД 21,7%. Інвертор потужністю 5400 Вт працює в діапазоні напруг MPP 70–580 В, підтримує струм до 14 А та характеризується ефективністю 97,8%.

Подальший розрахунок передбачав визначення оптимальної конфігурації фотомодулів та інверторів для досягнення необхідних параметрів потужності й напруги. У результаті ітераційного підбору встановлено, що найефективнішою є схема з 15 послідовно з'єднаними панелями на один інвертор і трьома паралельними секціями, а система акумуляторів із напругою 48 В і ємністю 230 А·год складається з одного послідовного та восьми паралельних з'єднань. На рисунку 3.7 наведено графік виробітку та споживання енергії за останній тиждень грудня, який відображає баланс між генерацією вітроустановки, сонячних панелей і роботою акумуляторів.

У грудні спостерігається істотне зниження рівня сонячної інсоляції, що спричиняє відповідне падіння виробітку енергії сонячними панелями – це характерно для зимового періоду. Коливання швидкості вітру також впливають на роботу вітроустановки, змінюючи інтенсивність генерації енергії та впливаючи на енергетичний баланс системи. У такі періоди важливу роль відіграє система акумуляторів, яка накопичує надлишкову енергію та забезпечує живлення споживача за умов її нестачі. Коли генерація з відновлюваних джерел є недостатньою, рівень заряду акумуляторів може знижуватися до мінімального значення (26,5 кВт·год), після чого система

змушена отримувати енергію з мережі. На рисунку 3.8 подано графік за 28 грудня, який демонструє розподіл енергії між навантаженням, заряджанням акумуляторів і відбором з мережі у разі дефіциту генерації.

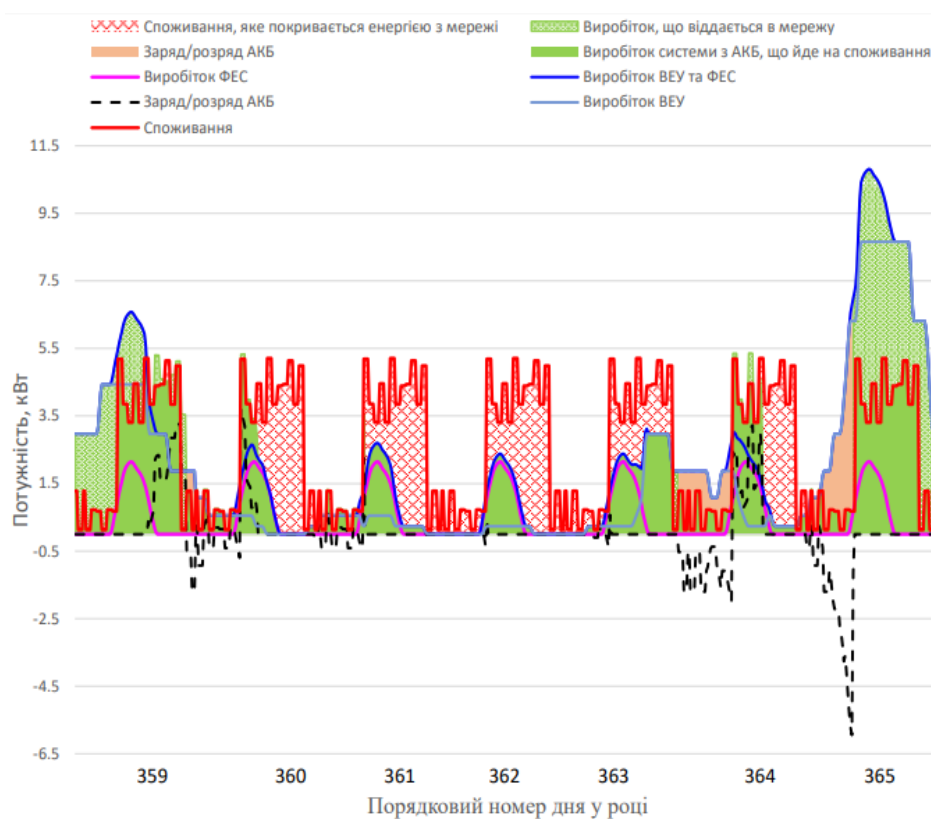


Рисунок 3.7 – Графік виробітку та споживання енергії протягом тижня в грудні

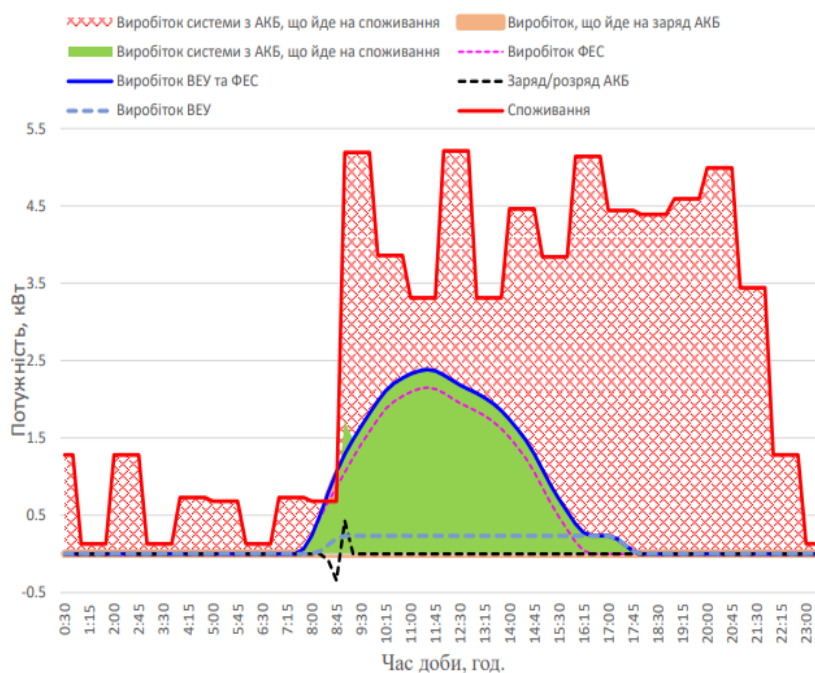


Рисунок 3.8 – Графік виробітку та споживання енергії впродовж 28 грудня

На графіку за 15 січня (рис. 3.9) показано, що вітроустановка виробляє достатньо енергії лише на початку доби для заряджання акумуляторів, сонячні панелі досягають пікової генерації близько полудня, проте загальна вироблена енергія недостатня для покриття потреб споживача, тому акумулятори віддають енергію до допустимого розряду 70%.

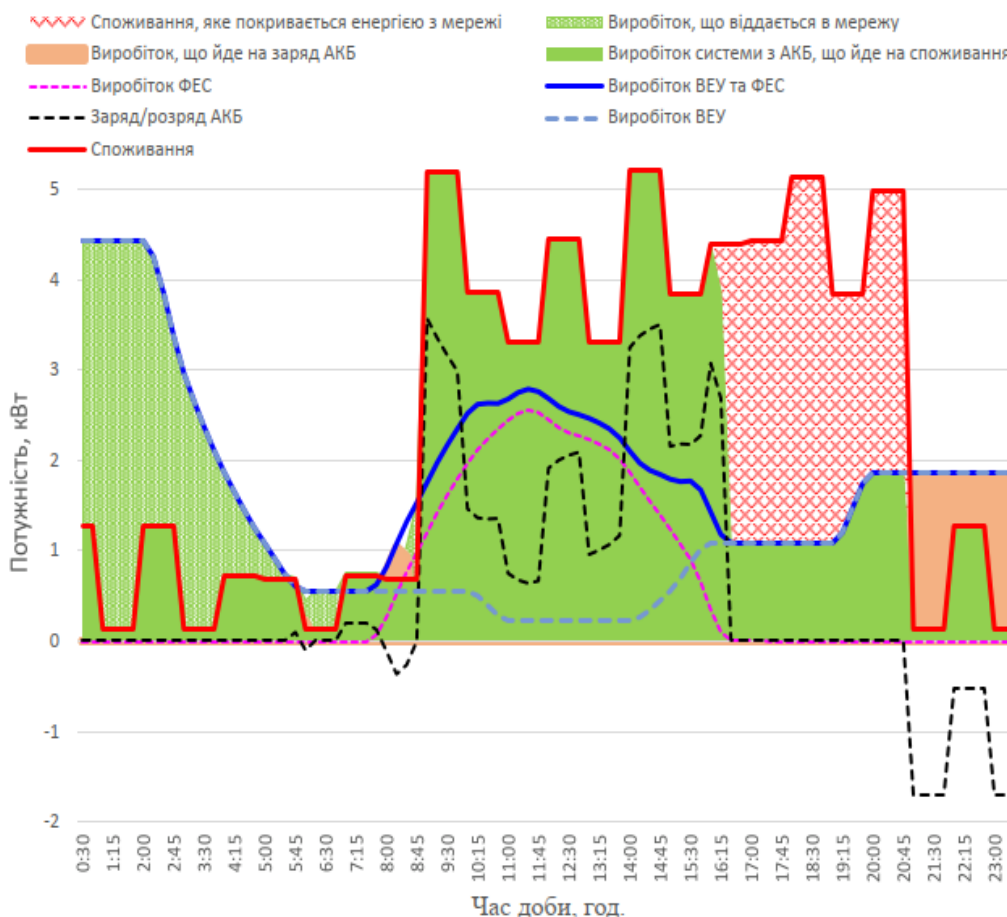


Рисунок 3.9 – Погодинний графік виробітку та споживання енергії за 15 січня

На рис. 3.10 і 3.11 показано, що в травні основне виробництво енергії забезпечують сонячні панелі, а вітрові установки генерують удвічі менше, при цьому надлишок енергії йде на заряджання акумуляторів для вечірнього та нічного споживання, тоді як у серпні через велику генерацію від ФЕС потреба в акумуляторах виникає лише вночі, а надлишкова енергія відпускається в мережу.

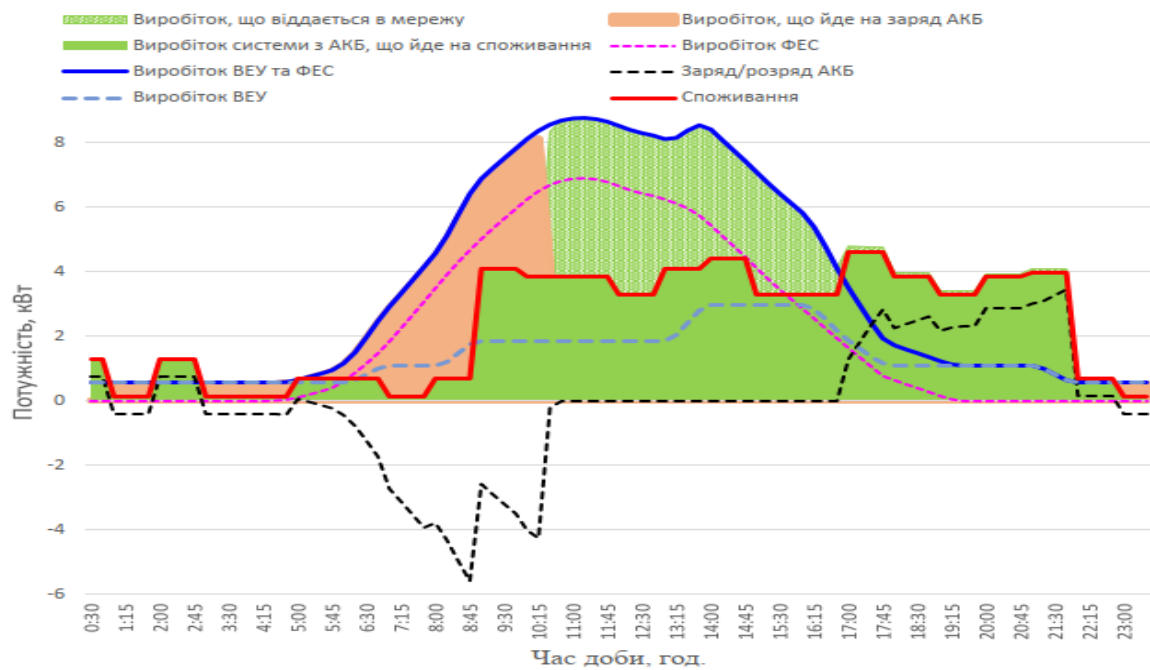


Рисунок 3.10 – Погодинний графік виробітку та споживання енергії за 26 травня

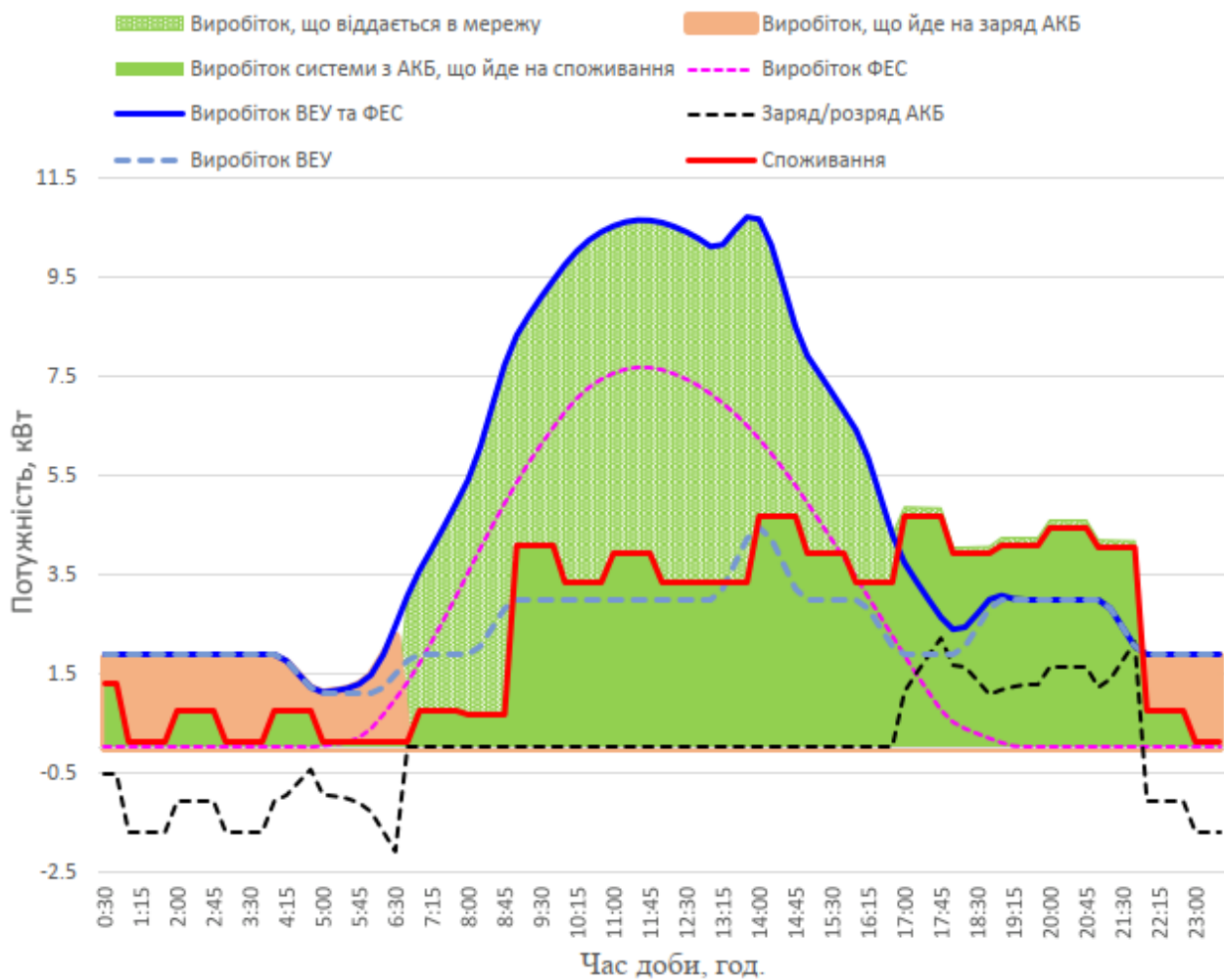


Рисунок 3.11 – Погодинний графік виробітку та споживання енергії за 8 серпня

3.4 Аналіз річного виробітку енергії

Дані табл. 3.9 показують, що загальний виробіток електроенергії від ФЕС та ВЕУ (30394,27 кВт·год) перевищує річне споживання (21459,37 кВт·год), проте у зимові місяці через зниження генерації сонячних панелей споживання іноді перевищує виробіток, потребуючи додаткової енергії з мережі та акумуляторів. У літні місяці виробіток ФЕС досягає максимуму, забезпечуючи повне покриття споживання та надлишкову енергію, яка відпускається в мережу.

Таблиця 3.9 – Загальний баланс річного виробітку енергії системи ФЕС та ВЕУ

Місяць	Споживання, кВт·год	Виробіток ел, ен, ФЕС, кВт·год	Виробіток ел, ен, ВЕУ, кВт·год	Сумарна генерація ВЕУ та ФЕС, кВт·год	Кількість енергії на заряд АКБ, кВт·год	Кількість енергії, що віддає АКБ, кВт·год
Січень	1837,99	436,39	1752,84	2189,23	278,13	267,04
Лютий	1659,28	595,75	1602,79	2198,54	243,46	237,41
Березень	1804,51	1064,39	1972,19	3036,58	280,61	298,00
Квітень	1686,00	1408,72	1175,63	2584,35	415,44	414,43
Травень	1729,18	1622,47	1247,51	2869,98	368,83	365,61
Червень	1723,50	1683,76	1264,70	2948,46	338,72	338,13
Липень	1867,75	1753,06	622,08	2375,14	483,77	474,59
Серпень	1751,50	1783,22	1137,99	2921,21	348,87	362,57
Вересень	1752,90	1422,43	1259,78	2682,21	383,76	366,68
Жовтень	1798,31	1012,24	882,42	1894,66	337,82	354,90
Листопад	1884,60	553,37	2219,34	2772,71	229,35	229,49
Грудень	1963,85	358,37	1562,83	1921,20	240,71	223,49
Всього:	21459,37	13694,17	16700,10	30394,27	3949,47	3932,33

Хоча добова генерація електроенергії може перевищувати навантаження, для точного аналізу важливо враховувати погодинні профілі виробництва та

споживання, щоб визначити інтервали дефіциту або надлишку енергії. На основі табл. 3.10 показано щомісячну кількість енергії, відпущеної в мережу, та отриманої з мережі для покриття дефіциту. Результати свідчать, що найбільший дефіцит спостерігається в грудні (29% від споживання), у зимові місяці середній показник отриманої з мережі енергії становить близько 20%, тоді як з березня по жовтень він знижується до 4%.

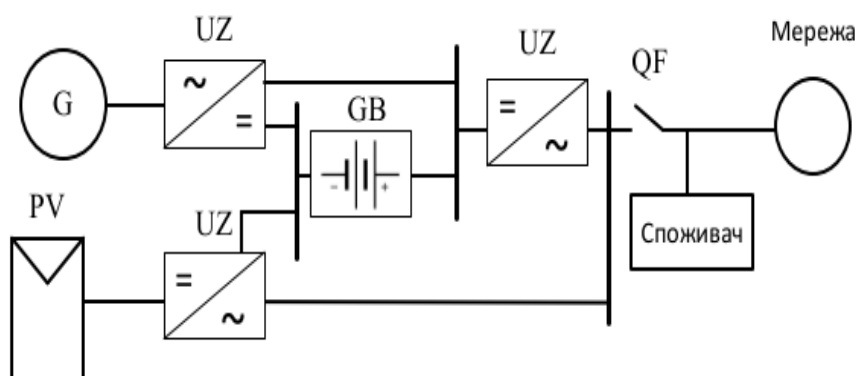


Рисунок 3.12 –

Блок-схема системи управління ФЕС та ВЕУ

Таблиця 3.10 – Кількість енергії, відпущеної в мережу, та отриманої з мережі за місяцями

Місяць	Відпуск у мережу, кВт·год	Кількість ел. ен. отриманої з мережі, кВт·год
Січень	684,99	344,84
Лютий	762,64	229,44
Березень	1356,45	106,99
Квітень	990,61	93,27
Травень	1160,87	23,29
Червень	1242,42	18,05
Липень	583,34	85,13
Серпень	1209,37	25,97
Вересень	1003,95	91,72
Жовтень	475,62	362,19
Листопад	1205,19	316,94
Грудень	509,24	569,11
Всього	11184,69	2266,93

Блок-схема на рис. 3.12 демонструє загальну структуру комплексної енергосистеми, що включає вітроустановку (ВЕУ), фотоелектричну систему (ФЕС) та акумуляторні батареї. Рисунок 3.12 ілюструє взаємозв'язок усіх основних елементів системи. Схема підключення ВЕУ, ФЕС та акумуляторів до споживача та мережі наведена на рис. 3.13. Для управління надлишковою енергією передбачено її продаж у мережу. Ця функція реалізується за допомогою двонаправленого лічильника.

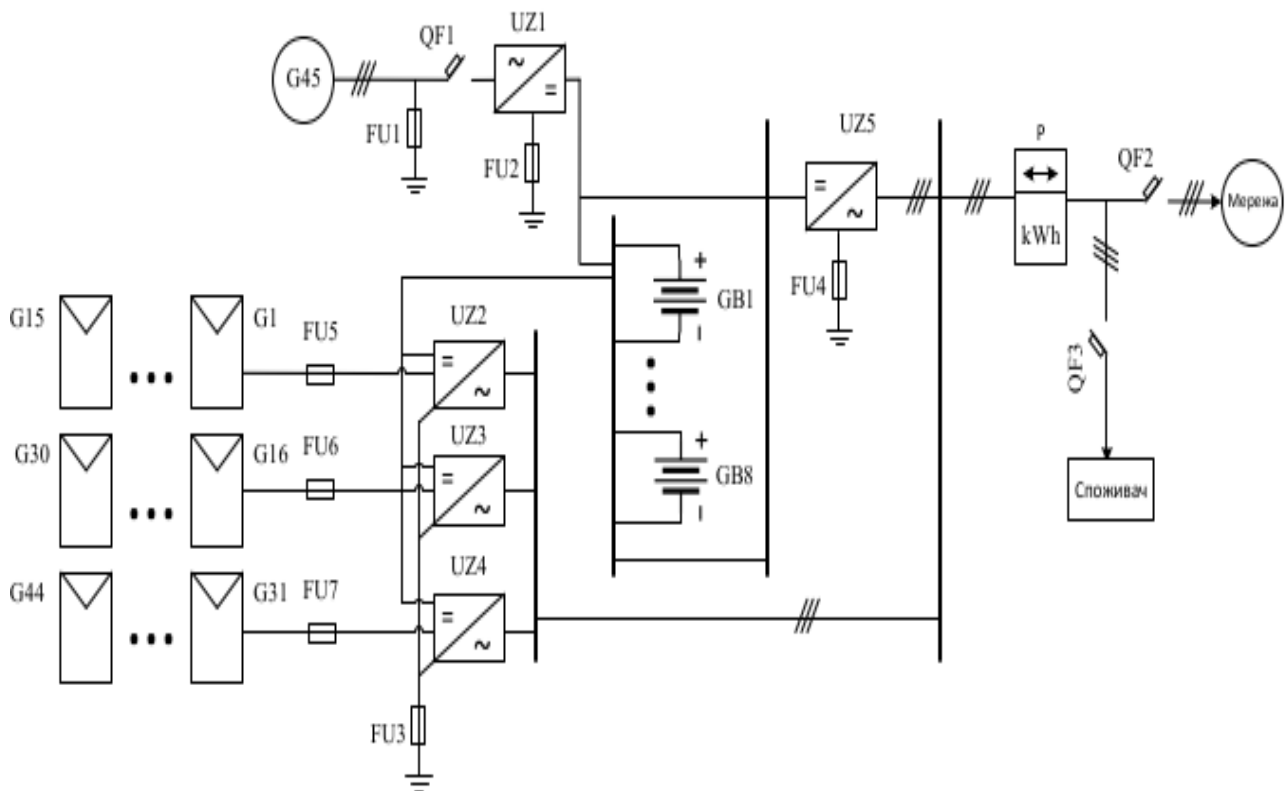


Рисунок 3.13 – Схема підключення вітроустановки та ФЕС до мережі та споживача

Розрахунки за розподілом Вейбула показали, що вітроустановка HAWT 5KW Wind Generator може щорічно виробляти 16 776,33 кВт·год, для якої обрано інвертор ENERSUN Wind 10 для оптимальної роботи системи. Сонячна частина включає 44 панелі RSM132-8-655M-675M, об'єднані у конфігурацію з 15 послідовно з'єднаних модулів на один інвертор та три паралельні секції інверторів Solax Power X1-HYBRID G4. Для надійного зберігання енергії використовується 9 акумуляторних батарей LP LiFePO4 48V – 230 Ah із

сумарною ємністю 2070 А·год та енергією 99,36 кВт·год, з допустимим ступенем розряду 70%. Загальна річна генерація системи становить 30 394,27 кВт·год, з яких споживається 21 459,37 кВт·год, а надлишок у 11 184,69 кВт·год відпускається в мережу за зеленим тарифом. При цьому для покриття дефіциту енергії з мережі необхідно отримати 2 266,93 кВт·год.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У 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. Головне 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 сталюю стрічкою перерізом 25...30 мм або дротом не менше 6 мм. Заземлення виконується кутовою сталлю, трубами на відстані від установки не менше 4,5 м. Опір розтікання не повинен перевищувати 15....20 Ом.

Приймаємо початкову висоту блискавковідводу 8 метрів. Визначаємо радіус конуса, в якому ймовірність попадання 95%, через висоту конуса h за формулою (4.1):

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

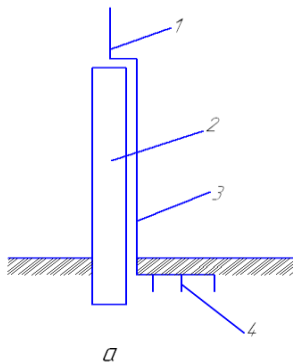


Рисунок 4.1 – Схема блискавко захисту конструкції; 1 – блискавко приймач,
2 – блискавко провідник; 3 – опора, 4 – заземлювач.

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

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

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. ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЛАДНАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

5.1 Оцінка економічної ефективності використання системи резервного енергозабезпечення підприємства з використанням обладнання відновлювальної енергетики

У сучасних умовах енергетичної нестабільності та зростання тарифів на електроенергію важливим завданням підприємств є забезпечення енергетичної незалежності та надійності електропостачання. Використання систем резервного енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) дозволяє не лише підвищити безперервність роботи підприємства, але й скоротити експлуатаційні витрати на електроенергію та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Економічна частина роботи передбачає визначення доцільності впровадження системи резервного енергозабезпечення з урахуванням вартості обладнання, монтажу, експлуатації та строку окупності інвестицій.

Вибір обладнання та його вартість, для забезпечення резервного електропостачання підприємства прийнято гібридну систему, що складається з таких основних елементів:

- фотоелектрична установка (сонячні панелі);
- акумуляторна батарея для накопичення енергії;
- інверторна система з функцією гібридної роботи (мережа/сонце/акумулятори);

допоміжне обладнання (контролери, кабелі, автоматика, опори, комутаційні пристрої). Розрахунок експлуатаційних витрат, до експлуатаційних витрат відносяться:

- обслуговування та діагностика системи;

- періодична заміна кабельних з'єднань та дрібних компонентів;
- вартість очищення сонячних панелей;
- втрати енергії при перетворенні.

Таблиця 5.1 – Орієнтовна вартість основного обладнання системи резервного енергозабезпечення

№	Найменування	Кількість	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
1	Сонячна панель 450 Вт	20	шт	5 000	100 000
2	Акумуляторна батарея LiFePO ₄ 48 В, 100 А·год	4	шт	28 000	112 000
3	Гібридний інвертор 10 кВт	1	шт	45 000	45 000
4	Контролер заряду	1	шт	10 000	10 000
5	Кабелі, автоматика, кріплення, монтажні матеріали	-	комплект	25 000	25 000
6	Монтажні роботи та пусконаладження	-	-	-	20 000
Всього					312 000

Розрахунок експлуатаційних витрат, до експлуатаційних витрат відносяться:

- обслуговування та діагностика системи;
- періодична заміна кабельних з'єднань та дрібних компонентів;
- вартість очищення сонячних панелей;
- втрати енергії при перетворенні.

Річні експлуатаційні витрати приймаємо на рівні 1,5–2% від вартості обладнання:

$$V_{\text{експл}} = 0,02 \cdot 312\,000 = 6\,240 \text{ грн/рік.}$$

Економія електроенергії. Система дозволяє забезпечувати часткове енергозабезпечення підприємства за рахунок ВДЕ, зменшуючи споживання електроенергії з мережі. При середньорічній генерації фотоелектричної системи потужністю 9 кВт на рівні 10000 кВт·год/рік та тарифі 5,20 грн/кВт·год отримаємо:

$$E_{\text{ек}} = 10\,000 \cdot 5,20 = 52\,000 \text{ грн/рік.}$$

Розрахунок строку окупності. Термін окупності системи визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{інв}}}{E_{\text{ек}} - E_{\text{експл}}}, \quad (5.1)$$

де $C_{\text{інв}}$ – вартість інвестицій, грн; $E_{\text{ек}}$ – річна економія коштів, грн; $E_{\text{експл}}$ – річні експлуатаційні витрати, грн.

$$T_{\text{ок}} = \frac{312000}{52000 - 6240} = 6,9 \text{ років,}$$

Отже, строк окупності системи становить приблизно 7 років, що є прийнятним показником для інвестицій у відновлювану енергетику, з огляду на термін служби обладнання понад 15 років.

Екологічний ефект. Використання відновлюваних джерел енергії знижує споживання електроенергії з традиційних (вуглецевих) джерел, що супроводжується скороченням викидів парникових газів. Середній показник викидів CO_2 при виробництві 1 кВт·год енергії в Україні становить близько 0,72 кг CO_2 /кВт·год. Таким чином, щорічне скорочення викидів складе:

$$\Delta \text{CO}_2 = 10\,000 \cdot 0,72 = 7\,200 \text{ кг/рік.}$$

Це еквівалентно висадженню близько 360 дерев або скороченню використання близько 3 000 літрів дизельного палива.

1. Впровадження системи резервного енергозабезпечення на основі ВДЕ потребує інвестиційних витрат у розмірі 312 тис. грн.

2. Очікувана річна економія становить приблизно 52 тис. грн, а строк окупності – близько 7 років.

3. Система дозволяє підвищити надійність електропостачання підприємства, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити екологічний ефект шляхом зниження викидів CO_2 .

4. Використання відновлюваних джерел енергії в складі резервної системи є економічно доцільним і екологічно безпечним рішенням для сучасних підприємств.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У роботі було всебічно досліджено можливості та перспективи використання малої вітроенергетики і фотоенергетики як в Україні, так і у світовій практиці. Отримані результати підтверджують, що Україна володіє значним природно-енергетичним потенціалом, який створює сприятливі умови для активного розвитку відновлюваної енергетики. Використання сонячних і вітрових ресурсів є важливим напрямом забезпечення енергетичної незалежності держави, підвищення надійності енергопостачання та зниження негативного впливу енергетичного сектору на довкілля.

Враховуючи географічні та кліматичні особливості території, для реалізації проєкту було обрано м. Львів, яке характеризується достатнім рівнем сонячної інсоляції та помірними вітровими потоками, що дозволяє ефективно використовувати як сонячні, так і вітрові джерела енергії.

На основі статистичних даних про швидкість вітру проведено побудову розподілу Вейбула, що дало змогу визначити основні характеристики вітропотенціалу місцевості. Аналіз показав, що переважний діапазон швидкостей вітру становить 2–10 м/с, при цьому найчастіше спостерігається швидкість 5 м/с (із повторюваністю 17,14%). Це дозволило обґрунтувати вибір оптимальної вітроенергетичної установки.

Для покриття пікового енергоспоживання обрано вітроустановку HAWT 5 kW Wind Generator, яка має номінальну потужність 5 кВт і розрахована на номінальну швидкість вітру 5 м/с. Згідно з розрахунками, річне виробництво електроенергії становить близько 16 770 кВт·год, що робить установку ефективною складовою гібридної енергосистеми.

Оптимальний кут нахилу поверхні фотомодулів визначено рівним 35°, що забезпечує максимальне поглинання сонячної енергії протягом року. Для покриття енергетичних потреб підприємства розраховано потребу у 44 сонячних панелях, які розміщені у трьох рядах (по 15, 15 і 14 панелей). Сумарна номінальна потужність фотоелектричної станції становить 29,7 кВт, а прогнозована річна генерація – 13 700 кВт·год.

Для забезпечення стабільності роботи системи та компенсації добових і сезонних коливань генерації обрано акумуляторні батареї LP LiFePO₄ 48V (51.2V) – 230 Ah у кількості 9 шт. Їх сумарна ємність становить 2070 А·год, а запасена енергія – 99,36 кВт·год. Використання такої системи накопичення дозволяє підтримувати безперервне живлення споживачів у періоди низької сонячної активності або слабого вітру, підвищуючи загальну надійність енергопостачання.

Загальна річна генерація гібридної системи (фотоелектричної станції та вітроустановки) становить 30 394,27 кВт·год, що перевищує річну потребу об'єкта у 21 459,37 кВт·год. Проте навіть при наявності запасу генерації та використанні акумуляторних батарей у певні періоди можливий дефіцит енергії, який компенсується з мережі.

У зимовий період середня частка енергії, споживаної з мережі, становить близько 20%, тоді як у теплий період року (березень–жовтень) – лише 4%. Загальна кількість електроенергії, яку необхідно отримати з мережі протягом року, складає 2266,93 кВт·год.

Водночас надлишкова енергія, яка утворюється переважно в літні місяці, у кількості 11 184,69 кВт·год може бути відпущена в мережу за “зеленим тарифом”, що забезпечує додатковий економічний ефект і скорочення строку окупності системи.

Таким чином, розроблена система резервного енергозабезпечення із використанням відновлюваних джерел енергії є енергоефективним, екологічно безпечним та економічно доцільним рішенням для підприємств малого бізнесу. Отже, впровадження подібних гібридних систем резервного енергозабезпечення може стати перспективним напрямом розвитку енергетичної інфраструктури в Україні, особливо для об'єктів із безперервним енергоспоживанням та високими вимогами до надійності живлення.

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://cooperhunter-aircon.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. Altaibao 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.
21. M. Schroeder and J. Jaeger, "Advanced energy flow control concept of an MMC for unrestricted operation as a multiport device," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, №. 11, PP. 11–496, 2019.
22. M. S. Chinthavali, J. Sun, P. R. V. Marthi, S. Chinthavali, S. Lee and M. Elizondo, *Models and Methods for Assessing the Value of HvdC And Mvdc Technologies in Modern Power Grids*, Pacific Northwest National Lab, United States, May 2019.
23. S. Yassin Alsadi and Y. Fathi Nassar, "A general expression for the shadow geometry for fixed mode horizontal, step-like structure and inclined solar fields," *Solar Energy*, Vol. 181, PP. 53–69, 2019.
- A. Hafez, Y. Nassar, M. Hammdan, and S. Alsadi, "Technical and economic feasibility of utility-scale solar energy conversion systems in Saudi arabia," *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering*, Vol. 44, PP. 213–225, 2020.
24. H. Bayat and A. Yazdani, "A hybrid MMC-based photovoltaic and battery energy storage system," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 6, №. 1, PP. 32–40, 2019.
25. M. Kumar, "Solar PV based DC microgrid under partial shading condition with battery- Part 2: energy management system," in *Proceedings of the 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, PP. 1–6, IEEE, Jaipur, India, 2018, December.