

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

«_____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему: «Оцінювання надійності системи електропостачання середньої напруги
групи підприємств з використанням ВДЕ»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Кривоносов В.Є
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Ведмідь Є.П
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Ведмідю Євгенію Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Оцінювання надійності системи електропостачання середньої напруги групи підприємств з використанням ВДЕ»** затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026 р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: План, місце розташування, нормативні документи, каталоги, обладнання.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Методика оцінювання надійності систем електропостачання з ВДЕ.
2. Класифікація показників надійності.
3. Розрахунок показників надійності.
4. Аналіз ризиків при експлуатації ВДЕ.
5. Оцінка окупності.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____ Кривоносов В.Є

Завдання прийняв до виконання _____ Ведмідь Є.П

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 79 с., 27 рисунків, 5 таблиць, 44 джерел.

Об'єкт дослідження – процес функціонування гібридної системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії.

Предмет дослідження – параметри та режими роботи сонячної електростанції, вітрової установки та акумуляторної батареї, а також їх техніко-економічні показники у складі єдиної системи.

Мета роботи – розробка та комплексне техніко-економічне обґрунтування проєкту гібридної системи електроживлення з використанням сонячних панелей, вітрової установки та акумуляторної батареї для забезпечення стабільного та безпечного живлення споживачів.

У роботі проведено аналіз сучасного стану відновлюваної енергетики, обґрунтовано доцільність використання комбінованих систем електропостачання для підвищення надійності та енергетичної автономії. Визначено енергетичний профіль споживання, підібрано оптимальні типи обладнання, виконано моделювання роботи сонячної та вітрової станцій у середовищі MATLAB/Simulink. Розраховано енергетичний баланс системи з урахуванням роботи акумуляторної батареї та резервного джерела.

Розроблена модель враховує змінну генерацію, навантаження, рівень заряду акумулятора та реалізує логіку перемикання джерел живлення. Проведено техніко-економічне обґрунтування проєкту, включаючи розрахунок капітальних витрат, щорічної економії, екологічного ефекту та скоригованого терміну окупності. Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованої системи та її здатність забезпечити енергетичну автономію споживачів в умовах нестабільного зовнішнього електропостачання.

Ключові слова: гібридна система, сонячна електростанція, вітроустановка, акумуляторна батарея, моделювання, техніко-економічне обґрунтування, енергетичний баланс, екологічна безпека, охорона праці

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ	9
1.1 Основ поняття надійності електропостачання.....	9
1.2 Класифікація показників надійності	10
1.3 Особливості роботи систем з ВДЕ	12
1.4 Аналіз сучасних підходів до оцінювання надійності.....	17
Висновк до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВДЕ	22
2.1 ВИБІР СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РАЙОНУ.....	22
2.2 ХАРАКТЕРИСТИКА ДЖЕРЕЛ ВДЕ (СОНЯЧНІ, ВІТРОВІ)	24
2.3 ПАРАМЕТРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА НАДІЙНІСТЬ	28
2.4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ.....	35
Висновок до розділу 2	38
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	39
3.1 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ	39
3.2 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ	42
3.3 ПОРІВНЯННЯ З ТРАДИЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ.....	45
3.4 ВПЛИВ ВДЕ НА ЗАГАЛЬНУ НАДІЙНІСТЬ	48
Висновки з до розділу 3.....	51
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА	52
4.1 АНАЛІЗ РИЗИКІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВДЕ.....	52
4.2 ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ	56
4.3 ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ВДЕ.....	60
Висновки до розділу 4	64
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	65
5.1 ВИТРАТИ НА ВПРОВАДЖЕННЯ ВДЕ.....	65

	5
5.2 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	67
5.3 ОЦІНКА ОКУПНОСТІ.....	68
Висновк до розділу 5	69
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72
ДОДАТКИ.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АС – акумулювальна система;
АКБ – акумуляторна батарея;
ВЕС – вітрова електростанція;
ВЕУ – вітроелектроустановка;
ГАЕС – гідроакумулювальна електростанція;
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
ДЕС – дизельна електростанція;
КВВП – коефіцієнт використання встановленої потужності;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
НППНЕ – надпровідниковий індуктивний накопичувач енергії;
ПАБ – потокова акумуляторна батарея;
ПАЕС – повітряно-акумулювальна електростанція;
ПЕ – паливний елемент;
САЕП – система автономного електропостачання;
СЕС – сонячна електростанція;
СК – суперконденсатор;
СМ – супермаховик;
СФЕУ – сонячна фотоелектрична установка;
ТВЕ – технології відновлюваної енергетики;
ФЕП – фотоелектрична панель.

ВСТУП

Енергетична галузь сьогодні перебуває у стані трансформації, що зумовлена як глобальними викликами, так і національними потребами. Зростання споживання електроенергії, обмеженість традиційних паливно-енергетичних ресурсів, необхідність зменшення негативного впливу на довкілля та підвищення енергетичної безпеки стимулюють активне впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Сонячні та вітрові установки дедалі частіше інтегруються у системи електропостачання різного рівня, включаючи мережі середньої напруги, що забезпечують живлення групи підприємств.

Разом із тим, широке використання ВДЕ супроводжується низкою проблем, серед яких ключовою є надійність системи електропостачання. Відновлювані джерела характеризуються змінною генерацією, залежною від погодних умов та часу доби, що створює ризики нестабільності та перебоїв у постачанні електроенергії. Для підприємств, які працюють у безперервному режимі, навіть короточасні відключення можуть призвести до значних економічних втрат, зниження продуктивності та порушення технологічних процесів. Саме тому питання оцінювання надійності систем електропостачання середньої напруги з використанням ВДЕ є надзвичайно актуальним і потребує комплексного дослідження.

У світовому контексті проблема надійності систем з ВДЕ також є однією з ключових. Країни Європейського Союзу, США та Азії активно впроваджують гібридні системи, які поєднують сонячні та вітрові установки з акумуляторними батареями та резервними джерелами. При цьому значна увага приділяється саме забезпеченню стабільності електропостачання, адже від цього залежить конкурентоспроможність промисловості та якість життя населення. Україна, інтегруючись у європейський енергетичний простір, має враховувати ці тенденції та адаптувати їх до власних умов.

Особливу увагу слід приділити специфіці роботи групи підприємств, де електропостачання має забезпечувати не лише окремих споживачів, а цілу

виробничу інфраструктуру. У таких умовах важливим є балансування навантаження, оптимізація роботи акумуляторних систем, застосування резервних джерел та впровадження сучасних засобів автоматизації й захисту. Надійність системи визначається не лише технічними характеристиками обладнання, а й здатністю системи адаптуватися до змінних умов, швидко реагувати на аварійні ситуації та забезпечувати стабільність параметрів електроенергії.

Важливим аспектом є також економічна ефективність надійних систем електропостачання. Хоча початкові капітальні витрати на впровадження гібридних систем можуть бути значними, у довгостроковій перспективі вони забезпечують суттєву економію за рахунок зменшення споживання електроенергії з мережі, скорочення простоїв виробництва та зниження витрат на аварійні ремонти. Таким чином, надійність системи безпосередньо впливає на фінансові результати підприємств та їхню конкурентоспроможність.

Крім технічних та економічних аспектів, важливим є врахування питань охорони праці та екологічної безпеки. Експлуатація сонячних та вітрових установок, а також акумуляторних батарей потребує дотримання вимог електробезпеки, організації захисного заземлення та використання засобів індивідуального захисту персоналу. Водночас застосування ВДЕ сприяє зменшенню викидів парникових газів та зниженню негативного впливу на довкілля, що відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку.

Дослідження надійності систем електропостачання середньої напруги з використанням ВДЕ має комплексний характер і охоплює технічні, економічні, екологічні та організаційні аспекти. Отримані результати мають важливе значення для підвищення енергетичної незалежності підприємств, забезпечення стабільності виробничих процесів та розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Основні поняття надійності електропостачання

Надійність системи електропостачання є однією з ключових характеристик сучасних енергетичних систем, оскільки вона визначає здатність електричної мережі забезпечувати споживачів електроенергією необхідної якості та кількості протягом заданого часу. У науковій літературі надійність трактується як комплексна властивість, що поєднує технічні, організаційні та експлуатаційні аспекти роботи енергосистеми [1]. Вона охоплює безперервність постачання, відповідність параметрів електроенергії стандартам якості, а також здатність системи швидко відновлюватися після аварійних чи планових відключень. У практиці електроенергетики поняття надійності тісно пов'язане з категоріями безпеки та стійкості. Безпека означає захищеність системи від зовнішніх і внутрішніх загроз, тоді як стійкість характеризує її здатність зберігати працездатність під впливом збурень. Надійність же інтегрує ці властивості, формуючи узагальнену оцінку працездатності системи в часі [2]. Важливо підкреслити, що надійність не є статичною величиною: вона змінюється залежно від технічного стану обладнання, режимів навантаження, кліматичних умов та організації експлуатації.

Основними складовими надійності є безперервність електропостачання та якість електроенергії. Безперервність означає відсутність перерв у живленні споживачів, що особливо критично для промислових підприємств, медичних закладів та об'єктів інфраструктури. Якість електроенергії визначається відповідністю напруги та частоти встановленим стандартам, зокрема ДСТУ EN 50160:2014, який регламентує допустимі відхилення параметрів у розподільних мережах загального користування [3]. Порушення цих параметрів може призвести до виходу з ладу обладнання, зниження продуктивності виробництва та економічних втрат.

Для кількісної оцінки надійності застосовуються спеціальні показники. Найбільш поширеними є індекси *SAIFI* (*System Average Interruption Frequency Index*) та *SAIDI* (*System Average Interruption Duration Index*), які характеризують середню кількість та тривалість відключень на одного споживача відповідно [5]. Індекс *CAIDI* (*Customer Average Interruption Duration Index*) визначає середню тривалість одного відключення, що дозволяє оцінити ефективність відновлення електропостачання [6]. Важливим є також показник *ENS* (*Energy Not Supplied*), який відображає кількість ненаданої електроенергії споживачам і безпосередньо пов'язаний з економічними втратами [7].

У теоретичних дослідженнях широко застосовуються ймовірнісні показники, такі як *LOLP* (*Loss of Load Probability*) — ймовірність втрати навантаження системою, та *LOLE* (*Loss of Load Expectation*) — очікувана кількість годин або днів, коли система не може забезпечити навантаження [8]. Ці показники особливо важливі при аналізі систем з відновлюваними джерелами енергії, де генерація залежить від погодних умов і має стохастичний характер. Наприклад, сонячна генерація змінюється залежно від інсоляції, а вітрова — від швидкості вітру, що створює додаткові ризики для безперервності постачання.

Таким чином, надійність системи електропостачання є багатокомпонентною характеристикою, яка враховує як технічні параметри обладнання, так і зовнішні фактори. Її оцінка потребує комплексного підходу, що поєднує статистичний аналіз, моделювання режимів роботи та економічну оцінку наслідків відключень. У сучасних умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії питання надійності набуває особливої актуальності, адже саме вона визначає можливість стабільного функціонування енергетичних систем та їх здатність забезпечувати потреби споживачів.

1.2. Класифікація показників надійності

Оцінювання надійності систем електропостачання неможливе без чіткої класифікації показників, які відображають різні аспекти роботи енергетичної

системи. У науковій та практичній літературі показники надійності поділяють на кілька груп залежно від того, яку характеристику вони описують: частоту відключень, їх тривалість, обсяг ненаданої електроенергії або ймовірність виникнення дефіциту потужності [1].

Найпоширенішою є класифікація показників надійності на частотні, часові, енергетичні та ймовірнісні. Частотні показники відображають кількість відключень у системі за певний період часу. До них належить *SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)*, який показує середню кількість відключень на одного споживача за рік. Цей показник дозволяє оцінити, наскільки часто споживач стикається з перервами у постачанні електроенергії [2]. Часові показники характеризують тривалість відключень. Найбільш відомим є *SAIDI (System Average Interruption Duration Index)*, що визначає середню тривалість відключень на одного споживача протягом року. Він дає змогу оцінити, наскільки довго споживачі залишаються без електроенергії [3]. Додатково використовується *CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)*, який показує середню тривалість одного відключення, тобто наскільки швидко система здатна відновити електропостачання після аварії [4].

Енергетичні показники відображають кількість ненаданої електроенергії. Найважливішим серед них є *ENS (Energy Not Supplied)*, який визначає обсяг електроенергії, що не була поставлена споживачам через відключення. Цей показник має прямий економічний зміст, адже він дозволяє оцінити втрати підприємств та економіки в цілому від ненадійної роботи системи [5]. У практиці також застосовується *AENS (Average Energy Not Supplied)*, який показує середній обсяг ненаданої електроенергії на одного споживача. Енергетичні показники особливо важливі для промислових підприємств, де навіть короткочасні перерви можуть призвести до значних фінансових збитків.

Ймовірнісні показники використовуються переважно у теоретичних дослідженнях та моделюванні. Вони враховують стохастичний характер роботи енергосистеми, випадковість відмов обладнання та непередбачуваність зовнішніх факторів. Найбільш поширеними є *LOLP (Loss of Load Probability)* —

ймовірність втрати навантаження системою, та *LOLE (Loss of Load Expectation)* — очікувана кількість годин або днів, коли система не може забезпечити навантаження [6]. Ці показники широко застосовуються при аналізі систем з відновлюваними джерелами енергії, де генерація залежить від погодних умов і має випадковий характер. Наприклад, сонячна генерація змінюється залежно від кількості сонячних днів, а вітрова — від швидкості вітру. Тому ймовірнісні показники дозволяють оцінити ризики виникнення дефіциту потужності та визначити необхідність резервування.

У сучасних стандартах, зокрема *IEEE Std 1366-2012*, наведено чіткі визначення та методики розрахунку основних показників надійності [7]. Це забезпечує їх уніфікацію та можливість порівняння результатів між різними енергетичними компаніями та країнами. Важливо зазначити, що вибір конкретних показників залежить від мети дослідження. Якщо необхідно оцінити вплив відключень на споживачів, застосовуються частотні та часові показники. Якщо потрібно визначити економічні наслідки, використовуються енергетичні. Для прогнозування роботи системи з ВДЕ найбільш доцільними є ймовірнісні показники.

Таким чином, класифікація показників надійності дозволяє систематизувати різні аспекти роботи енергосистеми та забезпечує комплексний підхід до її оцінювання. Вона є основою для подальших розрахунків і аналізу, що особливо важливо при інтеграції відновлюваних джерел енергії, які вносять додаткову невизначеність у роботу системи.

1.3. Особливості роботи систем з ВДЕ

Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у системи електропостачання середньої напруги є одним із ключових напрямів розвитку сучасної енергетики. Вона має низку особливостей, які суттєво впливають на надійність та стабільність роботи енергосистеми. Головною відмінністю ВДЕ від традиційних джерел є їх стохастичний характер генерації, що зумовлений

залежністю від природних умов. Це означає, що виробіток електроенергії сонячними та вітровими станціями не є постійним і може значно змінюватися протягом доби та року [1].

Сонячні електростанції характеризуються високою варіативністю генерації. Виробіток залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, кількості сонячних днів, пори року та навіть географічного розташування. У літній період генерація може бути максимальною, тоді як взимку вона суттєво знижується. Крім того, навіть у межах одного дня виробіток змінюється: він зростає вранці, досягає піку вдень і знижується ввечері. Це створює проблему узгодження графіка навантаження споживачів із графіком генерації, адже пікове споживання часто припадає на вечірні години, коли сонячна генерація вже відсутня [2].

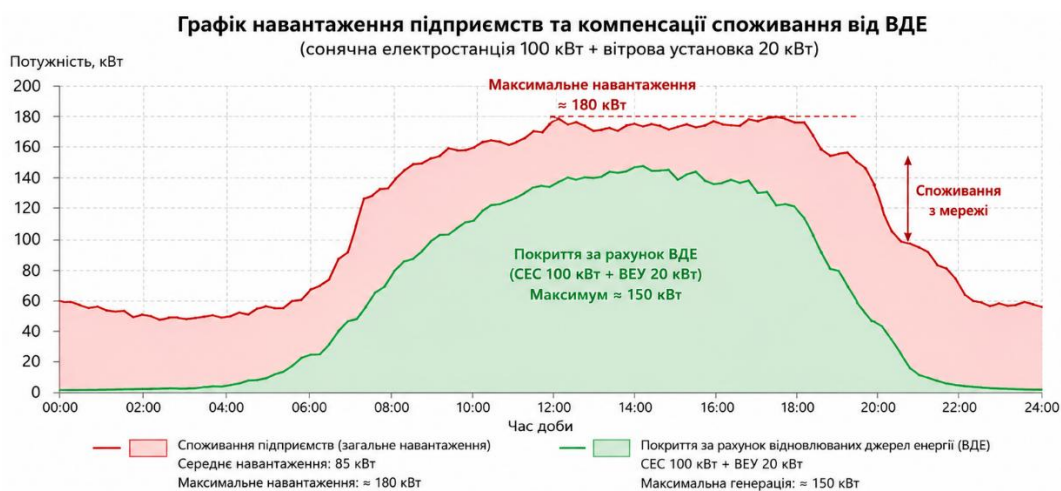


Рис.1.1. Добовий графік споживання та компенсації електростанції електроенергії системою ВДЕ

На рисунку 1.1 показано співвідношення між добовим графіком споживання електроенергії (червона зона) та компенсацією споживання за рахунок відновлюваних джерел енергії (зелена зона). Видно, що у ранкові години споживання починає зростати, тоді як компенсація ще низька. У денний період компенсація досягає максимуму, що частково перекриває потреби споживачів. У вечірні години споживання залишається значним, але компенсація різко знижується, що створює дефіцит потужності. Така невідповідність підтверджує

необхідність використання систем накопичення енергії та резервних джерел для забезпечення надійності електропостачання.

Вітрові електростанції також мають непостійний характер генерації, оскільки їхня продуктивність залежить від швидкості та стабільності вітру. У багатьох регіонах спостерігається сезонність вітрових потоків, що призводить до нерівномірного виробітку електроенергії протягом року. Крім того, навіть у межах однієї доби швидкість вітру може змінюватися, що створює додаткові труднощі для балансування системи [9].



Рис. 1.2. Залежність швидкості вітру від висоти розташування ротора вітроенергетичної установки

На рисунку 1.2 показано зміну швидкості вітру залежно від висоти розташування ротора. Видно, що зі збільшенням висоти швидкість вітру поступово зростає, що безпосередньо впливає на виробіток електроенергії. Це підтверджує важливість правильного вибору висоти башти турбіни для забезпечення максимальної ефективності роботи системи. Діаграма демонструє, що на низьких висотах швидкість вітру є недостатньою для стабільної генерації, тоді як на висотах понад 40–50 метрів вона досягає значень, які дозволяють турбіні працювати у номінальному режимі.

Особливістю роботи систем з ВДЕ є необхідність резервування та використання накопичувачів енергії. Оскільки генерація є непостійною, для забезпечення надійності електропостачання застосовуються акумуляторні системи, які накопичують надлишкову енергію у періоди високої генерації та

віддають її у періоди дефіциту. Це дозволяє згладжувати коливання виробітку та забезпечувати більш стабільне живлення споживачів [10].

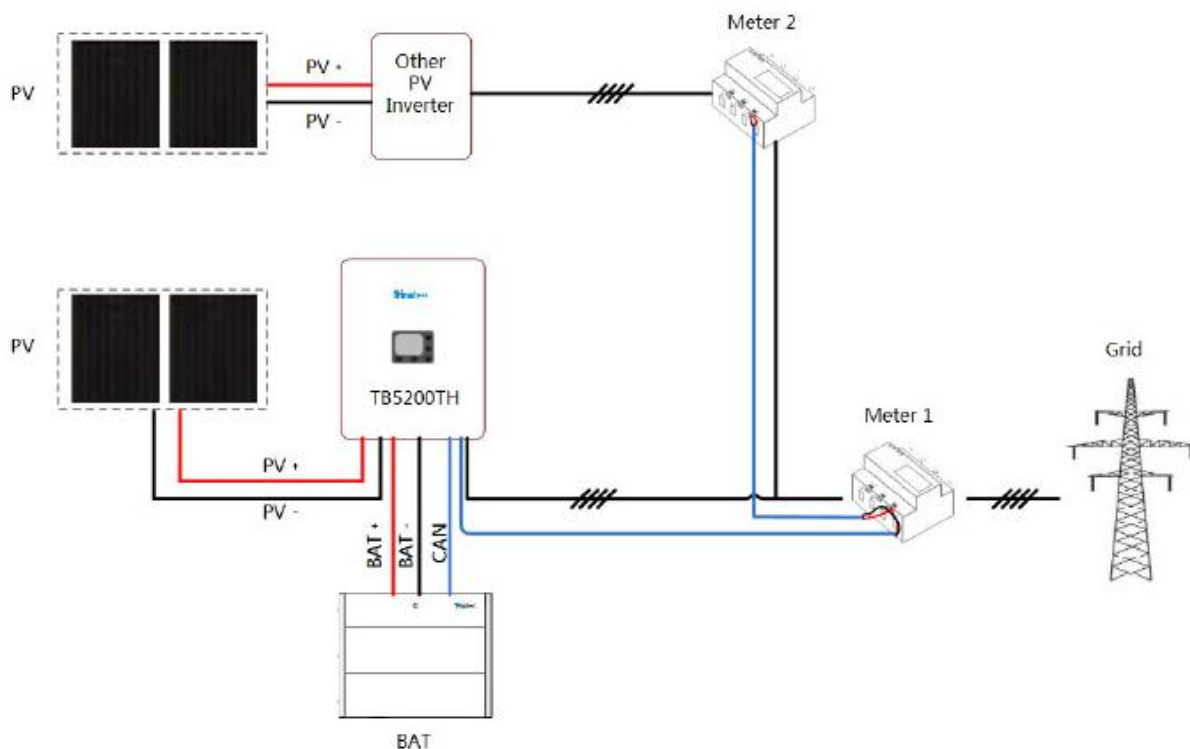
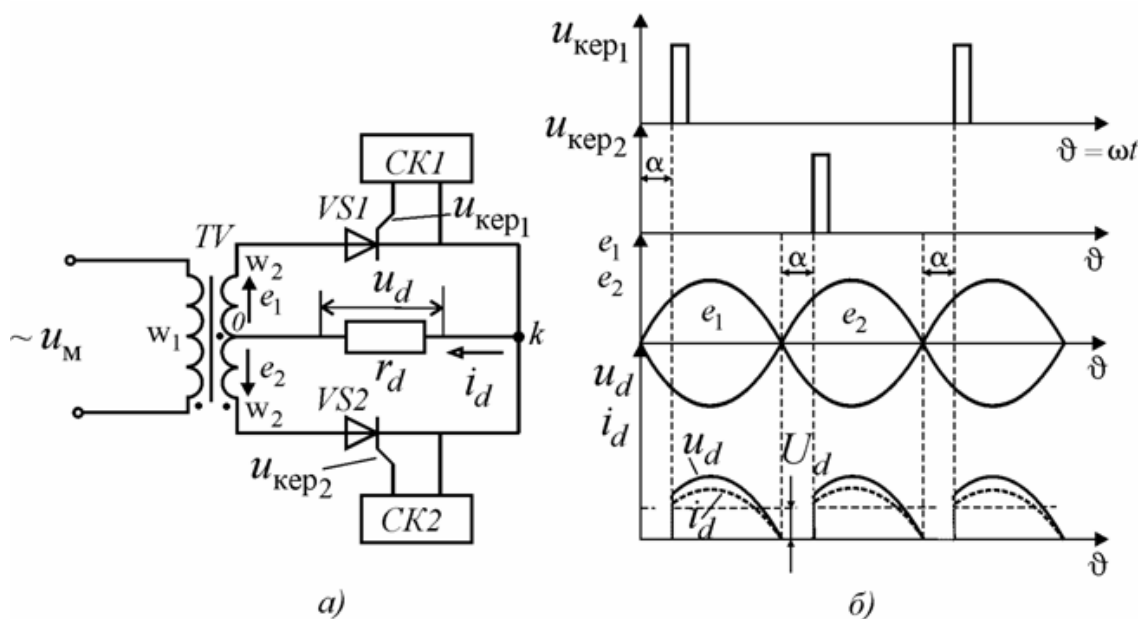


Рис.1.3. Схема інтеграції сонячної електростанції з акумуляторною системою у мережу з середньою напругою

На рисунку 1.3 показано принцип роботи сонячної електростанції, яка складається з фотоелектричних панелей, інверторів та акумуляторної батареї. Енергія від сонячних панелей через інвертори надходить у мережу, а надлишок може накопичуватися у батареї. У періоди дефіциту генерації акумулятор віддає енергію назад у систему, забезпечуючи стабільність електропостачання. Лічильники контролюють потоки енергії між мережею, споживачами та накопичувачем. Така схема дозволяє згладжувати добові коливання виробітку та підвищує надійність роботи системи з ВДЕ.

Ще однією важливою особливістю є вплив ВДЕ на якість електроенергії. Часті коливання виробітку можуть призводити до відхилень напруги та частоти, що негативно позначається на роботі обладнання. Для мінімізації цих ефектів застосовуються інвертори з функціями стабілізації та системи автоматичного регулювання напруги [11].



Ри. 1.4. Принцип роботи інвертора з фазовим керуванням для стабілізації параметрів електроенергії

На рисунку 1.4 показано електричну схему керованого випрямляча (а) та відповідні часові діаграми (б), які ілюструють вплив фазового керування на форму вихідної напруги та струму. Змінюючи фазовий кут α , система може регулювати рівень напруги на навантаженні, що дозволяє стабілізувати параметри електроенергії у системах з відновлюваними джерелами. Такий принцип широко застосовується в інверторах для компенсації коливань генерації та забезпечення якісного живлення споживачів.

Таким чином, особливості роботи систем з ВДЕ полягають у їх стохастичному характері генерації, залежності від природних умов, необхідності резервування та використання накопичувачів, а також у впливі на якість електроенергії. Ці фактори суттєво ускладнюють оцінювання надійності систем електропостачання, але водночас відкривають нові можливості для розвитку гнучких та екологічно чистих енергетичних технологій.

1.4. Аналіз сучасних підходів до оцінювання надійності

Оцінювання надійності електроенергетичних систем є одним із ключових

завдань сучасної енергетики, адже від цього залежить стабільність роботи підприємств, безперервність технологічних процесів та якість електропостачання споживачів. Традиційні методи, що базуються на аналітичних моделях і теорії ймовірностей, поступово доповнюються новими підходами, які враховують стохастичний характер генерації відновлюваних джерел енергії, інтеграцію накопичувачів та розвиток інтелектуальних мереж.

Класичні аналітичні методи спираються на математичні моделі, що описують відмови обладнання та їх вплив на систему. Використовуються показники середнього часу безвідмовної роботи, середнього часу відновлення, коефіцієнта готовності та інші. Ці методи забезпечують високу точність для невеликих систем із детермінованими параметрами, проте вони стають надто складними при моделюванні великих мереж з численними випадковими факторами. Саме тому їх застосування у сучасних умовах обмежене, хоча вони залишаються важливим інструментом для базових розрахунків [12, 18, 19].

Імітаційні методи, зокрема метод Монте-Карло, набули широкого поширення у дослідженнях надійності систем з відновлюваними джерелами. Вони дозволяють моделювати випадкові процеси, такі як зміни навантаження, коливання сонячної та вітрової генерації, а також відмови обладнання. Метод Монте-Карло особливо ефективний для систем з високою часткою ВДЕ, де аналітичні моделі стають надто громіздкими. Його недоліком є значні обчислювальні витрати, проте сучасні обчислювальні ресурси дозволяють успішно застосовувати цей підхід навіть для великих енергосистем [13, 15].

На рисунку 1.5 показано послідовність етапів застосування імітаційних методів. Спочатку формується прогностна модель, далі визначаються чинники ризику та умови кореляції. Наступним кроком є побудова імовірнісного розподілу ключових змінних, після чого здійснюється імітаційне прогнозування. Завершальним етапом є аналіз отриманих результатів, що дозволяє оцінити рівень надійності системи. Такий підхід широко застосовується у сучасних дослідженнях, особливо для систем з високою часткою відновлюваних джерел енергії [13, 15].

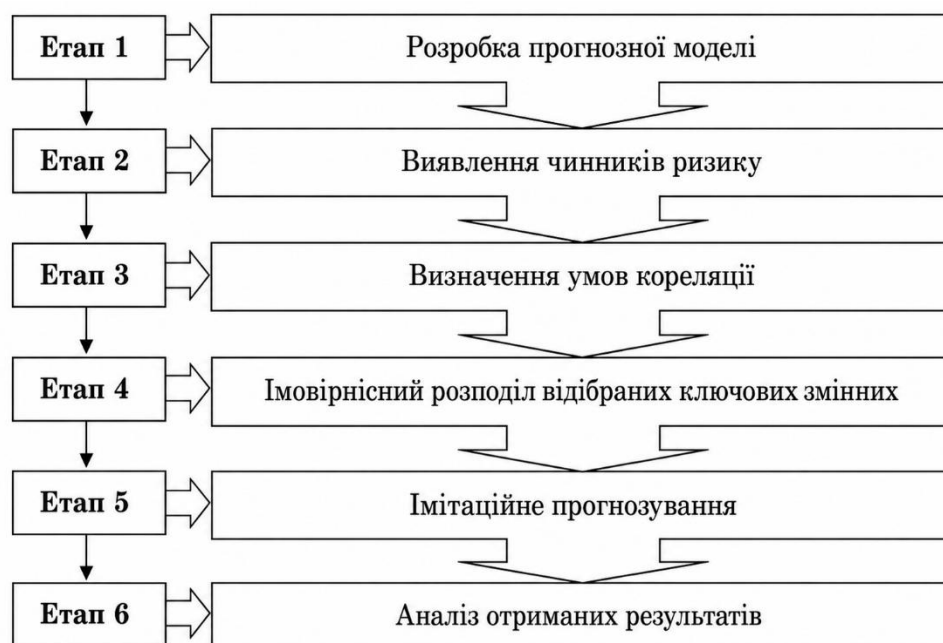


Рис.1.5. Етапи застосування імітаційних методів для оцінювання надійності енергосистеми

Гібридні методи поєднують аналітичні та імітаційні підходи. Наприклад, аналітичні моделі використовуються для визначення базових параметрів, а імітаційні — для уточнення результатів у випадкових сценаріях. Це дозволяє досягти балансу між точністю та швидкістю розрахунків. Гібридні методи особливо актуальні для систем, де необхідно враховувати як детерміновані характеристики обладнання, так і стохастичні процеси генерації та споживання.

Важливу роль у сучасних дослідженнях відіграють програмні комплекси, такі як DIgSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink, PSCAD/EMTDC. Вони дозволяють моделювати складні сценарії роботи енергосистем, враховувати реальні дані, інтегрувати моделі відновлюваних джерел та накопичувачів, а також аналізувати вплив аварійних режимів. Використання таких інструментів значно підвищує точність оцінювання та робить його більш наближеним до реальних умов.

З появою інтелектуальних мереж (Smart Grid) та цифрових технологій виникли нові підходи до оцінювання надійності. Використання великих даних дозволяє аналізувати масиви інформації про роботу системи у реальному часі.

Алгоритми машинного навчання застосовуються для прогнозування відмов обладнання та оптимізації балансування. Цифрові двійники енергосистем дають змогу моделювати роботу у реальному часі та прогнозувати наслідки різних сценаріїв. Це відкриває нові можливості для адаптивного управління та підвищення стійкості системи [14, 16].

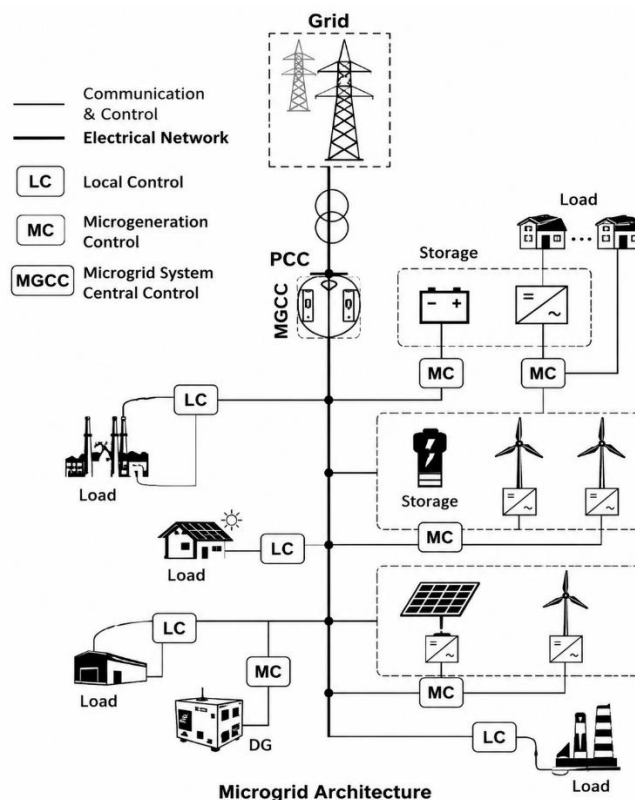


Рис. 1.6. Архітектура мікромережі як приклад Smart Grid для підвищення надійності енергосистеми

На рисунку 1.6 показано структуру мікромережі, яка включає відновлювані джерела енергії, накопичувачі, дизель-генератор та систему управління. Центральний контролер координує роботу локальних вузлів, забезпечуючи балансування генерації та споживання. Такий підхід дозволяє підвищити надійність електропостачання, зменшити ризики відмов та забезпечити адаптивне управління системою [14, 16].

Сучасні тенденції розвитку підходів до оцінювання надійності полягають у переході від статичних моделей до динамічних, які враховують змінність генерації та навантаження, у використанні гібридних методів для підвищення

точності, у впровадженні інтелектуальних технологій для прогнозування та адаптивного управління, а також у моделюванні систем з високою часткою відновлюваних джерел та накопичувачів.

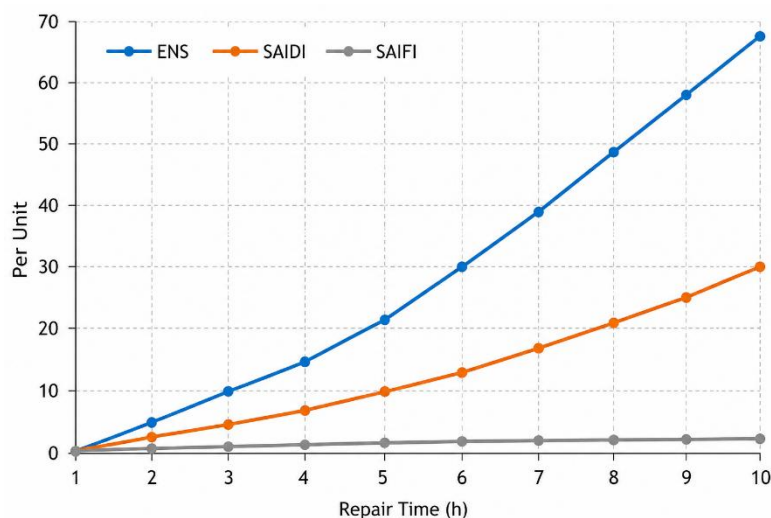


Рис.1.7. Вплив часу ремонту на показники надійності енергосистеми (ENS, SAIDI, SAIFI)

На рисунку 1.7 показано залежність основних показників надійності від часу ремонту. Із збільшенням тривалості відновлювальних робіт значно зростає показник ENS (недопоставлена енергія), лінійно збільшується SAIDI (середня тривалість переривання електропостачання), тоді як SAIFI (середня частота переривань) залишається майже незмінним. Такий аналіз дозволяє оцінити вплив організації ремонтних процесів на рівень надійності системи та є важливим інструментом для планування експлуатації [12, 17].

Таким чином, сучасні підходи до оцінювання надійності енергосистем еволюціонували від класичних аналітичних моделей до комплексних гібридних та інтелектуальних методів, які враховують стохастичність ВДЕ, використання накопичувачів та цифрові технології управління.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного огляду літератури встановлено, що надійність систем електропостачання є багатокомпонентною характеристикою, яка поєднує

технічні, організаційні та експлуатаційні аспекти. Основними складовими надійності виступають безперервність електропостачання та відповідність параметрів електроенергії стандартам якості.

Для комплексної оцінки системи застосовуються частотні (SAIFI), часові (SAIDI, CAIDI), енергетичні (ENS, AENS) та ймовірнісні (LOLP, LOLE) індекси. Вони дозволяють визначати технічні й економічні наслідки відключень, а також прогнозувати ризики дефіциту потужності в системах з відновлюваними джерелами енергії. Стохастичний характер генерації ВДЕ ускладнює оцінювання надійності, що стимулює розвиток імітаційного моделювання, зокрема методу Монте-Карло, та використання сучасних програмних комплексів як DIgSILENT PowerFactory чи MATLAB.

Додатково впровадження технологій Smart Grid, машинного навчання та цифрових двійників відкриває нові можливості для прогнозування відмов і адаптивного управління мережею. Таким чином, визначений комплекс класичних показників та ймовірнісних методів створює необхідну методичну базу для виконання подальших практичних розрахунків у цій роботі.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВДЕ

2.1. Вибір схеми електропостачання району

Оскільки група підприємств функціонує у складі районної мережі, вибір схеми електропостачання району є визначальним для забезпечення його надійності. Саме структура районної мережі визначає умови, в яких працює підприємство, можливості резервування та балансування навантаження, а також інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Таким чином, аналіз районної схеми дозволяє оцінити не лише загальний рівень надійності системи, але й конкретні ризики та переваги для окремих споживачів критичної інфраструктури [7, 12].

У практиці електроенергетики районні мережі будуються за різними схемами — радіальними, кільцевими та комбінованими. Радіальна схема є найпростішою та економічно вигідною, проте її надійність обмежена: відмова одного елемента призводить до відключення значної кількості споживачів. Кільцева схема забезпечує живлення з двох напрямків, що значно підвищує надійність, але потребує більших капітальних витрат і складнішого управління [8]. Комбіновані схеми дозволяють оптимізувати співвідношення між вартістю та надійністю, поєднуючи переваги обох підходів.

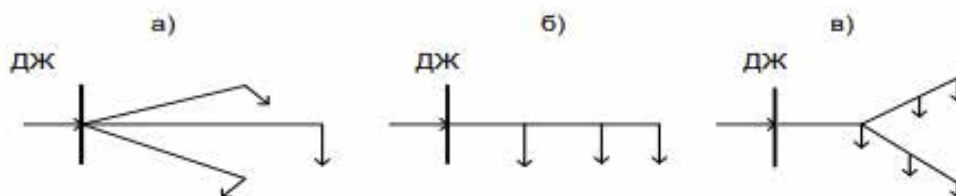


Рис. 2.1. Типові схеми електропостачання району: радіальна (а),
магістральна (б), змішана (в)

На рисунку 2.1 наведено три основні варіанти побудови районних мереж. Радіальна схема застосовується для споживачів III категорії, де допустимі

перерви у живленні. Магістральна схема забезпечує резервування та використовується для споживачів I–II категорій. Змішана схема поєднує переваги обох підходів і дозволяє оптимізувати співвідношення між вартістю та надійністю.

З інтеграцією сонячних та вітрових електростанцій у районні мережі виникає потреба у створенні мікромереж, які можуть працювати як у складі основної системи, так і автономно. Архітектура мікромережі передбачає наявність локальних джерел генерації, накопичувачів енергії та системи управління, що координує роботу всіх елементів. Такий підхід дозволяє підвищити надійність електропостачання району, зменшити ризики відмов та забезпечити адаптивне управління системою [14, 16].

При виборі схеми електропостачання району необхідно враховувати особливості навантаження, кількість споживачів критичної інфраструктури, а також географічні та кліматичні умови. У районах з високою сонячною активністю доцільно інтегрувати сонячні електростанції з акумуляторними системами, тоді як у регіонах із стабільними вітровими потоками ефективним є використання вітрових турбін. Водночас важливим є забезпечення резервування та можливість швидкого відновлення електропостачання у випадку аварійних ситуацій [13].

Таким чином, вибір схеми електропостачання району має базуватися на комплексному аналізі технічних, економічних та природних факторів. Оптимальною є схема, яка забезпечує баланс між вартістю, гнучкістю та надійністю, враховує специфіку роботи відновлюваних джерел енергії та дозволяє інтегрувати сучасні технології управління. Для груп підприємств, що функціонує у складі районної мережі, саме цей вибір визначає рівень його енергетичної безпеки та стабільності виробничих процесів.

2.2. Характеристика джерел ВДЕ (сонячні, вітрові)

Сонячна енергія є одним із найперспективніших джерел відновлюваної

енергії, що базується на прямому перетворенні сонячного випромінювання в електричну або теплову енергію. Основним елементом фотоелектричних систем є сонячна панель, яка складається з фотоелектричних комірок — напівпровідникових елементів, здатних генерувати електричний струм під дією світла. Найпоширенішими матеріалами для виготовлення таких комірок є монокристалічний та полікристалічний кремній, що забезпечують високий рівень ефективності та довговічності.

Залежно від технології виготовлення, сонячні батареї поділяються на три покоління:

Перше покоління - кремнієві комірки (моно- та полікристалічні), які займають понад 90% ринку.

Друге покоління - тонкоплівкові модулі (CdTe, CIGS, аморфний кремній), що мають нижчу ефективність, але дешевші у виробництві.

Третє покоління - органічні та перовскітні комірки, які демонструють швидке зростання ККД, але потребують доопрацювання в аспектах довговічності та стабільності.

Таблиця 2.1

Порівняння типів сонячних модулів

Тип модуля	Матеріал	ККД, %	Термін служби	Вартість	Особливості застосування
Монокристалічний	Кремній (монокристал)	18-22	25-30 років	висока	Висока ефективність, компактність
Полікристалічний	Кремній (полікристал)	15-18	20-25 років	середня	Дешевші, але менш ефективні
Тонкоплівковий	CdTe, CIGS, аморфний	10-13	10-15 років	низька	Гнучкі, легкі, для нестандартних поверхонь
Органічний	Перспективний матеріал	15-25 (експеримент)	5-10 (очікувано)	низька/середня	Високий потенціал, потребують доопрацювання

У даній роботі для моделювання сонячної електростанції використовуються монокристалічні фотоелектричні модулі з ККД близько 18-22 %, що забезпечують високу ефективність перетворення сонячної енергії.

Сучасні сонячні електростанції (СЕС) можуть працювати в автономному, мережевому або гібридному режимі. У гібридних системах електроенергія, що виробляється панелями, накопичується в акумуляторах або передається до мережі через інвертор. Для підвищення ефективності використовуються технології PERC, bifacial-модулі, половинчасті комірки та інші інновації [18].



Рис. 2.2. Схема роботи сонячної електростанції

Вітроенергетична установка (ВЕУ) — це комплекс обладнання, що перетворює кінетичну енергію вітру в електричну. Основними елементами ВЕУ є вітрогенератор, трансмісія, електрогенератор та опорна конструкція. Принцип роботи полягає в тому, що потік повітря обертає лопаті ротора, створюючи крутильний момент, який через систему передачі передається на вал генератора [19].

За конструкцією ВЕУ поділяються на:

Горизонтально-осьові установки — найпоширеніші, мають високий ККД (до 45%), потребують орієнтації на вітер.

Вертикально-осьові установки — простіші в обслуговуванні, не

потребують орієнтації, але мають нижчу ефективність і схильні до автоколивань [20].



Рис.2.3. Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

Вітроприймальний механізм разом із редуктором утворюють вітродвигун. Завдяки особливій формі лопатей у повітряному потоці виникають асиметричні сили, що створюють крутний момент.

Сьогодні найбільш поширеними є горизонтально-осьові пропелерні вітроустановки, які працюють на основі підйомної сили лопатей. Вони вважаються ефективнішими завдяки високому коефіцієнту використання енергії вітру ($\rho_c = 0,35 \dots 0,45$), достатньому пусковому моменту та здатності швидко входити в робочий режим при швидкості вітру 3–5 м/с.



Рис.2.4. Конструктивна схема ВЕУ з вертикальною віссю обертання

Вітроустановки з вертикальною віссю обертання представлена на рисунку 2.4 мають власні переваги порівняно з горизонтальними. Для них немає потреби у системах орієнтації на напрям вітру, конструкція є простішою, а гіроскопічні навантаження на лопаті, систему передачі та інші елементи значно менші. Крім того, у таких установках можна розташувати редуктор і генератор у нижній частині башти, що полегшує обслуговування.

До недоліків вітроустановок з вертикальною віссю можна віднести такі:

- значно вища схильність до втомних руйнувань, що спричиняється автоколивальними процесами, які виникають доволі часто;
- наявність пульсацій крутного моменту, що викликає коливання потужності та інших параметрів генераторів;
- за результатами останніх випробувань ВЕУ типу Дар'є та Н-ротора потужністю 5 МВт встановлено, що основною слабкою ланкою є підп'ятник-підшипник головного валу. Саме його руйнування стало причиною припинення проєктів зі створення потужних вертикально-осьових вітроустановок, тоді як розробки установок малої потужності успішно продовжуються.

Класифікація ВЕУ за потужністю наведена в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Класифікація вітроустановок

Клас установки	Потужність, МВт	Діаметр колеса, м	Кількість лопатей	Призначення
Малої потужності	До 0,1	3 – 10	2-3	Зарядка акумуляторів, побутові потреби
Середньої потужності	0,1 – 1,0	25-44	2-3	Енергетика
Великої потужності	Понад 1,0	>45	2-3	Енергетика

Сонячні та вітрові установки є ключовими компонентами сучасної енергетики, що забезпечують екологічно чисту генерацію електроенергії. Їхнє поєднання в межах комбінованих систем дозволяє компенсувати сезонні та

добові коливання продуктивності, забезпечуючи стабільне енергопостачання підприємств та інших споживачів середньої напруги. Розуміння принципів роботи, класифікації та технологічних особливостей є необхідною передумовою для ефективного проектування таких систем.

2.3. Параметри, що впливають на надійність

Надійність систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії визначається низкою параметрів, які відображають стохастичний характер генерації та особливості споживання. Серед ключових чинників виділяють зміну потужності джерел, кількість сонячних днів у році та графік навантаження споживачів. Їхній комплексний вплив формує рівень стабільності системи та визначає потребу у резервуванні й накопичувачах енергії [5,7].

Зміна потужності є одним із головних параметрів, що впливають на надійність системи з ВДЕ. Для сонячних електростанцій вона залежить від інтенсивності сонячного випромінювання, кута падіння променів та температури навколишнього середовища. Навіть короткочасне затінення панелей може призвести до різкого зниження виробітку.

Стохастичні коливання генерації сонячних та вітрових станцій призводять до ризику виникнення дефіциту потужності. Це напряду впливає на ймовірнісні показники надійності, зокрема LOLP (ймовірність втрати навантаження) та LOLE (очікувана кількість годин дефіциту).

Для сонячних електростанцій потужність визначається формулою:

$$P_{DC} = G \cdot A \cdot \eta_{PV} \quad (2.1)$$

де G – інтенсивність сонячного випромінювання [$\text{Вт}/\text{м}^2$],

A – площа сонячних панелей [м^2],

η_{PV} – коефіцієнт корисної дії фотоелемента.

У досліджуваній системі використовується сонячна електростанція

встановленою потужністю 100 кВт. Її генерація залежить від рівня сонячної інсоляції та кліматичних умов регіону. Добовий графік зміни потужності сонячної електростанції наведено на рисунку 2.5.

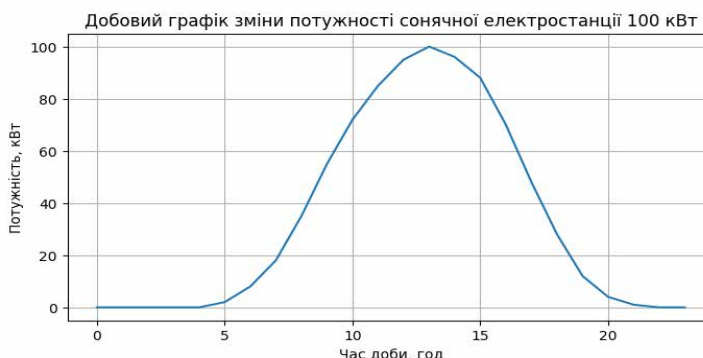


Рис. 2.5. Добовий графік зміни потужності сонячної електростанції

Для вітрових установок потужність залежить від швидкості та напрямку вітру і має кубічний характер. Навіть незначне зниження швидкості вітру може призвести до суттєвого зменшення виробітку електроенергії, що створює ризики нестабільності електропостачання. Для компенсації таких коливань використовуються системи накопичення енергії та резервні джерела живлення. Потужність ВЕУ визначається формулою:

$$P_{\text{ВЕУ}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot K \quad (2.2)$$

де ρ — густина повітря ($\approx 1,225 \text{ кг/м}^3$);

A — площа ротора, м^2 ;

V — середня швидкість вітру, м/с ;

C_p — коефіцієнт корисної дії ротора ($\approx 0,35$);

K — коефіцієнт системних втрат ($\approx 0,9$).

У роботі розглядається вітроенергетична установка потужністю 20 кВт, яка працює спільно із сонячною електростанцією та системою накопичення енергії. Її виробіток визначається метеорологічними умовами та швидкістю вітру. Залежність потужності вітроустановки від швидкості вітру наведена на рисунку 2.6.



Рис.2.6. Залежність потужності вітроустановки від швидкості вітру

Ефективність роботи ВЕУ значною мірою залежить від погодинного профілю вітру, що слід враховувати при моделюванні генерації та виборі типу ротора [21]. Інтеграція ВЕУ з накопичувачем енергії дозволяє підвищити загальний ККД системи та забезпечити гнучке управління навантаженням у нічний період [22].

Кількість сонячних днів у році є одним із ключових факторів, що визначають річну генерацію сонячної електростанції та її внесок у енергетичну надійність. Цей параметр відображає не лише кліматичні умови регіону, а й сезонні коливання інсоляції, тривалість світлового дня та частоту хмарних періодів. Для практичної оцінки використовують середню тривалість корисної інсоляції h_{sun} (годин корисної інсоляції на день) і кількість днів із корисною інсоляцією $N_{доб}$.

Цей параметр визначає середньорічний рівень генерації та впливає на показник ENS (ненадана енергія). Чим менша кількість сонячних днів, тим більший ризик виникнення дефіциту й тим вищі значення LOLP.

Для швидкої орієнтовної оцінки річної генерації застосовується наближена формула

$$E_{річ} = P_{ном} \cdot h_{sun} \cdot N_{доб} \quad (2.3)$$

де $P_{ном}$ — номінальна (пікова) потужність установки у кВт,

h_{sun} — середня кількість годин корисної інсоляції на день (год/добу),

$N_{доб}$ — кількість сонячних днів у році (дні).

Для досліджуваної сонячної електростанції потужністю 100 кВт прийнято середню тривалість корисної інсоляції 4,4 год/добу та 250 сонячних днів на рік. Тоді річна генерація становить:

$$E_{річ} = 100 \cdot 4,4 \cdot 250 = 110\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

За несприятливих погодних умов та зменшенні кількості сонячних днів до 150 річний виробіток електроенергії зменшиться до:

$$E_{річ} = 100 \cdot 4,4 \cdot 150 = 66\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Таким чином, зменшення кількості сонячних днів із 250 до 150 призводить до зниження річної генерації приблизно на 40 %. Це безпосередньо впливає на показники надійності системи електропостачання, збільшує потребу в резервуванні потужності та використанні акумуляторних систем накопичення енергії.

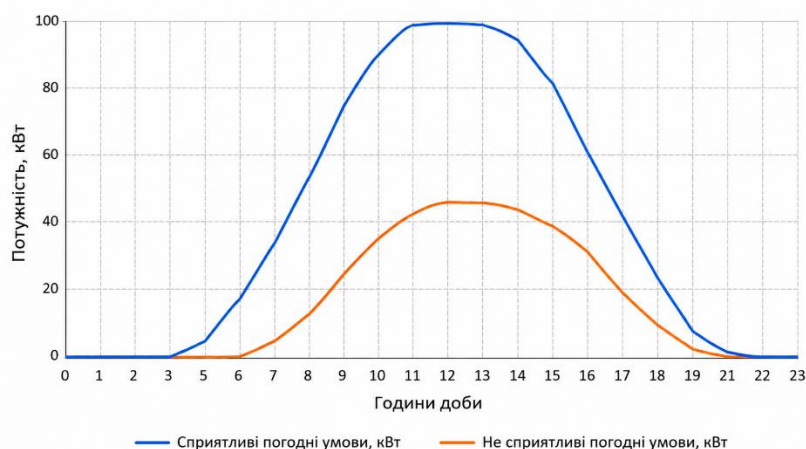


Рис.2.7. Вплив кількості сонячних днів на річну генерацію СЕС

Наведені приклади демонструють чутливість річної генерації до кількості сонячних днів, тому для більш повної оцінки надійності системи застосовується сценарний аналіз із використанням різних варіантів $N_{доб}$ та h_{sun} .

Для оцінки ризиків, пов'язаних із надійністю сонячної генерації, доцільно застосовувати сценарний підхід на основі місцевих метеоданих і погодинного моделювання: використовують довгострокові серії інсоляції або карти

глобальної інсоляції, а при їх відсутності — дані метеостанцій чи супутникові ряди, з яких будуються погодинні профілі інсоляції $G(t)$. На їхній основі розраховують годинні значення потужності $P_{AC}(t)$ з урахуванням перетворювальних втрат і інтегрують по добі та року для отримання $E_{доб}$ і $E_{річ}$; порівняння цих профілів із погодинним навантаженням $Load(t)$ дозволяє виявити години дефіциту та надлишку енергії і кількісно оцінити сумарний дефіцит

$$E_{deficit} = \sum_{h: Load_h > P_{AC,h}} (Load_h - P_{AC,h})$$

де $Load_h$ - погодинне навантаження споживачів

Для оцінювання надійності гібридної системи потужністю 120 кВт доцільно формувати щонайменше три сценарії — оптимістичний, базовий і консервативний — з різними значеннями кількості сонячних днів N_{days} і середньої тривалості корисної інсоляції h_{sun} , а також враховувати сезонні профілі (місячні або сезонні розбиття), оскільки середньорічні показники можуть приховувати критичні періоди з підвищеним дефіцитом.

На підставі розрахованого $E_{deficit}$ виконують технічну оцінку ємності акумулятора з урахуванням глибини розряду DoD , ефективності батареї $\eta_{бат}$ та експлуатаційних втрат, використовуючи співвідношення, а також аналізують пікові потужності заряд-розряду для визначення вимог до інверторів і систем управління.

Результати сценарного аналізу слугують основою для техніко-економічних рішень щодо розмірів акумуляторів, необхідності додаткових джерел або збільшення встановленої потужності, а також для вибору політики управління надлишками (зберігання проти продажу в мережу) з метою забезпечення заданого рівня надійності.

Графік навантаження споживачів є одним із визначальних чинників надійності систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Він відображає часову структуру споживання електроенергії та визначає, наскільки

ефективно генерація відновлюваних джерел може покривати потреби користувачів. У більшості випадків профіль навантаження має виражені пікові інтервали — ранковий та вечірній, коли споживання зростає через побутові та виробничі потреби. У денний час навантаження може бути відносно стабільним, тоді як у нічний період воно знижується.

Для оцінки відповідності генерації та споживання використовують погодинні профілі навантаження $Load(t)$, які порівнюють із погодинними значеннями потужності генерації $P_{AC}(t)$. Якщо у певні години $Load(t) > P_{AC}(t)$, виникає дефіцит енергії, який має бути компенсований акумуляторами або резервними джерелами. Навпаки, у години надлишку $Load(t)$.

Невідповідність між графіком навантаження споживачів та графіком генерації ВДЕ є ключовим фактором зниження надійності. У вечірні години, коли споживання максимальне, сонячна генерація відсутня, що призводить до зростання показника ENS та зниження коефіцієнта покриття навантаження.

Надійність системи значною мірою залежить від збалансованості цих двох профілів. Якщо пікові навантаження збігаються з періодами низької генерації, виникає потреба у значному резервуванні. У випадку, коли профіль генерації добре корелює з графіком навантаження, система працює стабільніше й потребує меншої ємності накопичувачів. Для практичних розрахунків доцільно використовувати реальні погодинні дані споживання, що враховують сезонні та добові коливання, а також специфіку конкретного підприємства або групи підприємств.

На рисунках 2.8 та 2.9 наведено співставлення добових профілів генерації електроенергії, навантаження споживачів та роботи акумуляторної системи для сонячної та вітрової генерації. Аналіз цих профілів дозволяє визначити періоди дефіциту й надлишку енергії, оцінити потребу в накопичувачах енергії та ефективність їх використання для забезпечення надійності електропостачання. Параметри зміни потужності генерації, кількості сонячних днів та графіка навантаження безпосередньо впливають на показники надійності системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії..

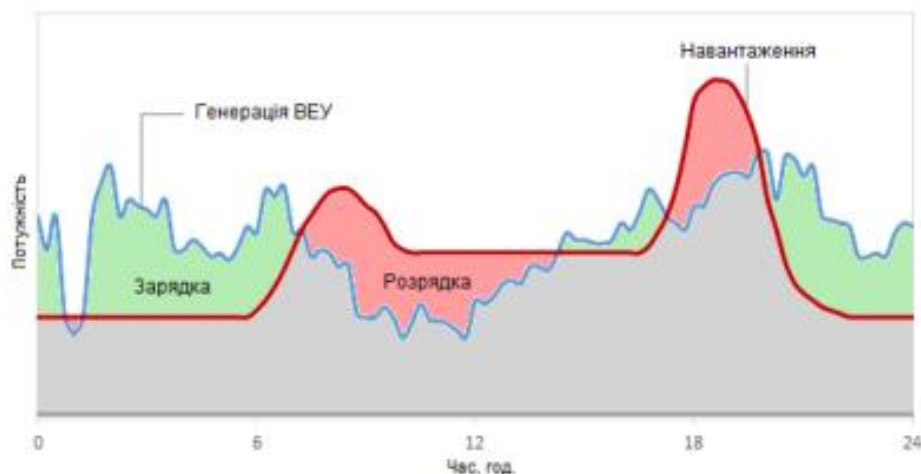


Рис.2.8. Співвідношення генерації сонячної електростанції, навантаження та роботи акумуляторної системи

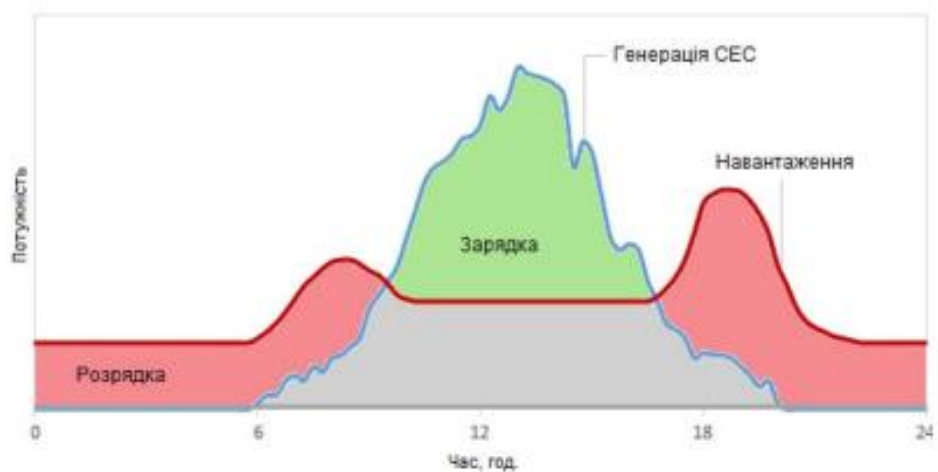


Рис.2.9. Співвідношення генерації вітроенергетичної установки, навантаження та роботи акумуляторної системи

Їх урахування в математичній моделі дає можливість кількісно оцінити ймовірність виникнення дефіциту енергії, обсяг ненаданої електроенергії та ефективність роботи акумуляторних систем.

Таким чином, урахування зазначених параметрів дозволяє не лише якісно описати вплив відновлюваних джерел енергії на роботу системи електропостачання, а й виконати кількісне оцінювання рівня її надійності. Для цього необхідно перейти від описових характеристик до формалізованої математичної моделі, яка забезпечує можливість розрахунку показників надійності (ENS, LOLP, коефіцієнта покриття навантаження тощо) та їх

практичного застосування під час дослідження систем електропостачання з ВДЕ. Саме така модель наведена у пункті 2.4.

2.4. Математична модель оцінки надійності

Математична модель оцінювання надійності систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії ґрунтується на погодинному порівнянні генерації та навантаження. Такий підхід дозволяє врахувати стохастичний характер роботи сонячних і вітрових електростанцій, а також зміну споживання електроенергії протягом доби. Основою моделі є погодинне співставлення сумарної генерації електроенергії та навантаження споживачів, що дає змогу визначити періоди дефіциту й надлишку енергії.

Сумарний дефіцит енергії за період розраховується за формулою:

$$E_{deficit} = \sum_{h: Load_h > P_{AC,h}} (Load_h - P_{AC,h}) \quad (2.5)$$

де $Load_h$ - погодинне навантаження споживачів

$P_{AC,h}$ — погодинна генерація сонячної електростанції.

Аналогічно визначається надлишок енергії, який може бути накопичений акумуляторною системою або переданий до електричної мережі.

Для кількісного оцінювання надійності використовуються такі показники: коефіцієнт покриття навантаження, ймовірність втрати навантаження (LOLP), ненадана енергія (ENS) та коефіцієнт використання встановленої потужності (Capacity Factor).

Необхідна ємність акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$C_{бат} = \frac{E_{deficit}}{DoD \cdot \eta_{бат}} \quad (2.6)$$

де DoD — допустима глибина розряду,

$\eta_{бат}$ — коефіцієнт корисної дії акумулятора. Додатково враховуються пікові потужності заряд-розряду, що визначають вимоги до інверторів і систем

управління.

Розглянемо роботу гібридної системи електропостачання для групи підприємств із середньою потужністю навантаження 85 кВт. Добове споживання електроенергії становить: $E_{load} = 85 \cdot 24 = 2040$ кВт · год. Заданими моделювання, сумарна добова генерація сонячної електростанції потужністю 100 кВт та вітроенергетичної установки потужністю 20 кВт становить $E_{ген} = \frac{15500}{365} = 425$ кВт · год.

Таким чином, сумарний дефіцит енергії дорівнює:

$$E_{deficit} = E_{load} - E_{ген} = 2040 - 425 = 1615 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Припустимо, що допустима глибина розряду акумулятора $DoD = 0,8$, а його ефективність $\eta_{бат} = 0,9$. Тоді необхідна ємність акумулятора становитиме

$$C_{бат} = \frac{1615}{0,8 \cdot 0,9} = 2243 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, для повного покриття добового дефіциту енергії в умовах даного профілю навантаження та генерації необхідна акумуляторна система ємністю близько 2240 кВт · год. У досліджуваній системі використовується акумулятор ємністю 200 кВт · год, який призначений для компенсації короточасних коливань генерації та підвищення надійності електропостачання.

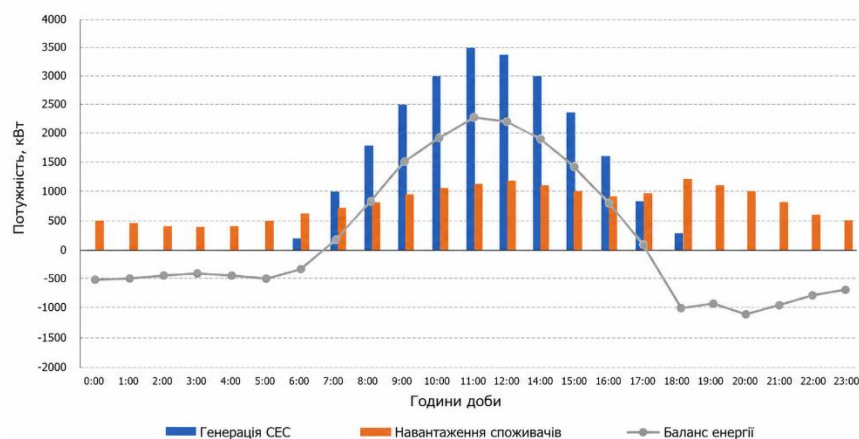


Рис. 2.9. Порівняння погодинного профілю генерації сонячної електростанції та навантаження споживачів із відображенням балансу енергії

На рисунку 2.9 наведено погодинний розподіл генерації сонячної

електростанції та навантаження споживачів протягом доби. Аналіз графіка показує, що у ранкові та вечірні години навантаження перевищує генерацію, внаслідок чого виникає дефіцит енергії. У період максимальної інсоляції, навпаки, генерація перевищує споживання, формуючи надлишок енергії, який може бути використаний для заряджання акумуляторних систем або переданий до електричної мережі. Лінія балансу енергії відображає різницю між генерацією та навантаженням і дозволяє визначити періоди дефіциту та надлишку електроенергії, що є основою для розрахунку ємності накопичувачів та оцінювання надійності системи.

Запропонована математична модель дозволяє кількісно оцінити надійність системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії шляхом погодинного порівняння генерації та навантаження, визначення дефіциту й надлишку енергії та розрахунку параметрів акумуляторних систем. Використання показників надійності та сценарного аналізу забезпечує комплексне врахування кліматичних і експлуатаційних факторів, що створює основу для техніко-економічного обґрунтування архітектури системи та підвищення її стабільності.

Важливо зазначити, що наведена модель є спрощеною і використовується для базової оцінки надійності системи. У реальних умовах необхідно враховувати не лише середні значення інсоляції та навантаження, але й їх випадкові коливання, сезонні зміни та ймовірність виникнення аварійних режимів. Саме тому доцільно застосовувати методи теорії ймовірностей та статистики, які дозволяють оцінити імовірність безвідмовної роботи системи протягом заданого періоду часу.

Класичні показники надійності, такі як імовірність безвідмовної роботи $P(t) = e^{-\lambda t}$, середній час напрацювання на відмову $T = \frac{1}{\lambda}$, а також коефіцієнт готовності системи $K = \frac{T}{T+T_B}$, забезпечують можливість кількісного порівняння різних архітектур систем електропостачання.

Для складних систем, що складаються з кількох елементів, застосовуються

моделі послідовного та паралельного з'єднання, які дозволяють визначити інтегральну надійність у залежності від структури системи.

Таким чином, запропонована математична модель поєднує енергетичний баланс та класичні показники надійності, що створює основу для комплексного аналізу роботи системи електропостачання середньої напруги з ВДЕ. Це дозволяє не лише оцінити ефективність роботи окремих елементів, але й сформулювати вимоги до резервування, акумуляції та управління енергетичними потоками, що є ключовим для забезпечення стабільності та безпеки електропостачання групи підприємств. Для практичного підтвердження та автоматизації цієї моделі було виконано її програмну реалізацію в середовищі Microsoft Excel за допомогою введення вихідних профілів інсоляції, навантаження та технічних параметрів обладнання. Такий підхід забезпечує можливість швидкої перевірки різних сценаріїв, зміни вихідних параметрів та наочної візуалізації добових балансів енергії без залучення додаткових обчислювальних ресурсів.

Висновок до розділу 2

У другому розділі виконано аналіз методів оцінювання надійності систем електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії. Розглянуто основні фактори, що впливають на надійність роботи системи, зокрема зміну потужності сонячних і вітрових установок, кількість сонячних днів та графік навантаження споживачів. На основі аналізу розроблено математичну модель, яка базується на погодинному порівнянні генерації та споживання електроенергії та дозволяє визначати дефіцит і надлишок енергії, необхідну ємність акумуляторних систем, а також оцінювати показники надійності.

Практичну перевірку моделі виконано за допомогою Microsoft Excel, де реалізовано розрахунок енергетичного балансу та побудовано графіки генерації, навантаження і балансу енергії для різних сценаріїв роботи системи. Отримані результати підтвердили можливість застосування запропонованого підходу для

оцінювання надійності систем електропостачання з ВДЕ. Сформована теоретична та практична база є основою для подальшого моделювання гібридної енергосистеми в середовищі MATLAB Simulink та визначення її показників надійності.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Вихідні дані для моделювання

Для моделювання надійності системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії використано параметри, визначені у розділі 2. Для дослідження роботи гібридної енергосистеми було побудовано модель у середовищі MATLAB Simulink.

Потужність сонячної електростанції при інтенсивності сонячного випромінювання 800 Вт/м^2 , площі панелей $694,4 \text{ м}^2$ та коефіцієнті корисної дії фотоелемента $0,18$ становить $P_{DC} = 100\,000 \text{ Вт}$. Результати моделювання підтверджують можливість забезпечення встановленої потужності 100 кВт за заданих умов сонячного випромінювання.

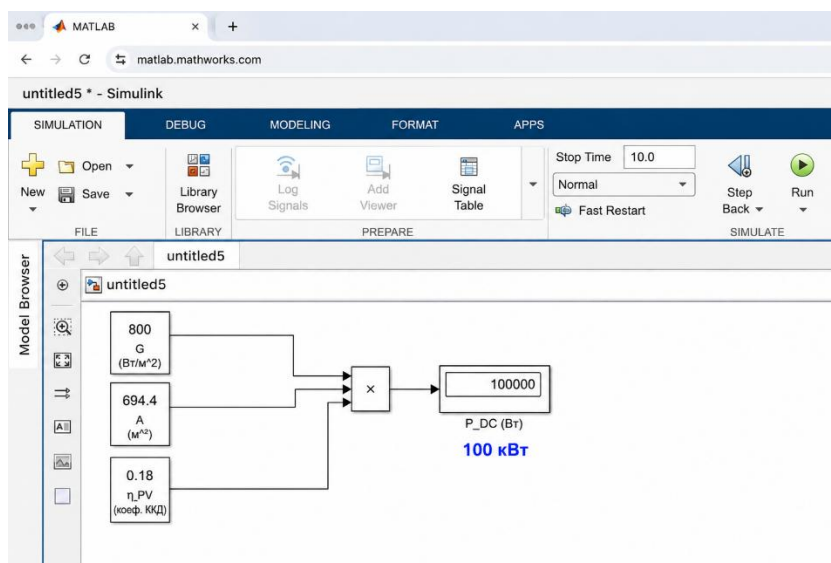


Рис. 3.1. Модель сонячної електростанції потужністю 100 кВт у Simulink

Для вітрової установки з діаметром ротора 10 м та середньою швидкістю вітру 8 м/с отримано номінальну потужність $P_{ВЕУ} \approx 20 \text{ кВт}$, що забезпечує генерацію електроенергії відповідно до вітрових умов місцевості. На рисунку 3.2 показано модель вітрової установки, потужність якої становить 20 кВт .

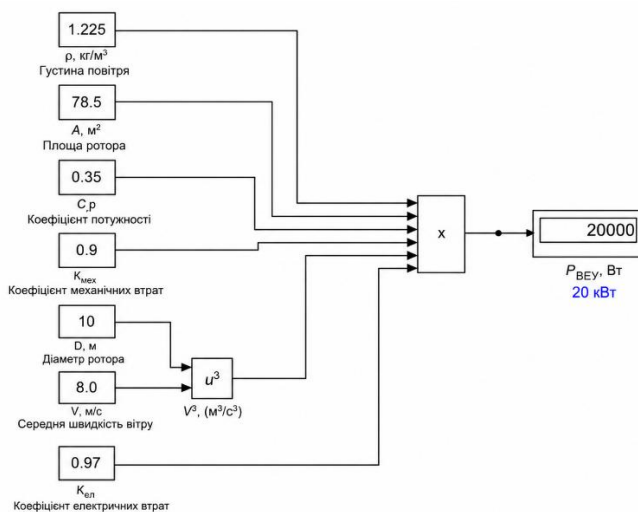


Рис. 3.2. Модель вітрової установки у Simulink

Річна генерація сонячної електростанції потужністю 100 кВт становить близько 110 000 кВт·год, тоді як річна генерація вітрової установки потужністю 20 кВт складає близько 45 000 кВт·год. Сумарний виробіток електроенергії від двох джерел (рис. 3.3) становить 155 000 кВт·год на рік.

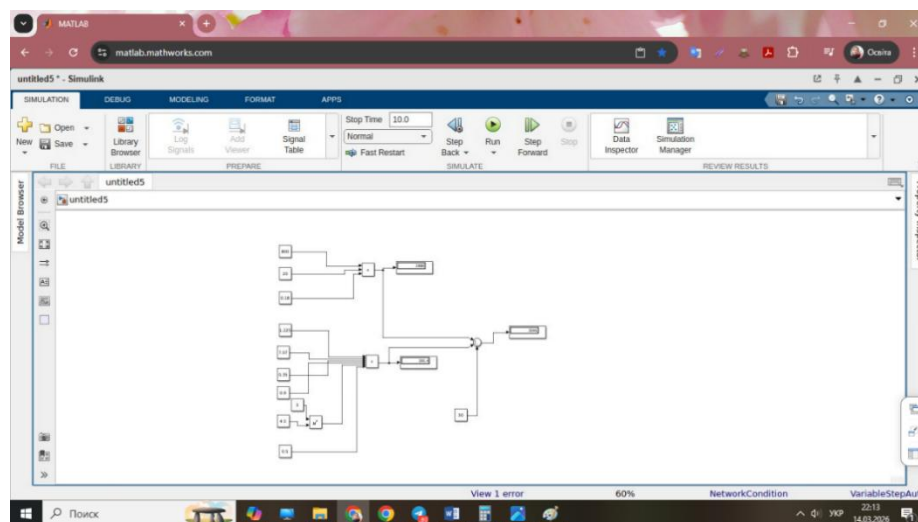


Рис. 3.3. Сумарна генерація СЕС і ВЕУ

Профіль навантаження групи підприємств характеризується середньою потужністю споживання 85 кВт. Максимальне навантаження у години пік може досягати 150–200 кВт, тоді як у нічний період воно зменшується до 40–60 кВт. Для компенсації дефіциту електроенергії та накопичення надлишкової генерації використовується акумуляторна система накопичення енергії ємністю 200

визначення показників надійності та їх аналізу у різних сценаріях роботи системи.

3.2. Розрахунок показників надійності

У процесі моделювання було отримано числові значення та графіки, що характеризують роботу гібридної енергосистеми. Сонячна станція забезпечує потужність 100 кВт, а вітрова установка – 20 кВт. Сумарна генерація від двох джерел становить 3041 Вт, що підтверджується даними на виході блоку Sum. Для компенсації дефіциту енергії використовується акумулятор, який накопичує надлишок генерації. На виході інтегратора відображається стан заряду акумулятора (SOC). Значення SOC зростає при позитивному балансі енергії та зменшується при дефіциті. Це дозволяє системі підтримувати стабільне енергопостачання навіть у випадках, коли генерація не відповідає навантаженню.

Графік у Score демонструє зміну сигналу з часом. Лінійне зростання показує накопичення енергії в акумуляторі при надлишку генерації. Таким чином, модель підтверджує працездатність системи та її здатність забезпечувати споживачів електроенергією за рахунок комбінованої роботи CEC, BEU та акумулятора.

Для аналізу надійності гібридної енергосистеми використовуються такі показники:

ENS (Energy Not Supplied) – кількість енергії, яку система не змогла забезпечити споживачам. У моделі ENS визначається як інтеграл від від’ємних значень балансу. Якщо акумулятор досягає нижньої межі заряду, ENS зростає, що свідчить про дефіцит енергії.

LOLP (Loss of Load Probability) – ймовірність втрати навантаження. Визначається як відсоток часу, коли баланс системи є від’ємним. Чим менше значення LOLP, тим більш надійною є система.

Коефіцієнт покриття навантаження – відношення сумарної генерації до

сумарного навантаження. Значення, близьке до 1, свідчить про високу здатність системи покривати потреби споживачів.

Додатково для кількісної оцінки надійності застосовуються класичні показники теорії надійності:

Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.1)$$

Для сонячної станції при $\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ $t = 1000 \text{ год}$:

$$P_1(1000) = e^{-0,00001 \cdot 1000} \approx 0,90$$

Середній час напрацювання на відмову (MTBF):

$$T = \frac{1}{\lambda} \quad (3.2)$$

Для вітрової установки при $\lambda_2 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$

$$T_2 = 10000 \text{ год}$$

Коефіцієнт готовності системи:

$$K = \frac{T}{T + T_B} \quad (3.3)$$

При $T = 8100 \text{ год}$ } та $T_B = 10 \text{ год}$:

$$K \approx 0,9988$$

Інтегральна надійність системи при паралельному з'єднанні елементів:

$$R = 1 \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Якщо $R_1 = 0,95$ (СЕС), $R_2 = 0,90$ (ВЕУ), $R_3 = 0,92$ (акумулятор), то:

$$R = 1 - (1 - 0,95) \cdot (1 - 0,90) \cdot (1 - 0,92) \approx 0,9996$$

Висновки за результатами розрахунків

Сонячна електростанція потужністю 100 кВт є основним джерелом відновлюваної генерації в системі та забезпечує найбільшу частку виробництва електроенергії.

Вітрова установка потужністю 20 кВт доповнює сонячну генерацію та підвищує надійність електропостачання, особливо в періоди недостатньої сонячної активності.

Система накопичення енергії ефективно компенсує дисбаланс між

генерацією та навантаженням, накопичуючи надлишок енергії та віддаючи його під час дефіциту потужності.

Результати розрахунків свідчать про високий рівень надійності гібридної системи. За достатньої ємності акумуляторної системи показник ENS наближається до нуля, показник LOLP має мінімальне значення, а коефіцієнт готовності перевищує 0,99.

Інтегральна надійність системи при паралельному з'єднанні елементів становить близько 0,9996, що свідчить про високу ймовірність безперервного електропостачання групи підприємств та ефективність використання відновлюваних джерел енергії для підвищення надійності системи електропостачання середньої напруги.

3.3. Порівняння з традиційними системами

Традиційні енергетичні системи, що базуються на використанні викопного палива, характеризуються високою стабільністю виробництва електроенергії. Їхня робота не залежить від погодних умов, вони здатні забезпечувати безперервне навантаження та мають значні резерви потужності. Проте така стабільність досягається ціною високих витрат на паливо, значної собівартості електроенергії та негативного впливу на довкілля через викиди парникових газів і токсичних речовин.

Гібридна енергосистема, що поєднує сонячну та вітрову генерацію з акумуляторним накопичувачем, має інші характеристики. Вона є екологічно чистою, оскільки не створює шкідливих викидів, і перспективною у довгостроковому розвитку. Основним недоліком є залежність від природних умов: сонячна генерація змінюється залежно від інтенсивності сонячного випромінювання, а вітрова – від швидкості вітру. Це створює ризик нестабільності енергопостачання. Проте використання акумулятора дозволяє компенсувати ці коливання, накопичуючи надлишок енергії у періоди високої генерації та віддаючи його у моменти дефіциту. Таким чином, надійність

гібридної системи значно зростає.

На рисунку 3.6 наведено порівняння рівня викидів CO₂ для традиційних енергетичних систем та гібридної системи. Як видно з діаграми, електростанції на вугіллі, газі та мазуті характеризуються значно вищими викидами парникових газів, тоді як гібридна система на основі сонячної та вітрової генерації з акумуляторним накопичувачем має мінімальний вплив на навколишнє середовище.

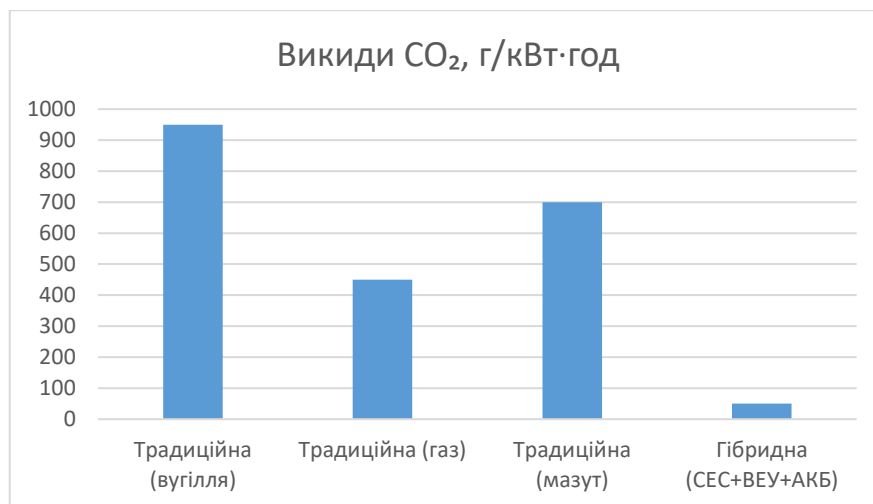


Рис.3.6. Порівняння рівня викидів CO₂ традиційних та гібридних систем

Окрім екологічних аспектів, важливим є питання економічної ефективності. Традиційні системи мають постійні витрати на паливо та тарифні складові, що підвищує кінцеву собівартість електроенергії. Гібридні системи після встановлення обладнання характеризуються значно нижчими експлуатаційними витратами, що робить їх більш вигідними у довгостроковій перспективі.

На рисунку 3.7 наведено структуру тарифів на передачу та диспетчеризацію електроенергії, яка демонструє економічні витрати традиційних систем. Як видно з рисунка, значна частина тарифу формується за рахунок інвестиційної та операційних витрат, допоміжних послуг та інвестиційної складової, що підвищує кінцеву собівартість електроенергії. Використання власної генерації на основі ВДЕ дозволяє зменшити залежність

від цих витрат та скоротити обсяги електроенергії, що закуповується з мережі.

ТАРИФИ НЕК «УКРЕНЕРГО» НА 2026 РІК



Рис. 3.7. Структура тарифів на передачу та диспетчеризацію електроенергії

Для більшої наочності доцільно також представити структурну схему гібридної системи, яка показує взаємодію сонячної та вітрової генерації з системою накопичення енергії. Така схема дозволяє зрозуміти принцип роботи системи та її здатність забезпечувати баланс між генерацією та навантаженням.

На рисунку 3.8 наведено структурну схему гібридної енергосистеми, що включає фотоелектричні модулі, вітрогенератор, акумуляторну батарею, інвертор, цифрову підстанцію та модуль моніторингу й управління. Система також взаємодіє з платформами EMS, DSM, ADMS та OCP, що забезпечує високий рівень контролю та надійності.

Таким чином, порівняння показує, що традиційні системи забезпечують стабільність і надійність, але мають значні екологічні та економічні недоліки. Гібридні системи є більш залежними від природних умов, проте завдяки системі накопичення енергії їхня надійність зростає, а екологічні та економічні переваги роблять їх перспективним напрямом розвитку сучасної енергетики.

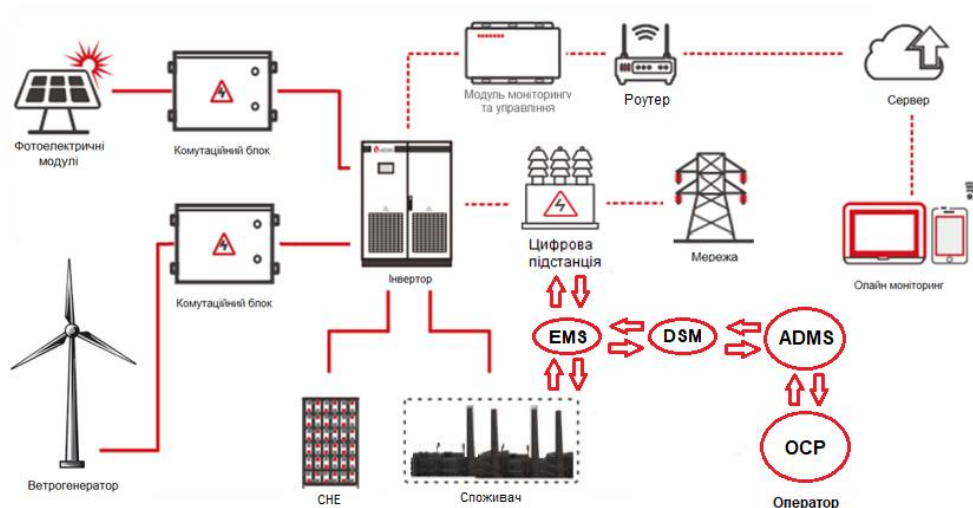


Рис.3.8. Структурна схема гібридної системи електропостачання групи підприємств з використанням ВДЕ

3.4. Вплив ВДЕ на загальну надійність

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у сучасні енергетичні комплекси є одним із ключових напрямів розвитку світової енергетики. Вона не лише змінює структуру генерації, але й суттєво впливає на показники надійності системи.

Традиційні енергетичні системи, що базуються на викопному паливі, забезпечують стабільність і передбачуваність виробництва електроенергії, проте супроводжуються високими витратами та значними екологічними проблемами. Водночас системи з ВДЕ мають очевидні переваги у вигляді екологічної чистоти та перспективності, але їхня робота залежить від природних умов, що створює додаткові виклики для забезпечення надійності. У випадку сонячної генерації виробництво електроенергії змінюється залежно від інтенсивності сонячного випромінювання, а у випадку вітрової – від швидкості та стабільності вітру. Це означає, що у певні періоди часу система може не покривати навантаження, що призводить до виникнення незабезпеченої енергії (ENS). На рисунку 3.9 показано, що у гібридній системі без акумулятора ENS може досягати значних

значень, тоді як використання накопичувача дозволяє суттєво зменшити цей показник, наближаючи систему до рівня традиційної за надійністю.

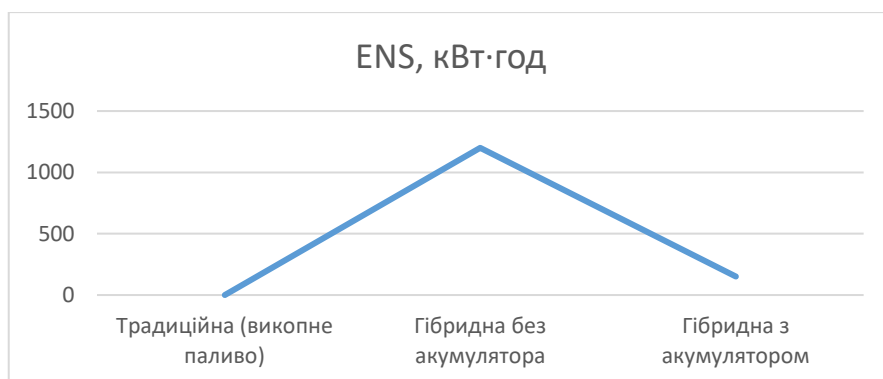


Рис. 3.9. Порівняння ENS для різних типів систем

Ще одним важливим показником є ймовірність втрати навантаження (LOLP). У традиційних системах цей показник практично дорівнює нулю, адже генерація стабільна і не залежить від погодних умов. У гібридних системах без акумулятора LOLP зростає через нестабільність генерації. Використання систем накопичення енергії суттєво знижує цей показник, підвищуючи надійність електропостачання. На рисуюнок 3.10 наведено порівняння LOLP для різних типів систем.

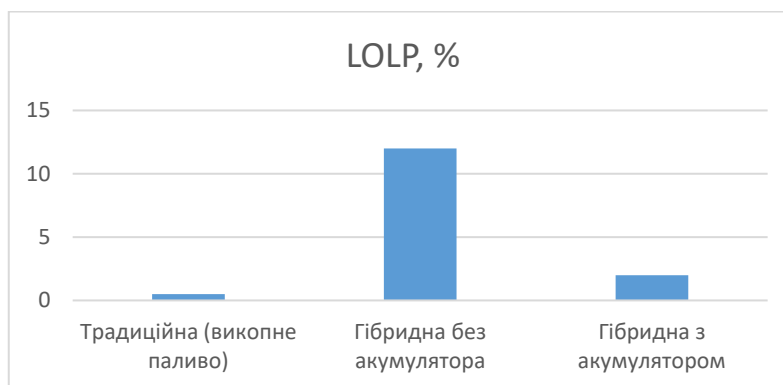


Рис. 3.10. Порівняння LOLP для різних типів систем

Не менш важливим є коефіцієнт покриття навантаження, який показує, наскільки система здатна забезпечувати споживачів електроенергією у більшості режимів роботи. Для традиційних систем він становить майже одиницю, що свідчить про їхню стабільність. У гібридних системах без накопичувачі цей коефіцієнт знижується через варіативність генерації, тоді як у системах з

аккумулятором він наближається до рівня традиційних, підтверджуючи ефективність використання накопичувачів. На рисунок 3.11 наведено порівняння коефіцієнта покриття навантаження для різних типів систем.

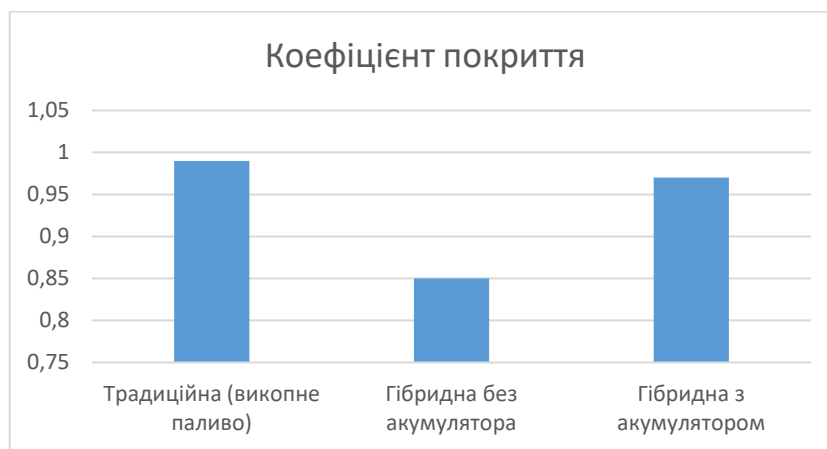


Рис.3.11. Коефіцієнт покриття навантаження для різних типів систем

У світовій практиці вже є численні приклади, які підтверджують ці висновки. У Німеччині, де частка ВДЕ перевищує 40 %, питання надійності вирішується за рахунок масштабних систем акумуляції та інтеграції «розумних» мереж. У Данії, яка активно використовує вітрову генерацію, аккумулятори та гнучке управління навантаженням дозволяють підтримувати стабільність навіть при високій варіативності вітру. У США та Китаї активно впроваджуються великі аккумуляторні парки, які компенсують нестабільність сонячної та вітрової генерації, забезпечуючи надійність енергопостачання для мільйонів споживачів.

Таким чином, вплив ВДЕ на загальну надійність системи можна охарактеризувати як складний і багатогранний. Без використання накопичувачів та систем управління надійність знижується через природну варіативність генерації. Проте у комплексі з аккумуляторами, цифровими платформами управління та гнучким балансуванням навантаження гібридні системи демонструють високий рівень стійкості, екологічності та економічної ефективності. Це робить їх стратегічно важливими для майбутнього розвитку енергетики, адже вони здатні поєднувати екологічні переваги з високими показниками надійності, що раніше було характерно лише для традиційних систем.

Висновки до розділу 3

Проведений аналіз показав, що інтеграція відновлюваних джерел енергії має комплексний характер і впливає на екологічні, економічні та технічні показники енергосистем. Поєднання сонячної та вітрової генерації з системами накопичення енергії та цифровими платформами управління (EMS, DSM, ADMS) сприяє зменшенню викидів CO₂, зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню гнучкості роботи системи. Використання накопичувачів дозволяє компенсувати варіативність генерації ВДЕ та суттєво підвищити надійність електропостачання, що підтверджується покращенням показників ENS і LOLP. Світовий досвід упровадження акумуляторних систем та концепції Smart Grid у країнах ЄС, США та Китаї підтверджує ефективність такого підходу до розвитку сучасної енергетики. Отже, інтеграція ВДЕ у комплексі з системами накопичення енергії є перспективним напрямом розвитку енергетичних систем, оскільки забезпечує баланс між екологічною доцільністю, економічною ефективністю та надійністю електропостачання.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

4.1. Аналіз ризиків при експлуатації ВДЕ

Експлуатація відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) супроводжується низкою специфічних ризиків, які необхідно враховувати для забезпечення охорони праці та безпечних умов роботи. Хоча такі технології позиціонуються як екологічно чисті та перспективні, вони мають власні небезпеки, що відрізняють їх від традиційних енергетичних систем.

У випадку сонячних електростанцій основними ризиками є ураження електричним струмом під час монтажу та обслуговування фотоелектричних панелей, падіння з висоти при роботі на дахах або конструкціях, а також тривалий вплив ультрафіолетового випромінювання на персонал. Додатково слід враховувати небезпеку займання кабельних трас у разі неправильного монтажу чи перевантаження системи [27]. Важливим чинником є також ризик пошкодження панелей під час транспортування та встановлення, що може призвести до утворення мікротріщин і подальшого зниження ефективності або навіть короткого замикання. У літературі зазначається, що при тривалому перебуванні на відкритому сонці працівники можуть зазнавати теплового стресу, що підвищує ймовірність професійних захворювань та нещасних випадків [24].

Окрему увагу слід приділити ризикам, пов'язаним із накопиченням пилу та забруднень на поверхні панелей. Це не лише знижує їхню ефективність, але й створює додаткові небезпеки при очищенні, адже персонал змушений працювати на висоті та використовувати спеціальні хімічні засоби. У дослідженнях Міжнародної організації праці наголошується, що при обслуговуванні сонячних електростанцій необхідно враховувати ризики контакту з хімічними речовинами, які застосовуються для очищення поверхонь [26].

Крім того, при експлуатації сонячних електростанцій існує ризик виникнення пожеж у разі перегріву інверторів або несправності системи

охолодження. Такі випадки вже фіксувалися у практиці експлуатації великих сонячних парків у США та Китаї, що підтверджує необхідність регулярного технічного обслуговування та моніторингу стану обладнання [23].

Вітрові електростанції характеризуються іншими ризиками. Робота на значній висоті створює небезпеку падіння, а обслуговування лопатей та турбін пов'язане з механічними травмами. Важливим фактором є акустичний вплив: шум від роботи турбін може спричиняти професійні захворювання слуху та підвищену втому персоналу. Крім того, існує ризик падіння елементів конструкції при сильних вітрах або аварійних ситуаціях [25].

Додатково слід враховувати ризики, пов'язані з роботою у складних кліматичних умовах. У випадку офшорних вітрових електростанцій небезпеку становлять високі хвилі, сильні пориви вітру та обмежений доступ до об'єктів, що ускладнює проведення ремонтних робіт [24]. Працівники змушені працювати у середовищі з підвищеною вологістю, що збільшує ризик ураження електричним струмом та корозії обладнання.

Не менш важливим є ризик обмерзання лопатей турбін у зимовий період. Це може призвести до падіння шматків льоду з великої висоти, що становить небезпеку для персоналу та навколишньої інфраструктури. У дослідженнях Міжнародної організації праці зазначається, що обслуговування вітрових турбін у холодних регіонах потребує спеціальних заходів безпеки, включаючи використання захисних зон навколо турбін [26].

Окремо слід виділити ризики, пов'язані з електричними системами турбін. Високовольтне обладнання створює небезпеку ураження струмом, особливо при проведенні ремонтних робіт у складних погодних умовах. У практиці експлуатації фіксувалися випадки займання трансформаторів та кабельних трас, що підтверджує необхідність регулярного технічного обслуговування та моніторингу стану системи [23].

Таким чином, експлуатація вітрових електростанцій потребує комплексного підходу до безпеки: від використання засобів індивідуального захисту та систем страхування при роботі на висоті до впровадження

спеціальних регламентів для роботи у складних кліматичних умовах. Лише за умови врахування всіх цих факторів можна забезпечити безпечну роботу персоналу та стабільність функціонування вітрових енергетичних об'єктів.

Акумуляторні системи зберігання енергії мають власні специфічні небезпеки. Літій-іонні батареї можуть загорятися або навіть вибухати при пошкодженні чи неправильному використанні. При руйнуванні акумуляторів можливе виділення токсичних речовин, що становить загрозу для здоров'я працівників. Також актуальним є питання утилізації відпрацьованих батарей, адже вони містять небезпечні хімічні елементи [26].

Додатково слід враховувати ризики, пов'язані з тепловим розгоном («thermal runaway»), коли навіть невелике пошкодження елемента може призвести до неконтрольованого підвищення температури та ланцюгової реакції займання. У практиці експлуатації великих акумуляторних парків у США та Південній Кореї вже фіксувалися випадки масштабних пожеж, що підтверджує необхідність створення спеціальних систем пожежогасіння та вентиляції [24].

Не менш важливим є ризик хімічного ураження. При витоку електроліту можливе виділення фтористих сполук та інших токсичних речовин, які становлять небезпеку для персоналу. У дослідженнях Міжнародної організації праці наголошується, що робота з акумуляторними системами потребує використання засобів індивідуального захисту, включаючи спеціальні рукавички та респіратори [26].

Окремо слід виділити ризики, пов'язані з утилізацією та переробкою відпрацьованих батарей. Вони містять літій, кобальт та інші рідкісні метали, які при неправильному поводженні можуть забруднювати ґрунт і воду. Тому у багатьох країнах світу вже створюються спеціалізовані підприємства з переробки акумуляторів, що дозволяє мінімізувати екологічні ризики та повторно використовувати цінні матеріали [23].

Таким чином, експлуатація акумуляторних систем зберігання енергії потребує комплексного підходу до безпеки: від технічних рішень (системи охолодження, пожежогасіння, вентиляції) до організаційних заходів (навчання

персоналу, створення регламентів утилізації). Лише за умови врахування цих факторів можна забезпечити безпечну роботу та екологічну відповідальність при використанні акумуляторних технологій.

Додатково слід враховувати кліматичні та техногенні фактори. Бурі, грози, обмерзання та інші природні явища можуть створювати додаткові небезпеки для обладнання та персоналу. Недостатня підготовка працівників або порушення правил експлуатації часто стають причиною нещасних випадків. У світовій практиці вже накопичено значний досвід аналізу ризиків при експлуатації ВДЕ. Наприклад, у дослідженнях Європейського агентства з охорони праці зазначається, що при будівництві та обслуговуванні офшорних вітрових електростанцій необхідно враховувати специфічні ризики, пов'язані з роботою у морських умовах, високою вологістю та обмеженим доступом до об'єктів [24]. В Україні Державна служба з питань праці наголошує на необхідності регулярного навчання персоналу, перевірки знань та відповідності обладнання нормативно-правовим актам [23].

Окрім природних факторів, значну небезпеку становлять техногенні ризики, пов'язані з відмовою обладнання, помилками проектування та людським фактором. У практиці експлуатації сонячних та вітрових електростанцій фіксувалися випадки займання інверторів, пошкодження кабельних трас та аварійного відключення систем через перевантаження мережі [27]. Такі інциденти підтверджують необхідність регулярного технічного обслуговування, використання систем моніторингу та впровадження сучасних технологій діагностики.

Важливим аспектом є також ризики, пов'язані з тривалим впливом кліматичних умов на персонал. Робота у спекотних регіонах може призводити до теплового стресу, тоді як у холодних кліматах небезпеку становить обмерзання обладнання та ризик переохолодження працівників. У дослідженнях Міжнародної організації праці наголошується, що для мінімізації таких ризиків необхідно впроваджувати спеціальні регламенти роботи у складних погодних умовах, включаючи обмеження часу перебування на об'єктах та використання

засобів індивідуального захисту [26].

Таким чином, аналіз ризиків показує, що безпечна експлуатація ВДЕ потребує комплексного підходу: від технічних рішень і систем захисту до навчання персоналу та створення культури безпеки. Лише за умови врахування всіх потенційних небезпек можна забезпечити стабільну роботу енергетичних об'єктів та захистити життя і здоров'я працівників.

4.2. Заходи безпеки

Для мінімізації ризиків при експлуатації відновлюваних джерел енергії необхідно впроваджувати комплекс заходів безпеки, які охоплюють технічні, організаційні та індивідуальні аспекти.

На сонячних електростанціях заходи безпеки включають використання засобів індивідуального захисту (каска, рукавички, захисні окуляри), організацію безпечного доступу до дахів та конструкцій, а також регулярне технічне обслуговування електричних з'єднань. Важливим є проведення інструктажів щодо роботи з хімічними речовинами, які застосовуються для очищення панелей, та впровадження систем моніторингу стану інверторів і кабельних трас для запобігання пожежам [27].

Додатково необхідно враховувати заходи щодо захисту працівників від теплового стресу та тривалого впливу сонячного випромінювання. Це передбачає використання спеціального одягу з високим рівнем захисту від ультрафіолету, організацію зон відпочинку у тіні та забезпечення працівників питною водою. У літературі наголошується, що дотримання таких вимог суттєво знижує ризик професійних захворювань та підвищує продуктивність персоналу [24].

Важливим елементом безпеки є також організація робіт на висоті. Для монтажу та обслуговування сонячних панелей на дахах необхідно використовувати страхувальні системи, спеціальні платформи та драбини з антивібраційними фіксаторами. Недотримання цих вимог може призвести до

падінь та серйозних травм, що підтверджується статистикою нещасних випадків у галузі [23].

Окремо слід виділити заходи щодо запобігання електричним ризикам. Усі роботи з підключення та обслуговування електричних систем повинні виконуватися лише кваліфікованим персоналом, який пройшов відповідне навчання. Використання ізольованого інструменту, перевірка справності кабельних трас та дотримання правил техніки безпеки є обов'язковими умовами для зменшення ймовірності ураження електричним струмом [26].

Заходи безпеки на сонячних електростанціях повинні бути комплексними та враховувати як технічні, так і організаційні аспекти. Лише системний підхід дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити стабільну й безпечну роботу персоналу.

На вітрових електростанціях особливу увагу приділяють безпеці робіт на висоті. Працівники повинні використовувати страхувальні системи, спеціальні пояси та троси, а також проходити регулярні тренінги з висотних робіт. Для зниження шумового навантаження застосовуються засоби захисту слуху. У холодних регіонах необхідно створювати захисні зони навколо турбін для запобігання травмам від падіння льоду з лопатей [25]. Крім того, важливим заходом є постійний контроль стану трансформаторів та кабельних систем, що дозволяє зменшити ризик пожеж та аварійних відключень [23].

Додатково слід враховувати заходи щодо організації доступу до турбін. Для цього використовуються спеціальні підйомники та внутрішні сходові системи, обладнані захисними огороженнями. Працівники повинні мати допуск до висотних робіт та проходити регулярні медичні огляди, адже робота на висоті потребує високого рівня фізичної підготовки та психологічної стійкості.

Важливим елементом безпеки є також система моніторингу стану лопатей та турбін. Використання датчиків вібрації, температури та акустичних сенсорів дозволяє своєчасно виявляти дефекти та запобігати аваріям. У літературі зазначається, що сучасні системи діагностики значно знижують ризик механічних відмов і підвищують рівень безпеки персоналу [24].

Окрему увагу слід приділити роботі в офшорних умовах. Тут заходи безпеки включають використання спеціальних рятувальних засобів, систем навігації та аварійного зв'язку. Працівники повинні проходити тренінги з евакуації та виживання у морських умовах, адже доступ до об'єктів часто обмежений погодними умовами. Міжнародна організація праці наголошує, що офшорні вітрові електростанції потребують особливих регламентів безпеки, які враховують специфіку морського середовища [26].

Заходи безпеки на вітрових електростанціях повинні бути комплексними та включати як технічні рішення (системи моніторингу, захисні зони, страхувальні системи), так і організаційні заходи (тренінги, медичні огляди, регламенти роботи в офшорних умовах). Лише системний підхід дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити безпечну експлуатацію вітрових енергетичних об'єктів.

Для акумуляторних систем зберігання енергії заходи безпеки передбачають облаштування спеціальних приміщень із системами вентиляції та пожежогасіння, використання датчиків температури та газоаналізаторів для раннього виявлення витоків. Персонал повинен проходити навчання щодо правил поводження з літій-іонними батареями, включаючи використання спеціальних рукавичок та респіраторів. Важливим є також створення регламентів утилізації та переробки відпрацьованих батарей, що дозволяє мінімізувати екологічні ризики [26].

Додатково необхідно впроваджувати системи автоматичного відключення у випадку перегріву або перевантаження акумуляторних блоків. Це дозволяє запобігти явищу теплового розгону та знизити ймовірність займання. У світовій практиці вже застосовуються спеціальні модулі охолодження, які підтримують оптимальний температурний режим роботи батарей [24].

Важливим заходом є організація зон обмеженого доступу до акумуляторних приміщень. Доступ до них повинні мати лише працівники, які пройшли відповідне навчання та мають допуск до роботи з небезпечними матеріалами. Усі роботи повинні проводитися відповідно до інструкцій з

охорони праці та міжнародних стандартів безпеки [23].

Не менш значущим є створення систем аварійного реагування. Це включає наявність планів евакуації, спеціальних засобів пожежогасіння (наприклад, інертних газів або порошкових систем), а також регулярні тренування персоналу щодо дій у разі виникнення аварійної ситуації. У дослідженнях Міжнародної організації праці наголошується, що ефективність таких заходів значно знижує рівень травматизму та втрат при аваріях [26].

Окремо слід виділити заходи щодо екологічної безпеки. Відпрацьовані акумулятори повинні передаватися на спеціалізовані підприємства для переробки, де здійснюється вилучення літію, кобальту та інших рідкісних металів. Це не лише мінімізує ризики забруднення довкілля, але й дозволяє повторно використовувати цінні ресурси у виробництві нових батарей [27].

Заходи безпеки для акумуляторних систем повинні бути комплексними та включати технічні рішення (охолодження, вентиляція, пожежогасіння), організаційні заходи (допуск, навчання, інструктажі), а також екологічні аспекти (утилізація та переробка). Лише системний підхід дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію акумуляторних технологій та знизити ризики для персоналу й довкілля.

Організаційні заходи включають розробку інструкцій з охорони праці, проведення регулярних тренінгів та перевірку знань персоналу. У багатьох країнах світу вже впроваджуються системи «культури безпеки», які передбачають постійне інформування працівників про потенційні ризики, створення механізмів зворотного зв'язку та залучення персоналу до процесу управління безпекою [24]. Важливим є також формування системи відповідальності, коли кожен працівник усвідомлює свою роль у забезпеченні безпечних умов праці.

Додатково слід зазначити, що сучасні підприємства у сфері ВДЕ активно впроваджують цифрові технології для управління безпекою. Використання автоматизованих систем моніторингу, мобільних додатків для інформування персоналу та електронних журналів інструктажів дозволяє значно підвищити

ефективність організаційних заходів. У міжнародній практиці такі рішення вже довели свою результативність у зниженні кількості нещасних випадків [26].

Отже, заходи безпеки при експлуатації ВДЕ повинні бути комплексними та враховувати специфіку кожного типу технологій. Лише поєднання технічних рішень, організаційних заходів та індивідуального захисту дозволяє забезпечити стабільну й безпечну роботу енергетичних об'єктів та захистити життя і здоров'я працівників. У результаті формується цілісна система охорони праці, яка не лише мінімізує ризики, але й сприяє підвищенню ефективності виробництва та довгостроковій надійності відновлюваних джерел енергії.

4.3. Екологічні аспекти використання ВДЕ

Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) має значний позитивний вплив на довкілля, адже дозволяє зменшити викиди парникових газів, скоротити залежність від викопних палив та сприяти переходу до сталого розвитку. За даними досліджень, перехід на ВДЕ може скоротити викиди CO₂ в енергетичному секторі на десятки відсотків, що є важливим внеском у досягнення глобальних цілей сталого розвитку [34; 35].

Сонячні електростанції сприяють зниженню рівня забруднення атмосфери, проте їхня експлуатація пов'язана з використанням великих площ земельних ресурсів. Масове встановлення сонячних панелей може призводити до зміни ландшафту та впливати на місцеві екосистеми. Додатково слід враховувати проблему утилізації відпрацьованих фотоелектричних модулів, які містять важкі метали та інші небезпечні речовини. За прогнозами, до 2050 року у світі може накопичитися близько 88 млн тонн відходів сонячних панелей, що створює серйозний виклик для екологічної безпеки [28; 29].

Окрім проблеми утилізації, важливим екологічним аспектом є вплив сонячних електростанцій на місцеву флору та фауну. Великі сонячні парки часто розташовуються на відкритих територіях, що може призводити до зменшення біорізноманіття, витіснення місцевих видів рослин і тварин та зміни природних

екосистем. У дослідженнях наголошується, що встановлення панелей у степових та пустельних регіонах може змінювати мікроклімат, знижувати рівень вологості ґрунту та впливати на природні процеси [28].

Не менш актуальним є питання виробництва сонячних панелей. Для їх виготовлення використовуються кремній, кадмій, свинець та інші хімічні елементи, які при неправильному поводженні можуть становити небезпеку для довкілля. Тому у світовій практиці активно розробляються технології «зеленого виробництва» фотоелектричних модулів, що передбачають мінімізацію використання токсичних речовин та впровадження процесів повторного використання матеріалів [29].

У міжнародних дослідженнях також підкреслюється необхідність створення системи збору та переробки відпрацьованих сонячних панелей. Це дозволить не лише зменшити екологічні ризики, але й забезпечити повторне використання цінних матеріалів, таких як кремній та рідкісні метали. Отже, розвиток сонячної енергетики має супроводжуватися впровадженням комплексних екологічних рішень, які враховують повний життєвий цикл обладнання — від виробництва до утилізації [29].

Вітрові електростанції практично не створюють викидів під час роботи, але мають інші екологічні наслідки. Найбільш поширеним є вплив на птахів та кажанів, які можуть гинути від зіткнення з лопатями турбін. У міжнародній практиці для мінімізації цих ризиків застосовуються системи моніторингу та технології, що знижують швидкість обертання лопатей у критичні періоди міграції птахів [30; 31]. Крім того, шумове навантаження та інфразвуковий вплив можуть позначатися на здоров'ї людей і тварин, що потребує додаткових досліджень та регламентів.

Додатково слід враховувати вплив на наземні екосистеми. Будівництво вітрових парків часто супроводжується зміною ландшафту, вирубкою лісів або використанням сільськогосподарських земель, що може призводити до втрати біорізноманіття. У дослідженнях наголошується, що особливо чутливими є степові та приморські екосистеми, де розташування турбін може змінювати

природні міграційні маршрути тварин [30].

Не менш важливим є питання акустичного впливу. Окрім шуму, який може спричиняти втому та проблеми зі слухом у людей, вітрові турбіни генерують інфразвук, що здатний впливати на поведінку тварин. Деякі дослідження вказують на можливі зміни у репродуктивних процесах та міграційних звичках у диких видів під впливом тривалого інфразвукового навантаження [31].

У світовій практиці також звертають увагу на візуальний вплив вітрових парків. Великі турбіни змінюють природний ландшафт і можуть викликати негативну реакцію місцевих громад, особливо у туристичних регіонах. Тому сучасні проєкти передбачають проведення оцінки впливу на довкілля (ОВД) та консультації з населенням перед будівництвом [31].

Екологічні аспекти вітрових електростанцій охоплюють не лише питання захисту птахів та кажанів, але й вплив на наземні екосистеми, акустичне навантаження та зміну ландшафту. Для мінімізації цих ризиків необхідно впроваджувати комплексні заходи — від технологічних рішень (системи моніторингу, регулювання швидкості лопатей) до організаційних (ОВД, консультації з громадами, створення охоронних зон).

Акумуляторні системи зберігання енергії дозволяють підвищити ефективність використання ВДЕ, але створюють екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією батарей. Літій-іонні акумулятори містять токсичні речовини, які при неправильному поводженні можуть забруднювати ґрунт і воду. Тому важливим є розвиток технологій переробки та повторного використання матеріалів. У сучасних дослідженнях наголошується на необхідності переходу до «зелених» акумуляторних технологій, які мінімізують ризики для довкілля та здоров'я людей [32; 33].

Додатково слід враховувати ризики, пов'язані з витоком електроліту, який може містити фтористі сполуки та інші токсичні речовини. Такі витoki становлять небезпеку не лише для персоналу, але й для навколишнього середовища, адже вони здатні проникати у ґрунтові води та спричиняти довготривале забруднення [32].

Не менш важливим є питання масштабних пожеж, які можуть виникати у великих акумуляторних парках через явище теплового розгону. Подібні інциденти вже фіксувалися у США та Південній Кореї, що підтверджує необхідність створення спеціальних систем пожежогасіння та вентиляції. У міжнародній практиці рекомендується застосовувати інертні гази та автоматизовані системи відключення для мінімізації наслідків аварій [33].

Окремо слід виділити проблему утилізації відпрацьованих батарей. За відсутності належної системи збору та переробки вони можуть накопичуватися у великих обсягах, створюючи загрозу для екологічної безпеки. У багатьох країнах світу вже створюються спеціалізовані підприємства, які займаються вилученням літію, кобальту та інших рідкісних металів із відпрацьованих акумуляторів. Це дозволяє не лише мінімізувати ризики забруднення довкілля, але й повторно використовувати цінні ресурси у виробництві нових батарей [33].

Екологічні аспекти акумуляторних систем охоплюють широкий спектр проблем — від токсичних витоків та пожеж до утилізації й повторного використання матеріалів. Лише комплексний підхід, що включає розвиток «зелених» технологій, створення систем переробки та впровадження сучасних методів безпеки, дозволить забезпечити екологічну відповідальність при використанні акумуляторних технологій.

Екологічні аспекти використання ВДЕ мають подвійний характер: з одного боку, вони забезпечують значні переваги у зменшенні негативного впливу на довкілля, а з іншого — створюють нові виклики, пов'язані з утилізацією обладнання, впливом на екосистеми та використанням земельних ресурсів. Лише комплексний підхід, що враховує як позитивні, так і потенційно негативні наслідки, дозволить забезпечити екологічну збалансованість розвитку відновлюваної енергетики.

Важливо наголосити, що екологічна відповідальність у сфері ВДЕ має охоплювати весь життєвий цикл технологій — від виробництва обладнання до його утилізації. Це означає впровадження «зелених» стандартів виробництва, створення системи збору та переробки відпрацьованих панелей і акумуляторів, а

також постійний моніторинг впливу на флору, фауну та місцеві громади. У міжнародній практиці такі заходи вже довели свою ефективність: країни ЄС активно розвивають програми повторного використання матеріалів, а вітрові та сонячні парки проектуються з урахуванням екологічних регламентів і консультацій з населенням.

Отже, екологічні аспекти ВДЕ не можна розглядати лише як додатковий фактор — вони є ключовим елементом сталого розвитку. Тільки за умови інтеграції екологічних вимог у технічні та організаційні рішення можна досягти балансу між енергетичною ефективністю, безпекою та збереженням довкілля.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проаналізовано експлуатаційні ризики, заходи з охорони праці та екологічні аспекти впровадження ВДЕ. Основними небезпеками визначено ураження струмом, пожежонебезпеку акумуляторів, аварії інверторів та механічні ризики при обслуговуванні вітроустановок. Для їх мінімізації відповідно до вимог ПУЕ та ДСТУ передбачено комплекс рішень, що включає захисне заземлення, автоматичне вимкнення живлення й засоби індивідуального захисту. З екологічного погляду система мінімізує викиди парникових газів, проте потребує суворого дотримання регламентів утилізації відпрацьованих акумуляторів і фотомодулів. Отже, дотримання норм охорони праці та екологічної безпеки є базовою умовою для захисту персоналу й сталого функціонування гібридної енергосистеми.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

5.1. Витрати на впровадження ВДЕ

Впровадження гібридної системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії у районну мережу середньої напруги потребує значних капітальних інвестицій. Оцінка витрат є ключовим етапом економічного обґрунтування, адже саме вона визначає доцільність проекту, його фінансову привабливість та створює основу для подальших розрахунків економічної ефективності й окупності.

Структура капітальних витрат

До складу витрат входять основне обладнання (сонячні панелі, вітрові турбіни, акумуляторні батареї, інвертори, системи керування та автоматики), допоміжні матеріали (кріплення, кабельні лінії, щити захисту, система заземлення), проєктні роботи та монтаж, а також логістика і резерв на непередбачені витрати.

Таблиця 5.1

Орієнтовний кошторис (2026 р.)

Компонент	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Сонячні панелі монокристалічні (550 Вт)	182 шт.	3 500	637 000
Вітрова установка (20 кВт)	1 шт.	1 150 000	1 150 000
Акумулятор LiFePO ₄ (20 кВт·год)	10 шт.	365 000	3 650 000
Інвертор (50 кВт)	2 шт.	110 000	220 000
Дизельний генератор (100 кВт)	1 шт.	580 000	580 000
Система кріплень, кабелі, автоматика	1 компл.	420 000	420 000
Монтаж роботи (≈15%)	—	—	946 000
Проєктні роботи (≈5%)	—	—	315 000

Продовження таблиці 5.1

Логістика ($\approx 3\%$)	—	—	189 000
Резерв на непередбачені витрати ($\approx 7\%$)	—	—	441 000
Загальна вартість проєкту	—	—	8 654 000

Аналіз структури витрат

Найбільшу частку займають акумуляторні батареї, що становить приблизно 42 % загального бюджету проєкту. Це є типовим для гібридних систем з використанням відновлюваних джерел енергії, де саме система накопичення забезпечує стабільність електропостачання та компенсує нерівномірність генерації сонячної та вітрової енергії.

Значними є інвестиції у вітроенергетичну установку ($\approx 13\%$) та сонячну електростанцію ($\approx 7\%$), які формують основні генеруючі потужності системи. Витрати на систему кріплень, кабельну продукцію та автоматику становлять близько 5 % загального бюджету та забезпечують фізичну інтеграцію обладнання в існуючу електричну мережу середньої напруги підприємств. Витрати на монтаж, проєктні роботи, логістику та резерв на непередбачені витрати становлять приблизно 18 % загальної вартості проєкту, що є типовим для енергетичних об'єктів такого класу складності.

На кінцеву вартість впровадження системи можуть впливати коливання валютного курсу, зміни цін на обладнання, податкове законодавство та умови постачання. Додатково, залучення державних і міжнародних програм підтримки розвитку відновлюваної енергетики (GIZ, USAID, NEFCO та ін.) може суттєво зменшити обсяг необхідних капітальних вкладень. Важливими також є кліматичні умови регіону, особливості графіків навантаження підприємств та складність інтеграції обладнання в існуючу мережу.

Таким чином, загальна вартість впровадження гібридної системи електропостачання середньої напруги з використанням відновлюваних джерел енергії становить орієнтовно 8,65 млн грн. Незважаючи на значний обсяг початкових інвестицій, реалізація проєкту забезпечує підвищення надійності

електропостачання групи підприємств, зменшення залежності від централізованої мережі, часткове заміщення електроенергії та отримання довгострокового економічного й екологічного ефекту.

5.2. Економічна ефективність

Економічна ефективність впровадження гібридної системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії визначається співвідношенням між інвестиційними витратами та економією коштів у процесі експлуатації. Вона відображає здатність системи забезпечувати споживачів електроенергією за нижчою собівартістю порівняно з традиційним постачанням від централізованої мережі.

Основними чинниками економічної ефективності є:

- скорочення витрат на закупівлю електроенергії з мережі;
- зменшення втрат від аварійних відключень та перебоїв у постачанні;
- можливість продажу надлишкової електроенергії у мережу (за умов дії «зеленого тарифу» або програм Net Metering);
- зниження витрат на резервні джерела енергії (дизельні генератори).

Розрахунок річної економії

Для групи підприємств з середньою потужністю навантаження 85 кВт річне споживання становить:

$$E_{\text{річ}} = 85 \cdot 365 \cdot 24 = 744\,600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

При тарифі на електроенергію 8 грн/кВт·год витрати на закупівлю електроенергії з мережі складають:

$$C_{\text{мережа}} = 744\,600 \cdot 8 = 5\,956\,800 \text{ грн/рік}$$

Гібридна система забезпечує генерацію:

сонячна електростанція (100 кВт) - 110 000 кВт год/рік (при 250 сонячних днях),

вітрова установка (20 кВт) - 45 000 кВт·год/рік,

сумарно - 155 000 кВт·год/рік.

Це дозволяє покрити близько 21% річного споживання. Відповідно, економія становить:

$$C_{\text{економія}} = 155\,000 \cdot 8 = 1\,240\,000 \text{ грн/рік}$$

Окрім прямої економії, система забезпечує:

- підвищення енергетичної незалежності групи підприємств;
- зменшення ризиків перебоїв у постачанні;
- екологічний ефект - скорочення викидів CO₂;
- можливість участі у програмах підтримки ВДЕ, що знижує реальні інвестиційні витрати.

Економічна ефективність гібридної системи електропостачання проявляється у значному скороченні витрат на електроенергію, підвищенні надійності електропостачання та екологічній користі. Розрахована річна економія становить близько 1,24 млн. грн, що створює основу для визначення строку окупності.

5.3. Оцінка окупності

Оцінка строку окупності є завершальним етапом економічного аналізу впровадження гібридної системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Вона дозволяє визначити, за який період інвестиції у систему будуть компенсовані за рахунок економії коштів на закупівлю електроенергії та зниження витрат на резервні джерела.

Строк окупності визначається за формулою:

$$T_{\text{окупн}} = \frac{C_{\text{інв}}}{C_{\text{економія}}} \quad (5.1)$$

де $C_{\text{інв}}$ - загальні інвестиційні витрати,

$C_{\text{економія}}$ - річна економія від власної генерації.

Загальні інвестиційні витрати (за результатами пункту 5.1) становлять:

$$C_{\text{інв}} = 8\,654\,000 \text{ грн}$$

Річна економія (за результатами пункту 5.2, при тарифі 8 грн/кВт·год):

$$C_{\text{економія}} = 1\,240\,000 \text{ грн/рік}$$

Строк окупності:

$$T_{\text{окупн}} = \frac{8\,654\,000}{1\,240\,000} = 7 \text{ років}$$

Отриманий строк окупності є прийнятним для проєктів з використанням відновлюваних джерел енергії. Після завершення цього періоду система продовжить виробляти електроенергію та забезпечуватиме додаткову економію коштів для підприємств.

Крім економічного ефекту, впровадження гібридної системи дозволяє підвищити надійність електропостачання, зменшити ризик перебоїв у роботі підприємств та скоротити споживання електроенергії з централізованої мережі.

Отже, впровадження гібридної системи електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії є економічно доцільним, а розрахований строк окупності близько 7 років підтверджує ефективність запропонованого рішення.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі здійснено економічний аналіз впровадження гібридної системи електропостачання на основі сонячної та вітрової генерації з використанням акумуляторних батарей. Розрахунки показали, що найбільша частка капітальних витрат припадає на систему накопичення енергії та генеруюче обладнання. Запропонована конфігурація забезпечує покриття близько 21 % річного споживання електроенергії та дозволяє отримати економію близько 1,24 млн грн на рік при загальній вартості проєкту 8,65 млн грн.

Розрахований строк окупності становить близько 7 років, що свідчить про економічну доцільність впровадження системи. Окрім економічного ефекту, проєкт забезпечує підвищення надійності електропостачання, зменшення ризику аварійних відключень та позитивний екологічний ефект.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено аналіз наукової літератури щодо оцінювання надійності систем електропостачання середньої напруги з використанням відновлюваних джерел енергії. Встановлено, що надійність є комплексною характеристикою, яка визначається безперервністю електропостачання та відповідністю параметрів електроенергії вимогам стандартів якості.

Для оцінювання надійності застосовуються показники SAIFI, SAIDI, CAIDI, ENS, AENS, LOLP та LOLE, які дозволяють визначати частоту і тривалість відключень, обсяги недовідпущеної електроенергії та ймовірність дефіциту потужності. Особливістю систем з ВДЕ є стохастичний характер генерації, що потребує використання імітаційного моделювання та сучасних програмних засобів, зокрема MATLAB Simulink.

У роботі виконано аналіз факторів, що впливають на надійність електропостачання, серед яких зміна потужності сонячних і вітрових електростанцій, кількість сонячних днів та графік навантаження споживачів. На основі проведеного аналізу розроблено математичну модель оцінювання надійності, яка базується на погодинному порівнянні генерації та споживання електроенергії. Модель дозволяє визначати дефіцит і надлишок енергії, необхідну ємність акумуляторних батарей та основні показники надійності системи.

Попередню перевірку моделі виконано в середовищі Microsoft Excel, де реалізовано розрахунок енергетичного балансу та побудовано графіки генерації, навантаження і балансу енергії. Отримані результати підтвердили працездатність запропонованого підходу та можливість його подальшого використання для моделювання гібридної енергосистеми в середовищі MATLAB Simulink.

Дослідження показало, що інтеграція сонячної та вітрової генерації разом із системами накопичення енергії сприяє підвищенню надійності електропостачання, зменшенню ризику аварійних відключень та покращенню показників ENS і LOLP. Додаткове використання технологій Smart Grid і

сучасних систем керування підвищує гнучкість та ефективність роботи енергосистеми.

У роботі також розглянуто питання охорони праці та екологічної безпеки під час експлуатації об'єктів відновлюваної енергетики. Основними ризиками визначено ураження електричним струмом, пожежну небезпеку акумуляторних батарей та аварійні режими роботи обладнання. Для їх мінімізації передбачено застосування захисного заземлення, автоматичних систем відключення та засобів індивідуального захисту. З екологічної точки зору система забезпечує скорочення викидів парникових газів, однак потребує належної утилізації акумуляторів і фотоелектричних модулів після завершення строку їх експлуатації.

Економічний аналіз показав доцільність впровадження гібридної системи електропостачання. Запропонована конфігурація забезпечує покриття близько 21 % річного споживання електроенергії підприємств та дозволяє отримати річну економію близько 1,24 млн грн. За загальної вартості проєкту 8,65 млн грн розрахований строк окупності становить близько 7 років.

Отже, результати дослідження підтверджують, що використання відновлюваних джерел енергії у поєднанні з системами накопичення енергії є ефективним способом підвищення надійності електропостачання групи підприємств середньої напруги, забезпечуючи одночасно економічні та екологічні переваги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коваленко І. М. Надійність електроенергетичних систем. Київ: Наукова думка, 2018.
2. Григор'єв П. О. Електропостачання промислових підприємств. Харків: ХНЕУ, 2017.
3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії, що постачається у розподільні мережі загального користування.
4. Сидоренко В. П. Аварійні режими в електричних мережах. Львів: ЛНТУ, 2019.
5. IEEE Std 1366-2012. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices.
6. Brown R. E. Electric Power Distribution Reliability. CRC Press, 2009.
7. Billinton R., Allan R. N. Reliability Evaluation of Power Systems. Springer, 1996.
8. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Wiley, 2012.
9. Chen H., Cong T. N., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 2009.
10. Казанський С.В. Надійність електроенергетичних систем: практикум. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
11. Поліщук А.Л., Казьмірук В.О., Лесько Н.І. Аналіз існуючих показників оцінювання надійності роботи електричних мереж з врахуванням ВДЕ. Вінницький національний технічний університет, 2021.
12. Довгалюк О.М., Савченко Н.П., Трет'як А.В. Підвищення надійності роботи автономних систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Харківський політехнічний інститут, 2024.
13. Adinolfi G., Ciavarella R., Graditi G., Ricca A., Valenti M. Innovative Method for Reliability Assessment of Power Systems: From Components Modeling to Key Indicators Evaluation. Electronics, 2024.
14. Reliability Assessment in Modern Power Systems. Energy Reports, 2023.

15. Принцип роботи сонячної електростанції: як вони генерують енергію від сонця. URL: <https://www.ecotech.ua/prynczyp-roboty-sonyachnoyi-elektrostantsiyi-yak-vony-generuyut-energiyu-vid-sonczya/> – Дата звернення: 20.01.2026.

16. Будова та принцип роботи обладнання вітрових електричних станцій. URL: https://profosvita.online/courses/course-v1:Profosvita+CS-S018-SGM+2025/jump_to/block-v1:Profosvita+CS-S018-SGM+2025+type@vertical+block@47e5c99da5fc41e5908f86333c018052

17. Shvedchykova I., Trykhlieb A., Trykhlieb S., Demishonkova S., Pavlenko V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under natural lighting conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 6(8). P. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317829>.

18. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97, № 11.

19. Державна служба України з питань праці. Охорона праці при використанні альтернативних джерел енергії [URL: <https://dsp.gov.ua>

20. European Agency for Safety and Health at Work. Occupational safety and health in renewable energy. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. 85 p.

21. International Labour Organization. Safety and health in the use of renewable energy systems. Geneva: ILO, 2021. 112 p.

22. Національний стандарт України ДСТУ EN 62446-1:2019. Фотогальванічні системи. Вимоги до документації, випробувань та технічного обслуговування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 47 с.

23. Побігун О. В. Екологічні аспекти відновлювальних джерел енергії. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. С. 127–135.

24. Горлов П. І., Сіохін В. Д. Аналіз міжнародного досвіду вивчення впливу вітрових електростанцій на птахів. Ukrainian Journal of Ecology. 2012.

25. Панчук В. Вплив вітрових електростанцій на довкілля: птахи, тварини та акустичний аспект. 2024.
26. Офіс Сталих Рішень. Як акумуляторні системи зберігання енергії створюють серйозні загрози для довкілля і здоров'я. 2025.
27. Nostragons Global Limited. Екологічні акумуляторні технології та рішення для зберігання енергії. 2025.
28. Мисак С., Шаповал С., Мартиняк-Андрушко М. Аналіз скорочення викидів парникових газів і забруднюючих речовин в Україні та країнах ЄС. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023.
29. Примиська С. О., Форись С. М., Усенко А. Ю. Оцінка впливу відновлюваних джерел енергії на скорочення викидів парникових газів в Україні. 2025.
30. Pavlenko V., Volianyk O. Research of technical solutions for cybersecurity of power systems with integrated renewable energy sources. *Технічна творчість*. 2024. № 8. С. 93–94.
31. Кушнір Д. В., Павленко В. М. Підвищення надійності та ефективності управління енергоспоживанням підприємства на основі технологій ІоТ. *Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології*. Київ: КНУТД, 2025. С. 169.
32. Pavlenko V., Kurliak P., Volianyk O. Designing a control system for mechanisms with variable imbalance. *Technologies and Engineering*. 2023. № 6. С. 41–52.
33. Pavlenko V., Ponomarenko I., Fedorchenko A., Onofriichuk V., Chorna O., Pylypenko V. Development and Marketing Promotion of the Educational Program Mobile Application in the Field of Electrical Engineering. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). IEEE, 2022. С. 1–5.
34. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Osadchyi V., Ponomarenko D., Hrygovetska O. Using Artificial Intelligence to Control Drones. 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). IEEE, 2023. С. 182–185.

35. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Fedorchenko A., Chorna O., Pylypenko V. Creating Educational Products With Using Data Science and Digital Marketing. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). IEEE, 2023. С. 1–4.
36. Pavlenko V., Kurliak P., Horiashchenko S., Volianyk O., Batsala Y., Nikitchuk T. Computer-integrated system of automatic balance control in centrifuge rotors with variable imbalance. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). IEEE, 2023. С. 1–5.
37. Pavlenko V., Volianyk O. Investigation of recuperator efficiency using in residential premises. Вісник КНУТД. Серія: Технічні науки. 2019. № 4. С. 77–85.
38. Павленко В. М., Ткаченко Д. О. Оцінювання ефективності використання рекуператора в системах вентиляції офісних приміщень. Технології та дизайн. 2018. № 1.
39. Павленко В. М., Бунда Н. В. Тенденції розвитку ринку інформаційних технологій. Інноватика в освіті, науці та бізнесі. Київ: КНУТД, 2022.
40. Павленко В. М., Пилипенко В. І. Удосконалення платформи Moodle для підвищення якості надання освітніх послуг. Дис. ... канд. техн. наук. – Українська інженерно-педагогічна академія, 2023.
41. Павленко В. М., Воляник О. Ю. Напрями застосування дронів в сучасних умовах. Технічна творчість. 2023. № 7. С. 188–190.
42. Павленко В. М., Наконечний І. О. Ефективність використання інформаційних технологій в побуті. Інтеграція науки і освіти. Київ: КНУТД, 2022.
43. Павленко В. М., Пономаренко І. В. Створення мобільних додатків для туристичного ринку. Інтеграція науки і освіти. Київ: КНУТД, 2022.
44. Павленко В. М., Волівач А. П. Застосування інформаційно-комунікаційних технологій під час викладання технічних спеціальностей. Інтеграція науки і освіти. Київ: КН

ДОДАТОК А

Таблиця А.1

**Вихідні параметри елементів системи (інтенсивність відмов λ ,
середній час напрацювання на відмову МТBF, коефіцієнт готовності К)**

P1(100)=	0,99
λ_2 =	0,00001
T3=	8100
T4=	7860
λ_5 =	0,000025

λ_1 =	0,000101
λ_2 =	0,00001
λ_3 =	0,000123
λ_4 =	0,000127
λ_5 =	0,000025

0,000386

Tc= 2589,422

t,	P1(t)	P2(t)	P3(t)	P4(t)	P5(t)	Pc(t)
0	0,99	1	1	1	1	0,99
100	0,989950834	0,9990005	0,987775	0,98738	0,997503122	0,962135
200	0,980002653	0,998002	0,9757	0,97492	0,995012479	0,925705
300	0,970154444	0,9970045	0,963773	0,962617	0,992528055	0,890653
400	0,9604052	0,996008	0,951991	0,950469	0,990049834	0,856929
500	0,950753929	0,9950125	0,940353	0,938474	0,9875778	0,824482
600	0,941199644	0,994018	0,928857	0,926631	0,98511194	0,793263
700	0,931741373	0,9930244	0,917502	0,914937	0,982652236	0,763227
800	0,922378149	0,9920319	0,906286	0,903391	0,980198673	0,734328
900	0,913109017	0,9910404	0,895207	0,89199	0,977751237	0,706523
1000	0,903933033	0,9900498	0,884264	0,880734	0,975309912	0,679771
1100	0,89484926	0,9890603	0,873454	0,869619	0,972874683	0,654031
1200	0,885856771	0,9880717	0,862776	0,858645	0,970445534	0,629267
1300	0,876954649	0,9870841	0,852229	0,847809	0,96802245	0,60544
1400	0,868141985	0,9860975	0,841811	0,83711	0,965605416	0,582515
1500	0,859417882	0,9851119	0,83152	0,826546	0,963194418	0,560459

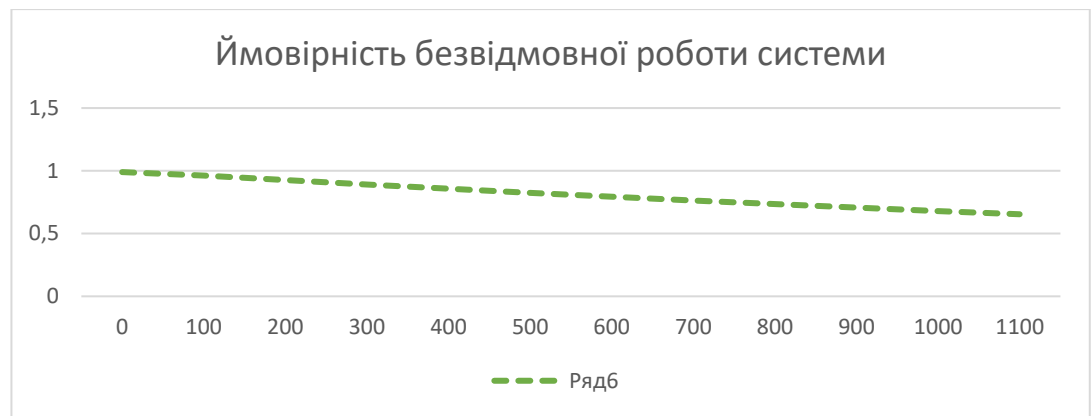
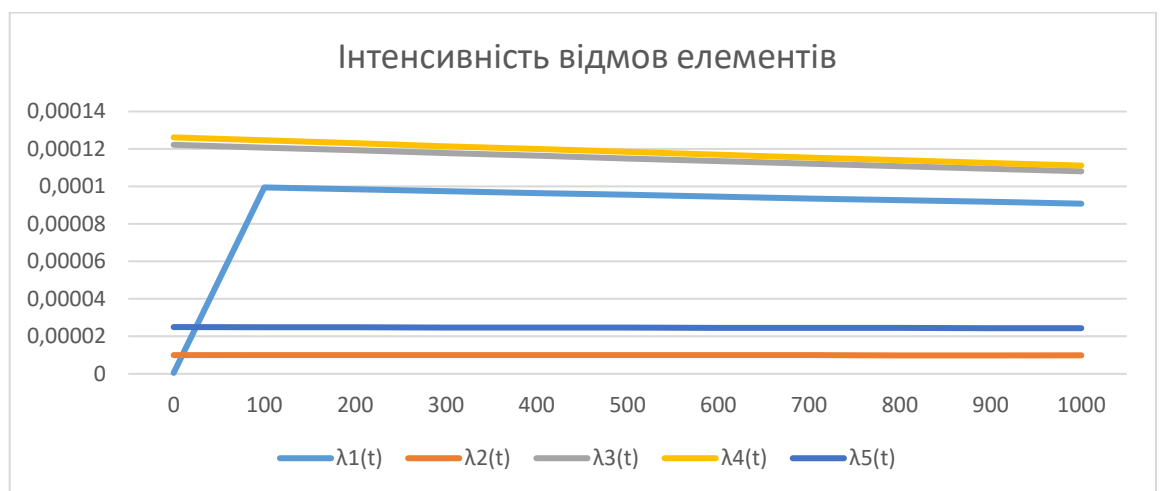
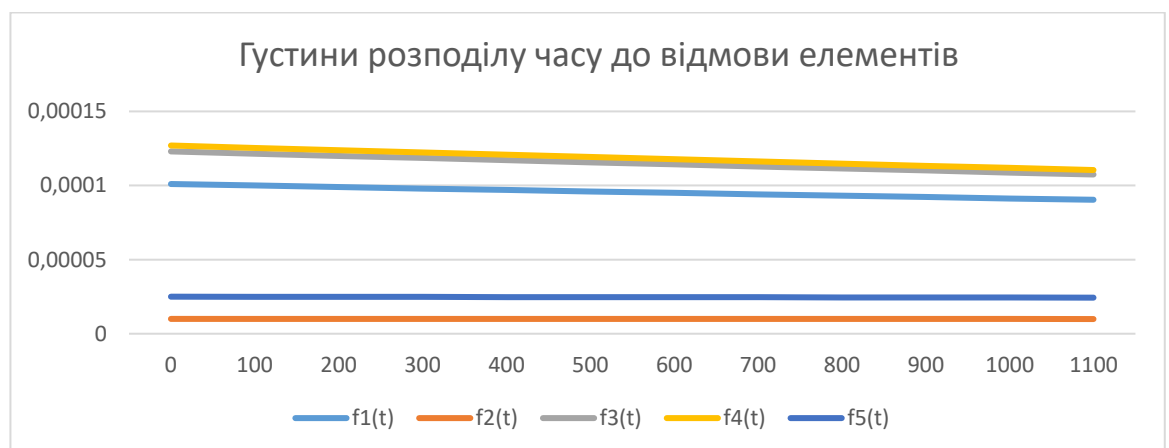
t,	$\lambda_1(t)$	$\lambda_2(t)$	$\lambda_3(t)$	$\lambda_4(t)$	$\lambda_5(t)$	$\lambda_c(t)$
0	4,91663E-07	9,995E-06	0,000122	0,000126	2,49688E-05	0,000279
100	9,94818E-05	9,985E-06	0,000121	0,000125	2,49064E-05	0,000364
200	9,84821E-05	9,975E-06	0,000119	0,000123	2,48442E-05	0,000351
300	9,74924E-05	9,965E-06	0,000118	0,000121	2,47822E-05	0,000337
400	9,65127E-05	9,955E-06	0,000116	0,00012	2,47203E-05	0,000324
500	9,55428E-05	9,945E-06	0,000115	0,000118	2,46586E-05	0,000312
600	9,45827E-05	9,935E-06	0,000114	0,000117	2,4597E-05	0,0003
700	9,36322E-05	9,925E-06	0,000112	0,000115	2,45356E-05	0,000289
800	9,26913E-05	9,915E-06	0,000111	0,000114	2,44744E-05	0,000278
900	9,17598E-05	9,905E-06	0,000109	0,000113	2,44133E-05	0,000268
1000	9,08377E-05	9,896E-06	0,000108	0,000111	2,43523E-05	0,000257

Продовження таблиці А.1

1100	8,99249E-05	9,886E-06	0,000107	0,00011	2,42915E-05	0,000248
1200	8,90212E-05	9,876E-06	0,000105	0,000108	2,42308E-05	0,000238
1300	8,81266E-05	9,866E-06	0,000104	0,000107	2,41703E-05	0,000229
1400	8,7241E-05	9,856E-06	0,000103	0,000106	2,411E-05	0,000221
1500	-	-	-	-	-	-

t,	f1(t)	f2(t)	f3(t)	f4(t)	f5(t)	fc(t)
0	0,000101	0,00001	0,000123	0,000127	0,000025	0,000276
100	9,9985E-05	9,99E-06	0,000121	0,000125	2,49376E-05	0,000351
200	9,89803E-05	9,98E-06	0,00012	0,000124	2,48753E-05	0,000324
300	9,79856E-05	9,97E-06	0,000119	0,000122	2,48132E-05	0,0003
400	9,70009E-05	9,96E-06	0,000117	0,000121	2,47512E-05	0,000278
500	9,60261E-05	9,95E-06	0,000116	0,000119	2,46894E-05	0,000257
600	9,50612E-05	9,94E-06	0,000114	0,000118	2,46278E-05	0,000238
700	9,41059E-05	9,93E-06	0,000113	0,000116	2,45663E-05	0,000221
800	9,31602E-05	9,92E-06	0,000111	0,000115	2,4505E-05	0,000204
900	9,2224E-05	9,91E-06	0,00011	0,000113	2,44438E-05	0,000189
1000	9,12972E-05	9,9E-06	0,000109	0,000112	2,43827E-05	0,000175
1100	9,03798E-05	9,891E-06	0,000107	0,00011	2,43219E-05	0,000162
1200	8,94715E-05	9,881E-06	0,000106	0,000109	2,42611E-05	0,00015
1300	8,85724E-05	9,871E-06	0,000105	0,000108	2,42006E-05	0,000139
1400	8,76823E-05	9,861E-06	0,000104	0,000106	2,41401E-05	0,000128
1500	8,68012E-05	9,851E-06	0,000102	0,000105	2,40799E-05	0,000121

ДОДАТОК Б

Рисунок Б.1 Ймовірність безвідмовної роботи елементів системи $P(t)$ Рисунок Б.2 Інтенсивність відмов елементів $\lambda(t)$ Рисунок Б.3 Густина розподілу часу безвідмовної роботи $f(t)$

ДОДАТОК В

Таблиця В.1

КАРТКА ОБЛІКУ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТІВ

№ з/п	Позначення стандарту	Найменування стандарту	В якому розділі роботи використано	Що саме використано
1	ПУЕ:2017	Правила улаштування електроустановок	Розділ 2	Загальні вимоги до електроустановок, вибір перерізів провідників, вимоги до захисних апаратів.
2	ПУЕ, Глава 1.7	Заземлення і захисні заходи електробезпеки	Розділ 2, Розділ 3	Вимоги до захисного заземлення обладнання (сонячних панелей, інвертора, ВЕУ) для захисту від ураження електричним струмом.
3	ДСТУ EN 50160:2014	Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності	Розділ 2	Вимоги до якості електроенергії (номінальна напруга 230 В, частота 50 Гц), що має забезпечувати інвертор.
4	ДСТУ 7237:2011	Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту	Розділ 3	Загальні принципи забезпечення електробезпеки при проєктуванні та експлуатації автономної електроустановки.
5	ДСТУ ISO 5457:2006	Документація технічна на вироби. Кресленики. Розміри та формати	Додатки	Правила оформлення графічної частини роботи, зокрема схем та креслень, що стосуються формату аркушів.
6	ДСТУ 3429-96	Електрична частина електростанції та електричної мережі. Терміни та визначення	Всі розділи	Використання стандартизованої термінології при описі елементів та режимів роботи системи електропостачання.

