

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії в
електроенергетичних системах

Виконала: студентка 4 курсу,
групи ЕСМ-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні системи та мережі»

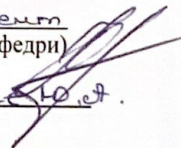
Ластівка В.Б. 

Керівник: д.т.н., професор.,
проф. каф. ЕСС Лежнюк П.Д.


« 6 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., асистент, асистент
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

кафедри ЕССЕМ Шухмачев О.І.

« 6 » 06 2025 р. 

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.


« 06 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.
«20» червня 2025р.

ЗАВДАННЯ **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ластівка Вікторія Богданівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії в електроенергетичних системах»

Керівник роботи д.т.н., проф., професор каф. ЕСС Лежнюк П.Д.
затверджена наказом вищого навчального закладу від № 97 від 20.03.2025.

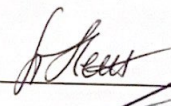
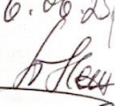
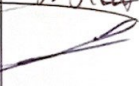
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2025 року.

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Види ВДЕ та їх стан сьогодні в Україні
2. Сучасні рішення для оптимізації ЛЕС з ВДЕ. 3. Балансування режимів
ЛЕС з ВДЕ. 4. Охорона праці Висновки. Література.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) 1. Частка різних видів ВДЕ у світовому енергоспоживанні. 2.
Принцип роботи фотоелектричних систем. 3. Принцип роботи
геліотермальних систем. 4. Світовий розподіл потужностей СЕС (2024). 5.
Принцип роботи ВЕС. 6. Принцип роботи ГЕС. 7. Технології перетворення
біомаси. 8. Геотермальна енергія. 9. Принцип роботи СЗЕ. 10. Висновок

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Лежнюк П.Д. д.т.н., проф., проф кафедри ЕСС	20.03.25 	6.06.25 
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

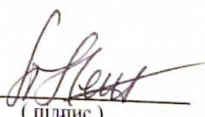
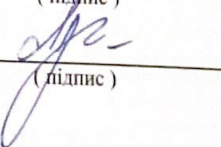
7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Прізвище
		початок	кінець	
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24	
2	Види ВДЕ та їх стан сьогодні в Україні (розділ 1 БКР)	18.02.24	10.03.24	
3	Сучасні рішення для оптимізації ЛЕС з ВДЕ (розділ 2 БКР)	16.03.24	10.04.24	
4	Балансування режимів ЛЕС з ВДЕ (розділ 3 БКР)	11.04.24	11.05.24	
5	Охорона праці (розділ 4 БКР)	20.04.24	19.05.24	
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	20.05.24	24.05.24	
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.24	02.06.24	
	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР	02.06.24	04.06.24	
	Рецензування БКР	08.06.24	10.06.24	
	Захист БКР	За графіком		

Студент

Керівник роботи


(підпис)

(підпис)

В. Б. Ластівка

П.Д. Лежнюк

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ВИДИ ВДЕ ТА ЇХ СТАН СЬОГОДНІ В УКРАЇНІ	7
1.1 Сонячна енергетика	10
1.2 Вітрова енергетика	16
1.3 Гідроенергетика	20
1.4 Біоенергетика	24
1.5. Геотермальна енергія	29
1.6. Комбінування та інтеграція ВДЕ	33
2 СУЧАСНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛЕС З ВДЕ	38
2.1 Накопичувачі як частина ВДЕ	38
2.2 Самовідновлення електропостачання ЛЕС	42
2.3 Віртуальні електростанції	46
3 БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ ЛЕС З ВДЕ	54
3.1 Задача оптимізації балансування ЛЕС	54
3.2 Використання критеріального методу в задачах балансування	55
3.3 Математична модель оптимізації засобів резервування ВДЕ	58
3.4 Застосування критеріального методу в ЛЕС	64
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	65
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження	65
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	65
4.1.2 Електробезпека	68
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	71
4.2.1 Мікроклімат	71
4.2.2 Склад повітря робочої зони	71
4.2.3 Виробниче освітлення	72
4.2.4 Виробничий шум	73
4.2.5 Виробничі вібрації	73

4.3 Пожежна безпека	74
ВИСНОВОК	78
ЛІТЕРАТУРА	81
ДОДАТКИ	86

ВСТУП

Енергетична система України переживає період докорінної трансформації, прискореної як глобальними трендами декарбонізації, так і нагальною потребою у зміцненні стійкості та незалежності в умовах повномасштабної війни. Масовані атаки на енергетичну інфраструктуру виявили вразливість централізованої моделі та підкреслили критичну важливість розвитку розподіленої генерації, зокрема на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). ВДЕ, такі як сонячна та вітрова енергія, не лише сприяють досягненню екологічних цілей та зменшенню залежності від імпорту, але й дозволяють створювати більш гнучкі та менш вразливі локальні енергетичні системи (ЛЕС) [1,2].

Проте, ключовою перешкодою на шляху до широкого впровадження ВДЕ залишається їхня притаманна нестабільність. Залежність від погоди та часу доби призводить до непередбачуваних коливань генерації, що створює значні труднощі для підтримання балансу потужності в ЛЕС та забезпечення надійного електропостачання [4]. Для вирішення цієї проблеми необхідні сучасні технологічні рішення, здатні компенсувати цю нестабільність. Системи накопичення енергії (СЗЕ) дозволяють зберігати надлишкову енергію та віддавати її в моменти дефіциту. Концепція самовідновлення підвищує життєздатність ЛЕС, дозволяючи їм автоматично відновлювати роботу після збоїв. А віртуальні електростанції (ВЕС) виступають як інтелектуальна платформа для об'єднання та координації різноманітних розподілених ресурсів, включаючи ВДЕ, СЗЕ та кероване навантаження.

Для ефективного та економічно доцільного впровадження цих технологій необхідно мати інструменти для обґрунтованого вибору оптимальної структури засобів балансування та резервування. Саме тому розробка науково-методичних підходів до оптимізації ЛЕС з ВДЕ є надзвичайно актуальною задачею, що має ключове значення для побудови майбутньої, більш стійкої та безпечної, енергетики України [2].

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування науково-методичних підходів до вибору оптимальної структури засобів балансування та резервування для підвищення надійності та економічної ефективності локальних енергетичних систем з високою часткою ВДЕ.

Для досягнення цієї мети робота охоплює низку ключових напрямків: від аналізу поточного стану та потенціалу різних видів ВДЕ в Україні до глибокого вивчення технологій, що забезпечують їхню інтеграцію – систем накопичення енергії, механізмів самовідновлення та віртуальних електростанцій. Центральним елементом роботи є застосування критеріального методу, що дозволяє здійснити порівняльний аналіз та визначити найбільш доцільні комбінації засобів резервування для конкретних умов ЛЕС.

Об'єктом даного дослідження є локальні енергетичні системи, що характеризуються високою часткою відновлюваних джерел енергії, а предметом – процеси та методи оптимізації їхнього функціонування. Для вирішення поставлених задач було застосовано комплексний методологічний апарат. Наукова новизна роботи полягає у адаптації критеріального методу для комплексної оцінки та вибору оптимального складу різноманітних засобів резервування для ЛЕС в умовах України.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні та експлуатації ЛЕС для підвищення їхньої надійності та стійкості, що є критично важливим для енергетичної безпеки України. Крім того, враховуючи специфіку роботи з електроустановками, зокрема ВДЕ, важливим аспектом є забезпечення належних умов охорони праці та пожежної безпеки під час експлуатації, що також детально розглядається у даній роботі з метою мінімізації виробничих ризиків та створення безпечного робочого середовища.

1. ВИДИ ВДЕ ТА ЇХ СТАН СЬОГОДНІ В УКРАЇНІ

Збільшення потреб у чистій та екологічній енергії сприяє швидкому розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Україна, як частина світової енергетичної спільноти, активно просувається у напрямку розширення використання ВДЕ. Запровадження екологічно чистих технологій в енергетичну систему держави є одним із першочергових завдань, що обумовлено не лише глобальними екологічними трендами, але й внутрішньою потребою у зміцненні енергетичної незалежності [1,2]. Відновлювані джерела енергії допомагають зменшити залежність від викопного палива, знижують рівень забруднення довкілля та забезпечують більш стабільне та стійке енергопостачання в довгостроковій перспективі.

Основні види відновлювальних джерел енергії включають сонячну енергію, яка отримується від сонячного випромінювання; вітрову енергію, що використовує кінетичну енергію вітру; гідроенергію, яка виробляється за рахунок руху води; геотермальну енергію, що використовує внутрішнє тепло Землі; та біоенергію, отриману з органічної речовини, відомої як біомаса [1] (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Відновлювальні джерела енергії

Вид енергії	Джерело	Переваги	Недоліки
Сонячна	Сонячне випромінювання	Невичерпність, екологічність, низькі експлуатаційні витрати	Залежність від погоди, високі початкові витрати, потреба у великих площах
Вітрова	Кінетична енергія вітру	Екологічність, невичерпність, можливість використання у важкодоступних місцях	Залежність від вітру, візуальний вплив, шумове забруднення
Гідроенергія	Рух води	Чистота, низька собівартість, регулювання потужності	Вплив на екосистеми, затоплення земель, переселення людей

Продовження табл. 1.1 - Відновлювальні джерела енергії

Вид енергії	Джерело	Переваги	Недоліки
Геотермальна	Внутрішнє тепло Землі	Стабільність, незалежність від погоди, можливість комплексного використання	Географічна обмеженість, високі початкові витрати, ризик забруднення вод
Біоенергія	Органічна речовина (біомаса)	Відновлюваність, утилізація відходів, створення робочих місць	Нижча теплотворна здатність, викиди при спалюванні, конкуренція за землю

Крім цих основних видів, існують також інші відновлювальні джерела, такі як енергія хвиль, що генерується рухом океанських хвиль; енергія припливів, яка використовує природні підйоми та спади рівня моря; аеротермальна енергія, що використовує тепло, наявне в навколишньому повітрі; та гідротермальна енергія, яка використовує тепло, накопичене у воді. Різноманітність цих джерел свідчить про потенціал для створення диверсифікованого енергетичного балансу, що може підвищити енергетичну незалежність та стійкість енергетичних систем.

В останні роки спостерігається значне зростання інвестицій у сектор ВДЕ в Україні, що свідчить про зростаючий інтерес як з боку внутрішніх, так і міжнародних інвесторів. Важливим стимулюючим фактором є державна політика підтримки, включаючи механізм "зеленого" тарифу, різноманітні програми грантової підтримки та активна участь у міжнародних партнерствах у сфері чистої енергетики. Ці інструменти сприяють зниженню фінансового навантаження на перших етапах реалізації проєктів ВДЕ та підвищують їхню економічну привабливість.

Проте розвиток відновлюваної енергетики в Україні стикається з низкою викликів. Серед них – періодична нестабільність законодавства, що створює ризики для інвесторів, недостатня розвиненість необхідної інфраструктури, зокрема мереж передачі та накопичення енергії, а також все ще відносно висока вартість початкових інвестицій у деякі технології ВДЕ. Крім того,

повномасштабна військова агресія Росії внесла значні корективи у розвиток галузі, призвівши до втрати потужностей та ускладнення реалізації нових проєктів [4].

Незважаючи на ці труднощі, з огляду на сприятливі кліматичні умови та значні природні ресурси, Україна має великий потенціал для розвитку різних видів ВДЕ, включаючи сонячну енергію, вітрову енергію, гідроенергію, біоенергію та інші (рис. 1.1). Ефективне використання цього потенціалу може стати ключем до енергетичної безпеки та сталого розвитку країни [2].

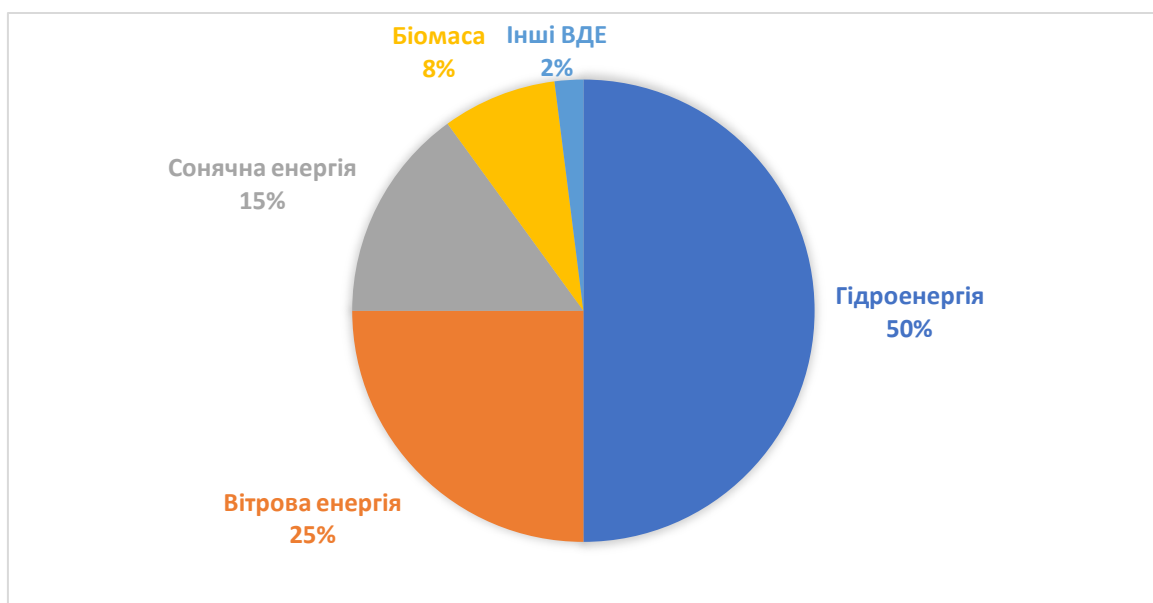


Рис. 1.1 – Частка різних видів ВДЕ у світовому енергоспоживанні

Глобальний тренд на декарбонізацію економіки та скорочення викидів парникових газів, закріплений міжнародними угодами, робить розвиток ВДЕ не лише економічною необхідністю, але й важливим міжнародним зобов'язанням України. Важливу роль у цьому відіграють міжнародні організації та фінансові інституції, які надають технічну та фінансову підтримку Україні у її прагненні до переходу на чисту енергетику. Крім того, розвиток сектору ВДЕ сприяє створенню нових висококваліфікованих робочих місць у суміжних галузях, стимулюючи інновації та сприяючи економічному зростанню країни в цілому.

1.1 Сонячна енергетика

Сонячна енергетика є одним із найбільш динамічно зростаючих та перспективних видів відновлюваних джерел енергії, що використовує енергію електромагнітного випромінювання Сонця [1].

Перетворення сонячної енергії в корисну відбувається переважно двома основними способами: за допомогою фотоелектричних (ФЕ) систем та геліотермальних систем.

Фотоелектричні системи працюють за принципом фотоелектричного ефекту, який полягає у перетворенні енергії фотонів сонячного світла безпосередньо в електричну енергію за допомогою фотоелектричних панелей [3]. Сонячні панелі складаються з фотоелектричних елементів, виготовлених з напівпровідникових матеріалів, найчастіше з кремнію. Коли сонячне світло потрапляє на ці елементи, фотони передають свою енергію електронам, звільняючи їх та створюючи електричний струм. Цей струм є постійним, тому для використання в побутових мережах та передачі в загальну енергосистему він перетворюється на змінний струм за допомогою інверторів (рис. 1.1).

Сонячні колектори використовують сонячне випромінювання для безпосереднього нагріву рідини, зазвичай води або теплоносія. Сонячні колектори поглинають сонячну радіацію та передають тепло рідині, яка циркулює через них. Існують різні типи сонячних колекторів, включаючи плоскі та вакуумні трубчасті колектори. Нагріта рідина може використовуватися для різних цілей, таких як забезпечення гарячого водопостачання, опалення приміщень, підігрів води в басейнах, а також для промислових технологічних процесів (рис. 1.2).

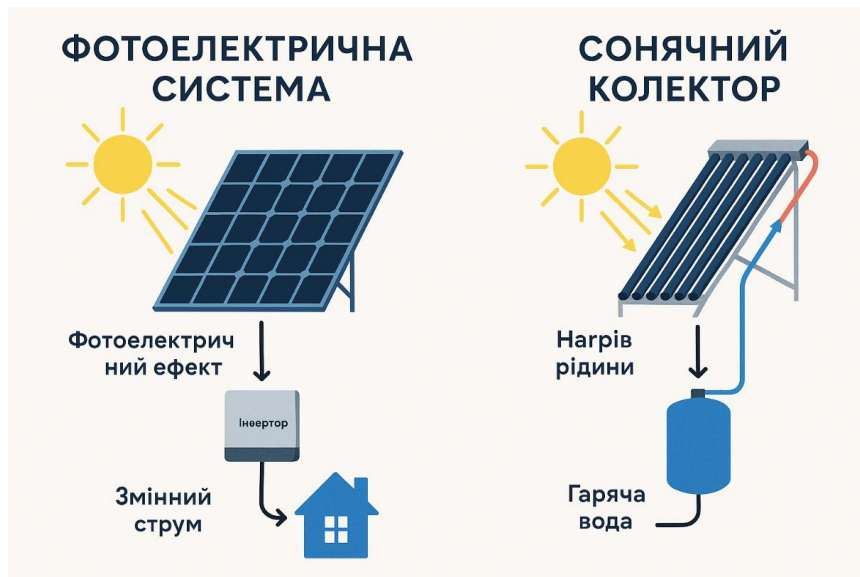


Рис. 1.2 - Принцип роботи фотоелектричних систем

Геліотермальні електростанції, також відомі як електростанції, що використовують концентровану сонячну енергію (CSP), застосовують дзеркала для фокусування сонячного світла на приймачі. Концентроване сонячне світло нагріває теплоносії, який потім використовується для виробництва пари. Пара, у свою чергу, приводить в дію звичайну парову турбіну, з'єднану з генератором, що виробляє електроенергію (рис. 1.2). Існують різні типи систем CSP, такі як параболічні жолоби, сонячні вежі та системи зі стерлінговими двигунами на основі параболічних дзеркал. Однією з переваг CSP є можливість інтеграції систем акумулювання теплової енергії, що дозволяє виробляти електроенергію навіть після заходу сонця [3].

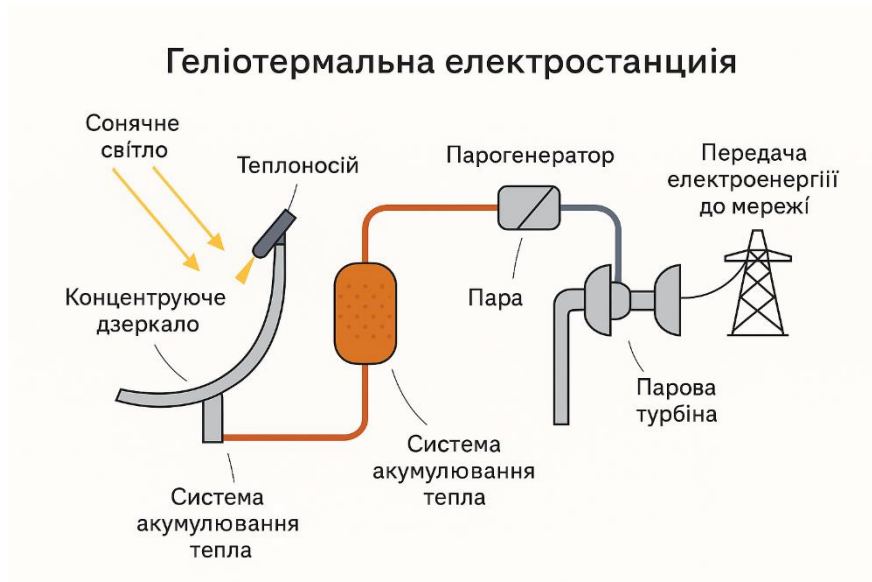


Рис. 1.2 - Принцип роботи геліотермальних систем

Сонячна енергетика демонструє значне зростання у світі. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), до 2025 року на сонячну енергію припадатиме 60% приросту потужностей у секторі відновлювальної енергетики. Лідерами за темпами зростання встановлених потужностей є Китай, Бельгія, Нідерланди, Австрія, Австралія та Сполучені Штати.⁴ У 2021 році було зафіксовано рекордно низькі тарифи на сонячну енергію, зокрема 1,04 цента США за кіловат-годину в Саудівській Аравії. Порівняно з періодом 2013-2023 років, у 2023 році виробництво сонячної енергії зросло в 10 разів, а її частка у загальному виробництві електроенергії з відновлювальних джерел досягла 40%. Глобальні інвестиції в сонячну енергетику у 2023 році зросли на 8,1% і склали 622,5 млрд доларів США, а встановлена потужність сонячних електростанцій у світі збільшилася на 18,5% порівняно з 2022 роком [2]. Середньорічні темпи зростання встановленої потужності сонячних електростанцій у світі протягом останнього десятиліття становили в середньому 32%. Близько 70% світових потужностей з виробництва сонячної енергії зосереджено в п'яти країнах: Китаї, США, Японії, Німеччині та Індії (рис. 1.3).

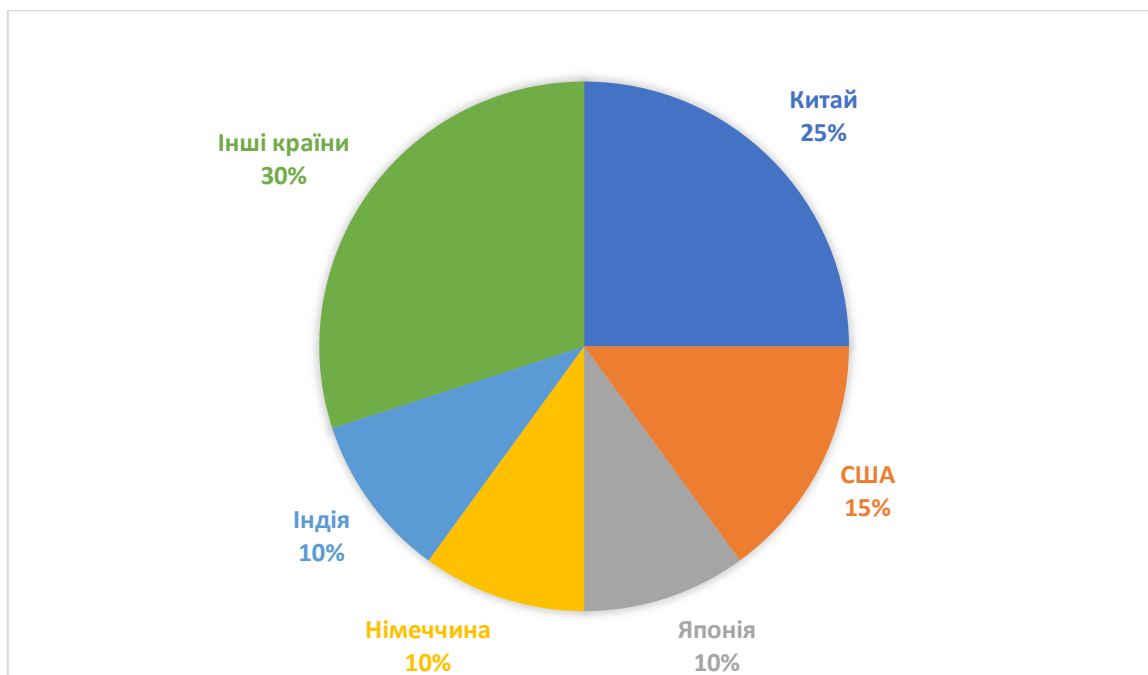


Рис. 1.3 - Світовий розподіл потужностей СЕС (2024)

В Україні також спостерігається активний розвиток сонячної енергетики, завдяки чому загальна потужність галузі сягнула 6320 МВт без урахування тимчасово окупованих територій. За підсумками 2021 року частка сонячної енергії в загальній структурі виробництва електроенергії становила близько 6%. На початок 2022 року на вільній території України було розташовано близько 5900 МВт промислових сонячних електростанцій та понад 1200 МВт домашніх малих сонячних електростанцій, а кількість домогосподарств, які встановили сонячні панелі (просьюмерів), у 2023 році зросла до понад 54 тисяч. У 2024 році загальна встановлена потужність сонячних електростанцій в Україні перевищила 7 ГВт, а частка сонячної генерації в загальному енергобалансі становить близько 6%. Спостерігається тенденція до збільшення кількості малих та середніх сонячних електростанцій, особливо серед домогосподарств [2].

Станом на 2025 рік сонячна енергетика України демонструє позитивну динаміку розвитку, попри складні умови, спричинені воєнними діями та частковою втратою інфраструктури. Загальна встановлена потужність сонячних електростанцій (СЕС) на кінець 2024 року досягла 8,06 ГВт. Це підтверджує

провідну роль сонячної енергії в українському секторі відновлюваних джерел енергії — на неї припадає близько 75% усіх об'єктів ВДЕ.

Відбувається поступовий зсув фокусу від великих промислових СЕС до децентралізованої генерації. Західні та центральні регіони країни, зокрема Івано-Франківська, Дніпропетровська, Вінницька, Хмельницька та Київська області, стали осередками нового будівництва та модернізації СЕС. Особливо активно розвивається сегмент домашніх електростанцій — кількість просьюмерів, тобто споживачів, які виробляють власну електроенергію, щороку зростає на 25–30%. Очікується, що до кінця 2025 року таких господарств буде понад 100 тисяч [4]. Крім того, набувають популярності енергетичні кооперативи та концепція віртуальних електростанцій, що об'єднують малі об'єкти генерації у спільну мережу.

Ринок активно впроваджує технологічні інновації: з'являються двосторонні сонячні панелі, що збільшують генерацію, системи трекінгу для стеження за рухом сонця, smart-інвертори з функціями оптимізації та захисту, а також акумуляторні системи зберігання енергії. Це дозволяє зробити СЕС більш ефективними, автономними та стійкими до зовнішніх впливів [2].

Використання сонячної енергії має низку значних переваг. Сонячне світло є доступним та практично невичерпним ресурсом. Під час експлуатації сонячні електростанції не виробляють шкідливих викидів, що робить їх екологічно чистим джерелом енергії. Сонячна енергія допомагає знизити залежність від традиційних джерел енергії та потребує відносно дешевого обслуговування [1-3]. Можливо встановлювати автономні системи електропостачання на основі сонячної енергії, що особливо актуально для віддалених районів. У довгостроковій перспективі використання сонячної енергії призводить до зниження витрат на електроенергію.

Однак існують і певні недоліки використання сонячної енергії. Початкові витрати на придбання та встановлення сонячного обладнання можуть бути досить високими. Ефективність сонячних електростанцій залежить від погодних

умов та часу доби, що призводить до мінливості виробництва електроенергії. Для розміщення великих сонячних електростанцій потрібні значні площі землі. Сонячні панелі мають обмежений термін служби і потребують періодичної заміни. Зберігання виробленої сонячної енергії у великих обсягах є технологічним та економічним викликом [1].

Таблиця 1.2 - Переваги та недоліки використання сонячної енергії

Переваги	Недоліки
Сонячне світло — доступне й невичерпне джерело	Висока вартість придбання та встановлення обладнання
Відсутність шкідливих викидів при експлуатації	Залежність від погодних умов і часу доби
Екологічна чистота технології	Потрібні великі площі землі для великих СЕС
Зменшення залежності від традиційної енергетики	Обмежений термін служби панелей, потреба в заміні
Відносно низькі витрати на обслуговування	Складність і вартість зберігання енергії у великих обсягах
Можливість автономного встановлення в будь-яких місцях	Мінливість генерації електроенергії
Довгострокове зниження витрат на електроенергію	

Перспективи розвитку сонячної енергетики є дуже оптимістичними, і постійно з'являються нові технології. Ефективність сонячних панелей постійно зростає завдяки таким технологіям, як PERC, N-type, BNC, Top-con та HJT. Вартість сонячних панелей продовжує знижуватися завдяки зростанню обсягів виробництва та технологічному прогресу, що описується так званим законом Свонсона. Активно розвиваються технології зберігання сонячної енергії, включаючи акумуляторні, механічні та термальні накопичувачі. З'являються інноваційні рішення, такі як інтеграція сонячних панелей у будівельні матеріали

(BIPV) та інші дизайнерські підходи. Прогнозується подальше зростання попиту на сонячні панелі та збільшення інвестицій у галузь. В Україні особлива увага приділяється децентралізації енергопостачання та розвитку просьюмерської енергетики.

Сонячна енергетика вирізняється невичерпністю ресурсу, відсутністю викидів забруднюючих речовин під час експлуатації та можливістю децентралізованого виробництва енергії, що робить її ключовим елементом у переході до сталої енергетичної системи та боротьбі зі зміною клімату [3].

Однак, попри успіхи, сонячна енергетика в Україні залишається вразливою до зовнішніх чинників. Зокрема, війна спричинила втрату або пошкодження близько 3,9 ГВт потужностей, розташованих на окупованих чи зруйнованих територіях. Водночас галузь швидко адаптується, зосереджуючи зусилля на децентралізованому виробництві, інтеграції з європейським енергоринком та розвитку сучасної інфраструктури [5].

1.2 Вітрова енергетика

Вітрова енергетика працює за принципом перетворення кінетичної енергії вітру спочатку в механічну енергію обертання лопатей вітротурбіни, а потім в електричну енергію за допомогою генератора [1]. Вітер, що протікає над аеродинамічно спроектованими лопатями, створює підйомну силу, змушуючи ротор обертатися. Ротор з'єднаний з гондолою, в якій розміщені редуктор, генератор та інші допоміжні компоненти. Редуктор збільшує швидкість обертання валу ротора до швидкості, необхідної для ефективної роботи генератора. Генератор, обертаючись, перетворює механічну енергію в електричну. Ефективність вітротурбіни значною мірою залежить від швидкості вітру, причому потужність вітрового потоку пропорційна кубу швидкості вітру.

Основними компонентами ВЕС є вітрова турбіна, яка включає лопаті, ротор, гондолу та генератор; вежа, що підтримує турбіну на певній висоті, де вітер зазвичай сильніший та стабільніший; та система управління, яка контролює

роботу турбіни для досягнення оптимальної продуктивності та безпеки (рис. 1.4). Сучасні вітротурбіни часто оснащуються системами автоматичного повороту гондоли за напрямком вітру та регулювання кута нахилу лопатей для оптимізації використання енергії вітру [6].

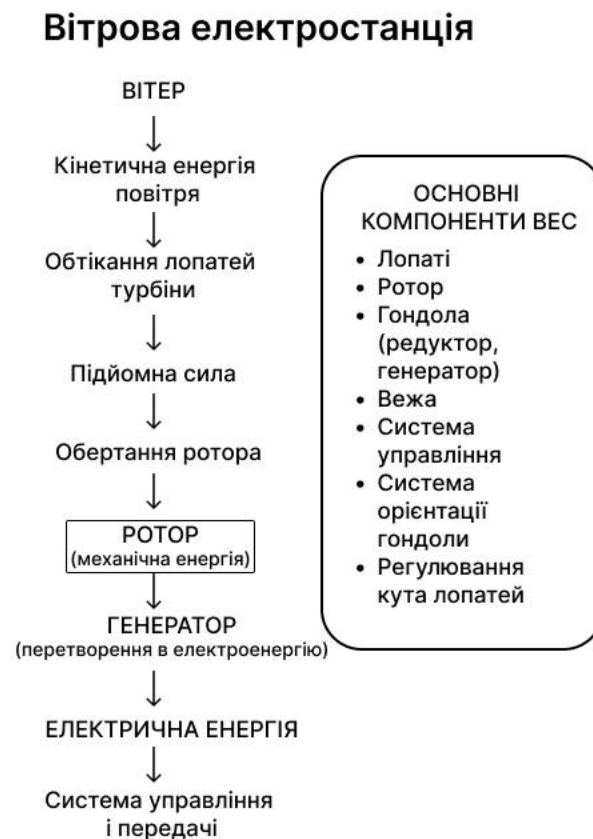


Рис. 1.4 – Принцип роботи ВЕС

Вітроенергетика є значущим сектором відновлюваної енергетики у світі. На кінець 2018 року загальна встановлена потужність вітротурбін у світі досягла 591,5 ГВт.³ У 2024 році глобальний ринок вітрової енергетики поповнився на 117 ГВт нових потужностей, і прогнозується введення 138 ГВт у 2025 році (новий рекорд) та 982 ГВт до 2030 року. Лідером у використанні вітрової енергії є Китай, за яким слідують Сполучені Штати та Японія.

В Україні вітроенергетичний сектор також розвивається. На початок 2022 року загальна встановлена потужність становила 1529 МВт, з очікуванням

зростання до 1750 МВт до кінця року. За два роки війни було введено близько 230 МВт вітрогенерації (станом на кінець листопада 2023 року). У 2023 році загальна встановлена потужність вітроенергетики в Україні становила 1672,8 МВт з планом до 1900,8 МВт [2].

На початку 2024 року загальна встановлена потужність вітрових електростанцій (ВЕС) в Україні становила близько 1900,8 МВт. Водночас значна частина цих потужностей розташована на тимчасово окупованих територіях, що обмежує їхню ефективну експлуатацію. Незважаючи на ці обставини, вітроенергетичний сектор зберігає привабливість для інвесторів, що засвідчують приклади активності приватних компаній: зокрема, «Вітропарки України» продовжили реалізацію нових проєктів, Elementum Energy придбала проєкт ВЕС на 200 МВт, а компанія ДТЕК оголосила про старт масштабного проєкту Полтавської ВЕС потужністю 650 МВт [4].

Станом на 2025 рік вітрова енергетика України перебуває у фазі відновлення та стратегічного переосмислення, зважаючи на виклики, спричинені війною, та нагальну потребу у зміцненні енергетичної безпеки держави. Хоча темпи встановлення нових потужностей у 2024 році були нижчими, ніж у попередні роки, галузь демонструє ознаки стабілізації, а також готовність до подальшого розвитку [2].

Використання вітрової енергії має низку переваг. Це екологічно чисте джерело енергії, яке не супроводжується шкідливими викидами в атмосферу.¹³ Вітровий ресурс є невичерпним. Вітрові електростанції можуть розміщуватися у важкодоступних місцях та використовувати відносно невеликі площі землі. У довгостроковій перспективі виробництво електроенергії за допомогою вітру є безкоштовним, оскільки немає витрат на паливо. Вітрові установки можуть забезпечувати автономне електропостачання, не залежне від зовнішніх мереж. Вони мають модульний дизайн та відносно швидкий монтаж [6]. Вітроенергетика не заважає веденню сільського господарства та промислової діяльності поблизу вітростанцій.

Серед недоліків вітрової енергії слід відзначити її залежність від погодних умов та мінливість вітру. Початкова вартість вітроенергетичних проєктів може бути високою. Вітрові турбіни можуть мати візуальний вплив на ландшафт та створювати шумове забруднення. Існує також ризик зіткнень птахів та кажанів з лопатями турбін. Для встановлення великих ВЕС потрібні значні відкриті площі. У деяких випадках вітрові турбіни можуть створювати перешкоди для теле- та радіотрансляцій [6].

Таблиця 1.3 - Переваги та недоліки використання вітрової енергії

Переваги	Недоліки
Екологічно чисте джерело енергії — без шкідливих викидів	Залежність від погодних умов і нестабільність вітру
Модульний дизайн і швидкий монтаж	Можливі перешкоди для теле- та радіосигналів
Не заважає сільському господарству чи промисловості поблизу	Висока початкова вартість проєктів
Невичерпний ресурс	Візуальний вплив на ландшафт
Можливість розміщення у важкодоступних районах	Створення шумового забруднення
Не потребує великих площ землі	Ризик для птахів і кажанів (зіткнення з лопатями)
Безкоштовне виробництво електроенергії у довгостроковій перспективі	Потреба у значних відкритих площах для великих станцій
Може працювати автономно, без підключення до електромережі	

Перспективи розвитку вітроенергетики є багатообіцяючими. Прогнозується значне зростання встановлених потужностей як у світі, так і в Україні. Розробляються нові технології вітрових турбін, такі як плавучі морські вітрові електростанції, повітряні змії для використання енергії вітру на великих висотах та турбіни, що наслідують рухи крил колібрі. Удосконалюються системи

стеження за птахами та технології зменшення шуму. Вітрова енергія все частіше інтегрується з іншими відновлювальними джерелами та системами накопичення енергії. Активно розвивається морська вітроенергетика (офшорні ВЕС), яка дозволяє використовувати сильніші та стабільніші вітри. Існують перспективи розвитку вітроенергетики в Карпатському регіоні України, який має значний вітровий потенціал [4].

Україна володіє величезним вітровим потенціалом — експерти оцінюють, що використання лише 0,4% цього потенціалу здатне повністю задовольнити національні потреби в електроенергії. Згідно з Національним планом дій з відновлюваної енергетики до 2030 року, Україна планує досягти 6,1 ГВт встановлених потужностей наземної вітроенергетики [2].

Водночас, розвиток галузі стикається з низкою серйозних викликів. До них належать заборгованість на ринку електроенергії, періодичне невиконання урядом зобов'язань перед виробниками «зеленої» енергії, а також недосконалість чинних механізмів стимулювання, зокрема ринкової премії.

1.3 Гідроенергетика

Гідроенергетика — це галузь енергетики, що використовує енергію рухомої води для виробництва переважно електричної енергії, використовують кінетичну енергію падаючої або течійної води для виробництва електроенергії. Для створення необхідного напору води часто будують греблі, які утворюють водосховища. Вода з водосховища направляється через водоводи на лопаті гідротурбін, змушуючи їх обертатися. Турбіни, у свою чергу, приводять в дію генератори, які виробляють електроенергію. Кількість виробленої електроенергії залежить від напору води (різниці висот) та її об'єму (рис. 1.5). Залежно від напору та об'єму води використовуються різні типи гідротурбін, такі як турбіни Френсіса, Каплана та Пелтона [1].

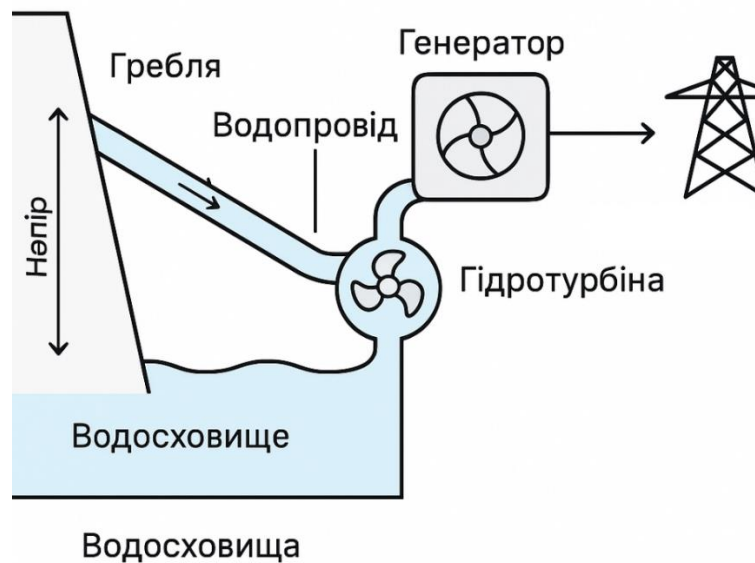


Рис. 1.5 – Принцип роботи ГЕС

Гідроакумуючі електростанції (ГАЕС) використовують електроенергію з інших джерел для закачування води з нижнього басейну у верхній у періоди низького споживання електроенергії. Під час пікових навантажень цю воду випускають назад через турбіни, виробляючи електроенергію. ГАЕС виконують функцію великих акумуляторів енергії, допомагаючи збалансувати енергосистему та інтегрувати непостійні відновлювальні джерела енергії [7].

ГЕС класифікуються за різними критеріями. Залежно від розташування будівлі ГЕС відносно греблі розрізняють руслові ГЕС, де будівля є частиною греблі, та пригреблеві ГЕС, де будівля розташована біля основи греблі. Існують також дериваційні ГЕС, де вода подається до турбін по каналах або трубах. За потужністю виділяють великі ГЕС та малі ГЕС, потужність яких зазвичай не перевищує 30 МВт. Окремо виділяють припливні електростанції, що використовують енергію припливів та відпливів, та хвильові електростанції, що використовують енергію морських хвиль [1].

Гідроенергетика є найбільшим джерелом відновлюваної енергії у світі. У 2021 році сумарна встановлена потужність гідроелектростанцій у світі становила 1195 ГВт. Лідером у виробництві гідроенергії є Китай (1145,5 млрд кВт·год), за

яким слідує Канада та Бразилія. Технічний потенціал малої гідроенергетики у світі оцінюється на рівні 150–200 ГВт.

В Україні загальний гідроенергетичний потенціал становить понад 44 млрд кВт·год, а економічно ефективний – близько 17,5 млрд кВт·год. Станом на початок 2022 року використовувалося понад 60% цього потенціалу, в основному за рахунок великих ГЕС. До складу ПрАТ «Укргідроенерго» входять 8 великих гідроелектростанцій та 2 ГАЕС із загальною встановленою потужністю 6173,5 МВт.⁸⁷ В Україні також експлуатуються 49 малих ГЕС, які виробляють понад 200 млн кВт·год електроенергії [2].

Станом на 2025 рік гідроенергетика України залишається стратегічно важливою галуззю в структурі національної енергосистеми. Попри руйнівні наслідки повномасштабної війни, зокрема пошкодження та знищення частини гідроенергетичних об'єктів (наприклад, Каховської ГЕС), галузь продовжує функціонувати та демонструє поступове відновлення. Загальна довоєнна потужність українських гідроелектростанцій становила близько 8% усієї енергосистеми, а річне виробництво – понад 10 млрд кВт·год. Проте через війну втрачено щонайменше 351 МВт потужностей, і сьогодні видача електроенергії становить приблизно 1,2 ГВт·год, що значно нижче потенційних можливостей [4,5].

У 2024 році було відновлено близько 4 ГВт потужностей теплової та гідроенергетики, у 2025 році планується ще 3 ГВт. Активну роль у цьому процесі відіграє державна компанія «Укргідроенерго», яка реалізує програми модернізації та добудови потужностей, зокрема Дністровської ГАЕС. У планах – розширення гідроенергетичного потенціалу завдяки будівництву нових об'єктів, таких як Верхньо-Дністровський каскад ГЕС, каскади на річках Тиса і Тересва, а також Канівська ГАЕС у Черкаській області вартістю до \$2 млрд [4,5].

Гідроенергія має ряд значних переваг. Вона виробляє електроенергію без використання викопного палива, що робить її чистим джерелом енергії. Після будівництва ГЕС собівартість виробництва електроенергії є низькою.

Гідроелектростанції мають довгий термін служби та високу надійність обладнання. Вони здатні швидко регулювати свою потужність, забезпечуючи маневреність енергосистеми. Гідроенергія може забезпечувати електроенергією віддалені та важкодоступні райони. Водосховища ГЕС можуть використовуватися для запобігання паводкам, регулюючи стік води, а також для зрошення, судноплавства та інших господарських потреб [7].

Проте використання гідроенергії пов'язане і з певними недоліками. Будівництво великих гребель та водосховищ може призводити до затоплення значних площ земель, включаючи сільськогосподарські угіддя та ліси. ГЕС можуть негативно впливати на екосистеми річок, зокрема на міграцію риб, а також змінювати природний ландшафт та порушувати біорізноманіття. Створення великих водосховищ може вимагати переселення значної кількості людей. Греблі затримують твердий стік та біогени, що може впливати на екологію нижче за течією. У прибережній смузі водосховищ можливі зміни клімату. Малі ГЕС можуть мати проблеми зі швидким зношенням обладнання та замуленням водосховищ [1].

Таблиця 1.4 – Переваги та недоліки гідроенергетики

Переваги	Недоліки
Не використовує викопне паливо — екологічно чисте джерело енергії	Може призводити до затоплення великих площ земель (угіддя, ліси)
Низька собівартість електроенергії після будівництва	Негативний вплив на екосистеми річок, зокрема на міграцію риб
Довгий термін служби та висока надійність обладнання	Може змінювати природний ландшафт і порушувати біорізноманіття
Швидке регулювання потужності — маневреність енергосистеми	Необхідність переселення людей у разі створення великих водосховищ
Забезпечення електроенергією віддалених та важкодоступних регіонів	Греблі затримують твердий стік і біогени — вплив на екологію нижче за течією

Продовження табл. 4 – Переваги та недоліки гідроенергетики

Переваги	Недоліки
Можливість використання водосховищ для зрошення, судноплавства, захисту від паводків тощо	Можливі зміни мікроклімату в прибережних зонах
	Малі ГЕС можуть мати проблеми із замуленням і швидким зношенням обладнання

Перспективи розвитку гідроенергетики включають модернізацію існуючих ГЕС для збільшення їхньої ефективності та виробництва електроенергії. Планується будівництво нових ГАЕС для забезпечення маневрових потужностей та інтеграції з енергосистемою, наприклад, добудова Дністровської ГАЕС та будівництво Канівської ГАЕС. Існують плани розвитку малої гідроенергетики на річках Тиса, Дністер та інших малих водотоках. Розробляються технології безгреблевих гідроелектростанцій. Існують перспективи використання гідроенергії градієнта солоності (осмотичні технології) [4].

1.4 Біоенергетика

Біоенергетика - це галузь енергетики, що використовує біомасу як паливо. Біомаса визначається як біологічно відновлювана речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу. До біомаси належать рослинна та тваринна біомаса, а також органічна частина відходів сільського господарства (рослинництва і тваринництва), лісового господарства та суміжних галузей промисловості, а також органічна фракція промислових та побутових відходів [1].

Існують різні види біомаси, включаючи тверду біомасу, таку як деревина, тріска, солома, енергетичні культури, відходи сільського та лісового господарства, а також тверді побутові відходи. Рідка біомаса (біопаливо) включає біодизель, біоетанол, біобутанол та біонафту. Газоподібна біомаса

включає біогаз та біометан, які утворюються внаслідок анаеробного зброджування біомаси.

Таблиця 1.5 – Види біомаси

Тип біомаси	Приклади
Тверда біомаса	Деревина, тріска, солома, енергетичні культури, відходи сільського та лісового господарства, тверді побутові відходи
Рідка біомаса (біопаливо)	Біоетанол, біодизель, біобутанол, біонафта
Газоподібна біомаса	Біогаз, біометан (утворюються внаслідок анаеробного зброджування)

Існують різні технології перетворення біомаси в енергію (рис. 1.6). Спалювання використовується для прямого спалювання біомаси з метою виробництва тепла або електроенергії. Газифікація - це процес перетворення біомаси в синтез-газ шляхом часткового окислення. Піроліз передбачає термічне розкладання біомаси без доступу кисню для отримання біонафти, біочару та синтез-газу. Анаеробне зброджування - це розщеплення органічної речовини мікроорганізмами в безкисневому середовищі для виробництва біогазу [1]. Ферментація використовується для перетворення цукрів та крохмалів на біоетанол за допомогою мікроорганізмів.

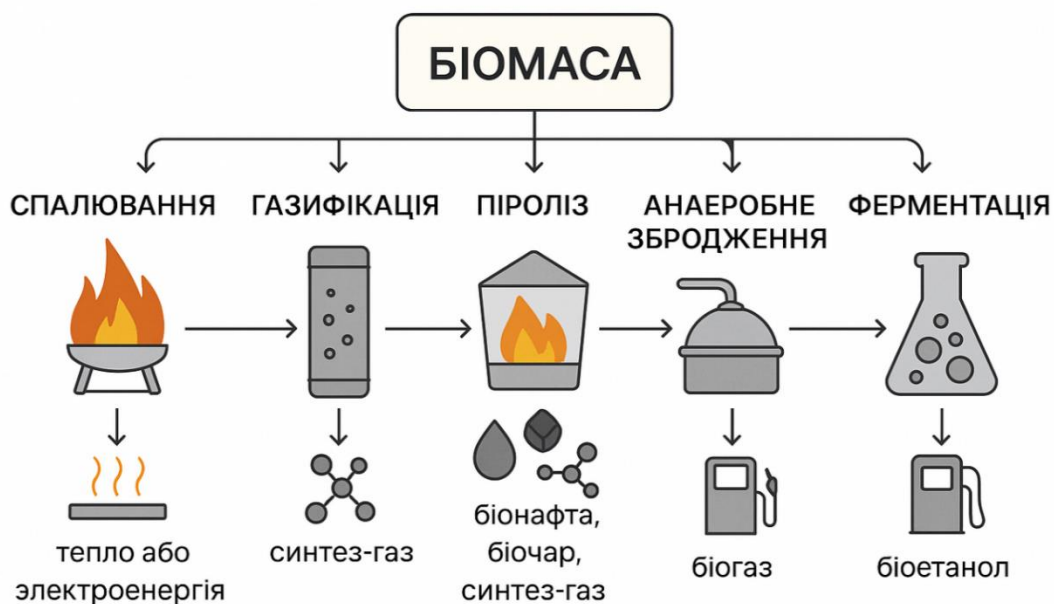


Рис. 1.6 – Технології перетворення біомаси

У світі біоенергетика відіграє значну роль. Протягом останніх 20 років постачання первинної енергії з біомаси та біопалив збільшилося на третину і становить близько 10% загального первинного енергопостачання. У країнах-лідерах ЄС частка біоенергетики у валовому кінцевому енергоспоживанні перевищує 8%. У 2022 році найвищі частки відновлюваної енергії у загальному енергопостачанні на душу населення досягнуті в ряді країн, переважно завдяки біоенергетиці.

В Україні у 2019 році біоенергетика становила найбільшу частку (79,3%) у структурі виробництва енергії з відновлювальних джерел. Частка біомаси у валовому кінцевому енергоспоживанні України становить 1,78%. Щорічно в Україні для виробництва енергії використовується близько 2 млн тонн умовного палива біомаси різних видів. У 2020 році загальна частка енергії з ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні України складала 9,2%, а електроенергії з ВДЕ – 13,9%. Заміщення природного газу біомасою в Україні у 2020 році становило 5,2 млрд кубометрів [2].

Станом на 2025 рік біоенергетика в Україні демонструє стійке зростання та закріплюється як один із ключових напрямів у забезпеченні енергетичної

безпеки, зниженні залежності від імпортного викопного палива та реалізації політики декарбонізації. Сектор активно використовує потужний аграрний потенціал держави, розвиває інноваційні технології та поступово інтегрується у загальнонаціональну енергетичну систему.

На сьогодні загальна теплова потужність біоенергетичних установок в Україні перевищує 3650 МВт, що дозволяє щорічно заміщувати приблизно 3 млрд м³ природного газу. Це має особливу цінність в умовах зростаючих цін на енергоносії та геополітичних викликів [4]. У 2025 році прогнозується виробництво біопалива в обсязі понад 6,2 млн тонн умовного палива, що охоплює тверді, рідкі та газоподібні види пального. Кількість біогазових установок зростає, і очікується, що їх буде не менше 525 одиниць із загальною потужністю понад 350 МВт.

Особливо перспективним напрямом є розвиток біометану – очищеного біогазу, придатного для подачі в газорозподільну мережу. Теоретичний потенціал виробництва біометану в Україні оцінюється у понад 20 млрд м³ на рік, що здатне повністю покрити внутрішні потреби в імпортному газі. Активно розвивається й сектор агробіомаси – соломи, лушпиння соняшника, стебел кукурудзи, які широко застосовуються у виробництві теплової енергії та пелет.

У транспортному секторі все більшу роль відіграють рідкі біопалива – біоетанол і біодизель [1]. Для їх виробництва задіюються наявні потужності спиртових, пивоварних і крохмальних заводів. Це не тільки дозволяє скоротити споживання нафтопродуктів, але й активізує внутрішню переробну промисловість.

Використання біоенергії має ряд переваг. Вона використовує місцеві та відновлювані ресурси, знижує залежність від імпортованих енергоносіїв, підвищуючи енергетичну безпеку. Біоенергетика дозволяє утилізувати відходи сільського та лісового господарства, а також тверді побутові відходи. При сталому управлінні ресурсами біоенергія є вуглецево-нейтральним циклом, що сприяє зниженню викидів парникових газів. Розвиток біоенергетики створює

нові робочі місця, особливо в сільській місцевості. Біомаса може використовуватися для виробництва різних видів палива (тверде, рідке, газоподібне) та енергії (тепло, електроенергія).

Серед недоліків біоенергії слід відзначити її нижчу теплотворну здатність порівняно з викопним паливом. При спалюванні біомаси утворюється значна кількість золи, що потребує видалення та утилізації. Існує потенційна конкуренція за землю між вирощуванням енергетичних та харчових культур. При нестійкому управлінні лісовими ресурсами можлива вирубка лісів. Залежно від технології та виду біомаси можливі викиди забруднюючих речовин. Існують проблеми з логістикою та зберіганням біомаси [1].

Таблиця 1.6 - Переваги та недоліки використання біоенергії

Переваги	Недоліки
Використання місцевих і відновлюваних ресурсів	Нижча теплотворна здатність порівняно з викопним паливом
Зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв — підвищення енергетичної безпеки	Утворення великої кількості золи при спалюванні
Утилізація відходів сільського, лісового господарства та побутових відходів	Конкуренція за землю між енергетичними та харчовими культурами
При сталому управлінні — вуглецево-нейтральна технологія	Ризик вирубки лісів при нестійкому управлінні
Сприяє зниженню викидів парникових газів	Можливі викиди забруднюючих речовин залежно від технології та виду біомаси
Створення робочих місць, особливо в сільській місцевості	Проблеми з логістикою та зберіганням біомаси
Гнучкість — можливість отримання тепла, електроенергії, різних видів палива	

Перспективи розвитку біоенергетики включають очікуване значне зростання глобального потенціалу до 2050 року. Існує можливість збільшення виробництва рідких біопалив для транспортного сектору. Україна має значний потенціал для виробництва біометану, який може замінити природний газ. Біомаса може використовуватися для виробництва тепла та електроенергії, особливо в децентралізованих системах [2]. Важливим є розвиток ринку біопалива та вдосконалення нормативно-правової бази в Україні, а також стимулювання вирощування енергокультур для забезпечення сталого постачання біомаси.

1.5 Геотермальна енергія

Геотермальна енергія - це тепло, що виходить з надр Землі. Це тепло утворюється внаслідок радіоактивного розпаду елементів у ядрі Землі та залишкового тепла від її формування. Геотермальні ресурси включають магму, гарячі гірські породи, а також гарячу воду та пару, що знаходяться під землею (рис. 6). Доступ до цього тепла здійснюється через буріння свердловин у геотермальні резервуари [1]. Температура геотермальних ресурсів може варіюватися залежно від глибини та геологічного розташування. Геотермальна енергія є стабільним та постійним джерелом відновлюваної енергії, незалежним від погодних умов або часу доби.

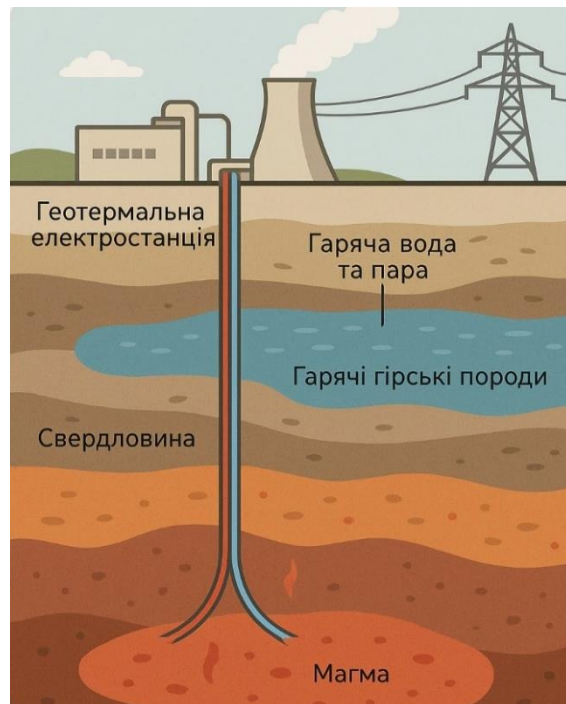


Рис. 1.7 – Геотермальна енергія

Існують різні технології використання геотермальної енергії. Геотермальні електростанції використовують пару або гарячу воду з підземних резервуарів для виробництва електроенергії за допомогою паротурбінних установок.

Існують різні типи геотермальних електростанцій, включаючи електростанції на сухій парі, на парі з проміжним нагрівом (flash steam) та бінарні електростанції (табл. 1.7). Бінарні електростанції дозволяють виробляти електроенергію з геотермальних ресурсів з нижчою температурою, використовуючи вторинний теплоносій з низькою точкою кипіння. Геотермальні теплові насоси використовують стабільну температуру ґрунту для ефективного опалення та охолодження будівель [1]. Ці системи циркулюють теплоносій через підземні контури, поглинаючи тепло з землі взимку та віддаючи тепло в землю влітку. Геотермальна енергія також може використовуватися безпосередньо для опалення будівель, гарячого водопостачання та в промислових процесах.

Таблиця 1.7 - Типи геотермальних електростанцій

Тип установки	Принцип роботи	Особливості
Суха пара	Використовує природну пару з геотермального резервуару для обертання турбіни	Найпростіший тип; потребує високотемпературних парових джерел
Пар із проміжним нагрівом	Гаряча вода під тиском швидко випаровується при зниженні тиску, утворюючи пару для турбіни	Найпоширеніший тип; працює з гарячою водою (вище 180°C)
Бінарна установка	Геотермальна рідина нагріває вторинний робочий агент з низькою точкою кипіння, який приводить турбіну	Ефективна при середніх і низьких температурах (100–180°C)

Сучасний стан розвитку геотермальної енергетики у світі показує, що сумарна потужність геотермальних електростанцій та теплових установок становить близько 85 ГВт (13 ГВт - електрика; 72 ГВт - тепло). Використання геотермальних теплових насосів зростає приблизно на 10% на рік у всьому світі. Геотермальні ресурси розвідані у 80 країнах, і в 58 з них вони активно використовуються.

В Україні існує певний потенціал для розвитку геотермальної енергетики, обумовлений термогеологічними особливостями та наявністю геотермальних ресурсів, представлених переважно термальними водами [2]. Економічно доцільний енергетичний ресурс термальних вод України оцінюється до 8,4 млн тонн умовного палива на рік. Річний технічно досяжний енергетичний потенціал геотермальної енергії в Україні еквівалентний 12 млн тонн умовного палива, що дозволить заощадити близько 10 млрд кубометрів природного газу.

Станом на 2025 рік геотермальна енергетика в Україні перебуває на початковому етапі розвитку, але демонструє зростаючий інтерес як з боку науковців, так і державних структур та інвесторів. Незважаючи на відсутність

великих комерційних геотермальних електростанцій, в країні активно ведуться наукові дослідження і реалізуються пілотні проєкти. Зокрема, Інститут відновлюваної енергетики НАН України розробляє інноваційні системи добування геотермальних ресурсів, включаючи їх комбіноване використання для виробництва електроенергії й тепла, а також розглядає можливість повторного використання старих газових і нафтових свердловин [4,5].

Найбільший геотермальний потенціал зосереджений у західних та південних областях України – Закарпатській, Львівській, Івано-Франківській, Чернівецькій, Одеській та Херсонській. У цих регіонах температура геотермальних вод становить від 40 до 100°C, що робить їх придатними передусім для теплопостачання, а в деяких випадках – для виробництва електроенергії. З технічної точки зору, використання геотермальної енергії може стати ефективним способом заміщення традиційних джерел енергії, особливо у віддалених громадах, де централізоване теплопостачання відсутнє.

Геотермальна енергія має ряд переваг. Це відновлюване та практично невичерпне джерело енергії. Вона є екологічно чистою, з низькими викидами парникових газів та мінімальним забрудненням атмосфери. Геотермальна енергія є надійною та стабільною, не залежить від погодних умов. Геотермальні теплові насоси відрізняються високою енергоефективністю. Геотермальну енергію можна використовувати для опалення, охолодження та виробництва електроенергії. Її використання сприяє зменшенню залежності від викопного палива.

Серед недоліків геотермальної енергії слід відзначити її обмежену географічну доступність. Початкові витрати на буріння свердловин та будівництво електростанцій можуть бути високими. Існує можливість спричинення землетрусів та осідання ґрунту при неправильній експлуатації геотермальних ресурсів. У невеликих кількостях можуть виділятися певні гази, такі як сірководень та вуглекислий газ [1]. Існує потенційний ризик забруднення підземних вод.

Таблиця 1.8 – Переваги та недоліки використання геотермальної енергії

Переваги	Недоліки
Відновлюване та практично невичерпне джерело енергії	Обмежена географічна доступність
Екологічно чиста, низькі викиди парникових газів	Високі початкові витрати на буріння та будівництво
Надійна та стабільна, не залежить від погоди	Ризик землетрусів та осідання ґрунту при неправильній експлуатації
Висока енергоефективність геотермальних теплових насосів	Виділення газів (сірководень, CO ₂) у невеликих кількостях
Універсальність: для опалення, охолодження та електроенергії	Потенційне забруднення підземних вод
Сприяє зменшенню залежності від викопного палива	

Перспективи розвитку геотермальної енергетики включають прогнозоване зростання інвестицій у галузь на рівні 10% і вище до 2030 року. Для України існують можливості розвитку середніх та малих геотермальних електростанцій на базі наявних родовищ термальних вод. Геотермальні теплові насоси можуть широко використовуватися для опалення та охолодження в регіонах з помірним кліматом, таких як Київська область. Розглядається можливість створення комбінованих електростанцій, що використовують геотермальну енергію та органічне паливо. Хоча використання геотермальної енергетики (тепла сухих гарячих порід) є більш віддаленою перспективою для України, воно також розглядається [4].

1.6 Комбінування та інтеграція ВДЕ

Комбінування різних видів відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячна, вітрова, гідро-, геотермальна та біоенергія, має значні переваги для забезпечення стабільного та надійного енергопостачання. Різні ВДЕ є взаємодоповнюючими за своєю природою. Наприклад, сонячна енергія найбільш

ефективна вдень, тоді як вітрова може бути сильнішою вночі. Гідроенергетика може забезпечувати базове та пікове навантаження, а геотермальна енергія є постійним джерелом. Біоенергія може використовуватися для балансування енергосистеми, забезпечуючи гнучке виробництво електроенергії [1].

Інтеграція ВДЕ в існуючі енергетичні мережі є важливим завданням. Це включає вирішення проблем, пов'язаних з мінливістю генерації ВДЕ, та розвиток розумних мереж (smart grids), які здатні ефективно керувати розподіленою генерацією та двостороннім потоком енергії [8].

У світі існує багато успішних прикладів інтеграції ВДЕ, включаючи гібридні електростанції, що поєднують різні джерела, такі як вітрова та сонячна енергія з гідроенергетикою. Геотермальна енергія успішно інтегрується з системами централізованого теплопостачання. Біомаса використовується для підтримки розширення інших ВДЕ, наприклад, для балансування енергосистеми.

Ефективність різних видів ВДЕ значно варіюється. Коефіцієнт корисної дії сучасних сонячних панелей може досягати 22% , а вітрових турбін - до 45% при оптимальній швидкості вітру. Ефективність гідроелектростанцій є однією з найвищих серед відновлювальних джерел. Геотермальні електростанції мають ККД, який може бути нижчим, ніж у теплових електростанцій, але геотермальні теплові насоси відрізняються високою енергоефективністю. Ефективність біоенергетичних установок залежить від технології та виду біомаси [2] (табл.9).

Вартість технологій відновлювальної енергетики значно знизилася за останні роки. Вартість сонячної та вітрової енергії стала конкурентоспроможною з традиційними джерелами. Гідроенергетика характеризується низькою собівартістю виробництва електроенергії після будівництва. Початкові витрати на геотермальні проєкти можуть бути високими, але експлуатаційні витрати зазвичай нижчі. Вартість біоенергії залежить від доступності та ціни біомаси.

Таблиця 1.9 – Основні характеристики ВДЕ

Характеристика	Сонячна енергія	Вітрова енергія	Гідроенергія	Геотермальна енергія	Біоенергетика
Ефективність	Сучасні панелі до 22%	До 45% при оптимальній швидкості вітру	Одна з найвищих серед ВДЕ	Нижча, ніж у теплових електростанцій (для генерації)	Залежить від технології та біомаси
Вартість	Знижується, стає конкурентоспроможною	Конкурентоспроможна	Низька собівартість після будівництва	Високі початкові витрати, нижчі експлуатаційні	Залежить від доступності та ціни біомаси
Вплив на довкілля	Чиста під час експлуатації, значні площі потрібні	Відсутність викидів, візуальний та шумовий вплив, ризик для птахів	Чисте виробництво, вплив на екосистеми річок, затоплення	Низькі викиди, ризик землетрусів, забруднення вод	Вуглецево-нейтральна при сталому управлінні, викиди при спалюванні

Використання ВДЕ має значні екологічні переваги порівняно з традиційними джерелами енергії. Вони сприяють значному зниженню викидів парникових газів, зменшенню забруднення повітря та води. Однак існують і потенційні екологічні ризики, пов'язані з ВДЕ, такі як вплив вітрових турбін на птахів та кажанів, вплив ГЕС на екосистеми річок, можливість землетрусів, пов'язаних з геотермальною енергетикою, та вирубка лісів для отримання біомаси [1]. Для мінімізації цих ризиків необхідні ретельне планування, використання сучасних технологій та дотримання принципів сталого розвитку.

Відновлювальні джерела енергії є ключовим елементом у переході до сталого енергетичного майбутнього. Сонячна, вітрова, гідро-, геотермальна та біоенергія пропонують різноманітні технології для виробництва чистої енергії, зменшення залежності від викопного палива та боротьби зі зміною клімату. В Україні існує значний потенціал для подальшого розвитку всіх видів ВДЕ, що може сприяти зміцненню енергетичної безпеки та розвитку економіки.

Для реалізації цього потенціалу в Україні необхідно створити сприятливе законодавче та регуляторне середовище для залучення інвестицій у відновлювану енергетику [2]. Важливо стимулювати розвиток розподіленої генерації на основі сонячної та вітрової енергії, а також модернізувати та розвивати гідроенергетичні потужності, включаючи малі ГЕС та ГАЕС. Слід провести оцінку та сприяти використанню потенціалу геотермальної енергії, особливо для теплопостачання. Необхідно підтримувати розвиток біоенергетики, включаючи виробництво біопалива та біогазу. Інвестиції в системи накопичення енергії та розвиток розумних мереж є критично важливими для забезпечення надійної інтеграції ВДЕ в енергосистему. Державна підтримка наукових досліджень та розробок у сфері ВДЕ також є необхідною. Підвищення обізнаності суспільства про переваги та можливості використання ВДЕ сприятиме їх ширшому впровадженню [8].

У даному розділі було детально проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні та світі. Розглянуто основні види ВДЕ, такі як сонячна, вітрова, гідроенергетика, біоенергетика та геотермальна енергетика, їхні переваги та недоліки, а також технологічні особливості їх функціонування. Було наголошено на значному потенціалі України у цій сфері та на ключовій ролі ВДЕ у зміцненні енергетичної незалежності, зменшенні негативного впливу на довкілля та переході до сталого енергетичного майбутнього. Однак, як було зазначено, однією з головних проблем, що стримує широке впровадження ВДЕ, є нестабільність та нерівномірність генерації електроенергії, зумовлена залежністю від погодних умов та часу доби. Ця особливість створює виклики для забезпечення надійності та збалансованості енергосистеми.

Для ефективного вирішення цієї проблеми та забезпечення надійного енергопостачання, у наступному розділі розглядатимуться сучасні підходи до інтеграції ВДЕ, зокрема через застосування систем накопичення енергії. Основну увагу буде приділено їхній здатності оптимізувати балансування

потужності в локальних енергосистемах, а також забезпечувати функції самовідновлення, що є критично важливим для підвищення загальної ефективності та стійкості енергетичної інфраструктури.

2 СУЧАСНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛЕС З ВДЕ

2.1 Накопичувачі як частина ВДЕ

У сучасному енергетичному просторі впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є основним напрямом у досягненні цілей сталого розвитку, зменшенні залежності від викопного палива та зниженні викидів парникових газів. Однак, особливістю ВДЕ є нестабільність генерації електроенергії через залежність від погодних умов і часу доби. Для забезпечення надійного енергопостачання в таких умовах необхідно використовувати системи збереження енергії (СЗЕ), які здатні згладжувати коливання потужності, зберігати надлишкову енергію та забезпечувати її подачу в періоди пікового споживання.

Системи збереження енергії дають змогу накопичувати електроенергію у періоди низького попиту та віддавати її під час високого навантаження. Це дозволяє ефективно інтегрувати ВДЕ у загальну енергетичну систему, підвищити якість електропостачання, зменшити навантаження на магістральні мережі та уникнути використання додаткових резервних потужностей традиційної генерації (рис. 2.1). У сучасних умовах СЗЕ виконують низку важливих функцій: забезпечення частотного та напругового регулювання, заміщення обертового резерву, компенсація реактивної потужності, а також стабілізація роботи мікромереж у режимах автономного функціонування [9,10].



Рис. 2.1 – Принцип роботи СЗЕ

Системи збереження класифікують за принципом дії на електрохімічні, механічні, теплові, хімічні та електричні (табл. 2.1). Найпоширенішими у практиці є електрохімічні накопичувачі — літій-іонні, натрій-сірчані та свинцево-кислотні батареї. Вони характеризуються високою енергоємністю, тривалим терміном служби та високим коефіцієнтом корисної дії (понад 90%). Механічні СЗЕ, такі як гідроакumuлюючі електростанції, використовуються для великомасштабного зберігання, але мають обмеження через географічні особливості. Теплові накопичувачі дозволяють зберігати енергію у вигляді тепла (наприклад, розплавлені солі), а хімічні технології передбачають перетворення електроенергії у водень або синтетичне паливо з подальшим її використанням. Електричні СЗЕ (конденсатори, суперконденсатори) мають надзвичайно швидкий час реакції, але обмежені у тривалості розряду [11].

Таблиця 2.1 – Класифікація систем збереження енергії

Тип СЗЕ	Приклади	Основні характеристики
Електрохімічні	Літій-іонні, натрій-сірчані, свинцево-кислотні батареї	Висока енергоємність, ККД понад 90%, тривалий термін служби

Продовження табл. 2.1 – Класифікація систем збереження енергії

Механічні	Гідроакumuлюючі електростанції	Великомасштабне зберігання, залежність від географії
Теплові	Розплавлені солі, термальні резервуари	Зберігають енергію у вигляді тепла, застосовуються зокрема в сонячних електростанціях
Хімічні	Водень, синтетичне паливо	Енергія перетворюється в хімічну, використовується згодом (наприклад, у паливних елементах)
Електричні	Конденсатори, суперконденсатори	Дуже швидкий відгук, але короткий час розряду та мала ємність

Технічні характеристики накопичувачів є критичними для вибору відповідного типу СЗЕ: ємність, тривалість роботи на номінальній потужності, кількість циклів заряд/розряд, час відгуку, ККД, а також габарити і щільність потужності. Наприклад, літій-іонні батареї демонструють ефективну роботу до 6000 циклів, а суперконденсатори — до мільйона циклів, однак останні мають значно меншу енергоємність. У свою чергу, економічні параметри також є вирішальними — зокрема, капітальні та експлуатаційні витрати, вартість кіловат-години збереженої енергії та строк окупності. В останнє десятиліття вартість літій-іонних батарей знизилась майже на 85%, що сприяє їх широкому комерційному впровадженню [12].

Особливу цінність СЗЕ мають у системах із високою часткою ВДЕ, де нестабільність генерації вимагає швидкої реакції системи на зміни у виробництві чи споживанні. Наприклад, у сонячних електростанціях надлишкова енергія вдень може бути збережена для використання вночі. У вітрових станціях —

компенсується спад або сплеск потужності, спричинений зміною вітру. Таким чином, накопичувачі відіграють роль буфера між генерацією та споживанням.

Сучасні енергосистеми активно переходять до децентралізованих моделей з використанням віртуальних електростанцій (ВЕС) та інтелектуальних мереж (Smart Grid). У таких системах СЗЕ є ключовим елементом. ВЕС дозволяють поєднувати різні джерела генерації, споживачів та накопичувачі в єдину керовану мережу. Завдяки прогнозуванню генерації (наприклад, на основі погодних моделей), автоматизованому управлінню навантаженням та швидкому реагуванню на зміни, ВЕС забезпечують стабільність енергопостачання навіть за високої динамічності процесів [13]. У таких системах накопичувачі не лише згладжують коливання генерації, але й допомагають балансувати навантаження між фазами, знижувати втрати електроенергії та підвищувати якість електропостачання.

Світові прогнози свідчать про стрімке зростання обсягів використання СЗЕ. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), до 2030 року глобальні потужності систем збереження можуть зрости у 10 разів порівняно з рівнем 2020 року. Основними рушіями цього зростання є збільшення частки ВДЕ, електрифікація транспорту, розвиток мікромереж та цифровізація управління енергетичними системами. Водночас актуальними стають дослідження гібридних систем зберігання, які поєднують, наприклад, акумулятори та суперконденсатори для досягнення кращого балансу між тривалістю зберігання та швидкістю відгуку [13,14].

В умовах України накопичувачі мають особливе значення у забезпеченні енергетичної безпеки, зменшенні залежності від централізованої генерації, розвитку локальних енергетичних систем та підтримці стійкості мереж в умовах воєнних викликів. Вже сьогодні в Україні реалізуються пілотні проєкти з інтеграцією СЗЕ до сонячних та вітрових електростанцій, а також до систем розумного управління навантаженням у мікромережах .

Таким чином, системи збереження енергії є важливою частиною енергосистем майбутнього, забезпечуючи стабільність, гнучкість, ефективність і екологічну безпеку. Поєднання СЗЕ з цифровими технологіями, віртуальними електростанціями, прогнозними моделями та інтелектуальним управлінням створює основу для переходу до сталої, адаптивної та децентралізованої енергетики. Подальші дослідження, стандартизація, здешевлення технологій і формування сприятливої нормативно-правової бази є ключем до масштабного впровадження СЗЕ в Україні та світі.

2.2 Самовідновлення

Самовідновлення енергетичних систем – це їхня властивість автоматично повертатися до робочого стану після збоїв, зменшуючи наслідки надзвичайних ситуацій без необхідності прямого втручання людини [15]. Ця функція є ключовою для сучасних інтелектуальних енергосистем (Smart Grid) і реалізується завдяки передовим технологіям, таким як двосторонній обмін даними, дистанційний моніторинг, самодіагностика обладнання, системи попередження аварій та інтелектуальне керування параметрами мережі.

Система самовідновлення в локальних енергетичних системах (ЛЕС) працює за триетапним алгоритмом: швидке виявлення пошкодження, його точна локалізація та ізоляція, а потім відновлення живлення для якомога більшої кількості споживачів. Автоматизація цього процесу значно скорочує середній час відключень (показник SAIFI) завдяки ефективному моніторингу та оперативному прийняттю рішень без участі персоналу [15]. Рівень відновлення (повний чи частковий) залежить від поточного співвідношення між генерацією та споживанням електроенергії в ЛЕС.

Існує дві основні причини для активації механізмів самовідновлення:

- 1) Ізоляція від зовнішньої мережі: Коли локальна енергетична система (ЛЕС) розриває зв'язок з об'єднаною енергетичною системою (ЕЕС), вона переходить на самостійне забезпечення енергією.

- 2) Внутрішні несправності: Аварійні ситуації, що виникають безпосередньо в межах ЛЕС, можуть бути або ліквідовані власними ресурсами системи, або, якщо вони досить серйозні, викликати її відключення від загальної енергосистеми.

У випадку втрати зв'язку з об'єднаною енергетичною системою (ЕЕС), що ілюструється на умовній схемі 2.1 (з документа “Самовідновлення електропостачання в інтелектуальній локальній електроенергетичній системі”), локальна енергосистема (ЛЕС) переходить у спеціальний перехідний режим. Під час цього режиму першочерговим завданням стає підтримка роботи тих споживачів, які мають власні джерела автономного живлення. Одночасно активуються системи зберігання енергії (СЗЕ), здатні автоматично змінювати свій режим роботи з накопичення на віддачу енергії і навпаки.

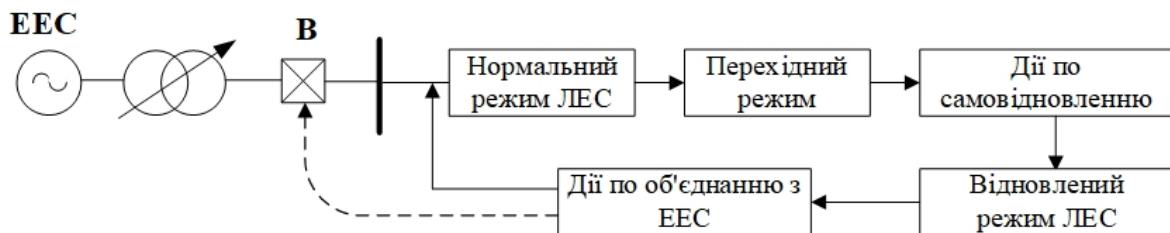


Схема 2.1 - Самовідновлення електропостачання в ЛЕС при втраті зв'язку з ЕЕС

Процес самовідновлення розпочинається з оцінки реального небалансу електроенергії в ЛЕС, який можна визначити за формулою (з документа “Самовідновлення електропостачання в інтелектуальній локальній електроенергетичній системі”):

$$P_{ВДЕ}(t) + P_{СЗЕ}(t) + P_{МГА}(t) - P_{сн}(t) - P_{ас}(t) - \Delta P(t) = P_{нб}(t) \quad (2.1)$$

де $P_{ВДЕ}(t)$ – потужність, яку всі ВДЕ в ЛЕС можуть генерувати, починаючи з часу від'єднання від ЕЕС t ;

$P_{C3E}(t)$ – сумарна потужність СЗЕ всіх microgrid MGAi на час t ;

$P_{MGA}(t)$ – потужність, яку локальний агент ЛЕС А може задіяти з засобів маневреної потужності MGA для підтримування частоти в ізолюваній ЛЕС на час t і далі;

$P_{cn}(t), P_{ac}(t), \Delta P(t)$ – споживання електроенергії в ЛЕС.

Після того, як інтелектуальна система управління локальною енергосистемою (ЛЕС) фіксує наявність небалансу, вона розробляє оптимальну стратегію споживання електроенергії [16]. Початковим кроком є визначення споживачів, які зможуть продовжувати свою діяльність за звичайними графіками навантаження. Інша частина споживачів класифікується на дві основні групи: перша група включає тих, кого система може тимчасово відключити від живлення, а друга – тих, хто має можливість взяти участь у процесі регулювання частоти в межах ЛЕС, забезпечуючи так зване третинне регулювання. При цьому, первинне та вторинне регулювання частоти покладається на потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та систем збереження енергії (СЗЕ) [15]. Додатково, для досягнення загального балансу в системі можуть бути задіяні й активні споживачі. В такому випадку, баланс потужності має вигляд (з документа “Самовідновлення електропостачання в інтелектуальній локальній електроенергетичній системі”):

$$P_{ВДЕ}(t) + P_{C3E}(t) + P_f(t) - P'_{cn}(t) - P_{cnf}(t) - P_{ac}(t) - \Delta P(t) \approx 0 \quad (2.2)$$

де $P_f(t)$ – потужність, яка виділена з регульованих ВДЕ та СЗЕ;

$P'_{cn}(t)$ – потужність споживачів електроенергії, які продовжують працювати за своїми нормальними графіками навантаження;

$P_{cnf}(t)$ – потужність інших споживачів електроенергії.

Ще один випадок активації механізму самовідновлення пов'язаний із виникненням аварійних ситуацій безпосередньо в межах локальної енергетичної системи (ЛЕС), як це зображено на схемі 2.2 (з документу “Самовідновлення

електропостачання в інтелектуальній локальній електроенергетичній системі”). За таких обставин, можливі два основні сценарії: ЛЕС або продовжує функціонувати в з'єднанні з об'єднаною енергетичною системою (ЕЕС), якщо несправність не спричиняє активацію релейного захисту в ЕЕС, або ж аварійна ситуація призводить до відключення ЛЕС від ЕЕС.

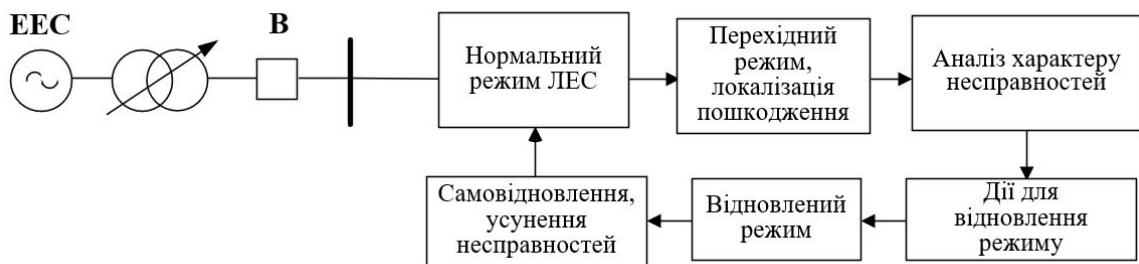


Схема 2.2 - Самовідновлення електропостачання в ЛЕС через аварійні ситуації в ній

За умови збереження зв'язку з ЕЕС, самовідновлення починається з виявлення пошкодження, щоб мінімізувати наслідки аномальних подій і скоротити втрати. Далі, пошкоджену ділянку ізолюють, відключаючи автоматичні вимикачі, і одночасно визначають причину та місце аварії. Щоб мінімізувати обмеження для споживачів, змінюють конфігурацію електромережі. Потужність джерел енергії, що могли опинитися в ізольованій частині, компенсується або резервами ЛЕС, або закупівлею платних послуг у ЕЕС.

Для відновленого режиму характерний наступний баланс потужності, що описується формулою (з документу “Самовідновлення електропостачання в інтелектуальній локальній електроенергетичній системі”):

$$P_{EES}(t) + P_{ВДЕ}(t) + P_{СЗЕ}(t) - P_{cn}(t) - P_{ac}(t) - \Delta P(t) \approx 0 \quad (2.3)$$

Залежно від поточного дисбалансу в ЛЕС, навантаження споживачів у відновленому режимі може залишатися незмінним або бути зниженим. Це, в

свою чергу, вимагає відповідного коригування графіків навантаження для активних споживачів.

Інтелектуальна система управління ЛЕС є центром, що керує всіма діями, спрямованими на самовідновлення електропостачання. За допомогою керуючих дій, які через оптимальні перемикання змінюють конфігурацію мережі, реалізуються алгоритми відновлення. В основі стратегії відновлення лежить теорія графів та метод реконфігурації, що мінімізує кількість перемикачів. Щоб зменшити кількість таких операцій, відновлення електропостачання проводиться по окремих мікромережах, тобто структурно. Ліквідація несправностей дозволяє відновити генерацію та споживання в ізольованій частині ЛЕС, повертаючи систему до її штатного робочого стану.

2.3 Віртуальні електростанції

Сучасний етап розвитку світової електроенергетики характеризується фундаментальними трансформаціями, зумовленими глобальними кліматичними викликами та технологічним прогресом. Ключовими векторами цих змін є декарбонізація, що передбачає поступову відмову від викопних палив на користь відновлюваних джерел енергії (ВДЕ); децентралізація, яка веде до появи значної кількості розподілених генеруючих потужностей, інтегрованих в мережу на рівні споживачів; та цифровізація, що відкриває нові можливості для інтелектуального управління енергетичними потоками [17]. У цьому контексті віртуальні електростанції (ВЕС) постають як інноваційна концепція та практичний інструмент, що дозволяє ефективно агрегувати та координувати роботу різноманітних розподілених енергетичних ресурсів (PER), забезпечуючи їхню синергетичну взаємодію. Попередні підрозділи цього розділу розглядали системи накопичення енергії (СЗЕ) як важливий компонент для інтеграції ВДЕ, механізми самовідновлення локальних енергосистем (ЛЕС) та підходи до балансування їх режимів. Віртуальні електростанції логічно продовжують цю тематику, демонструючи, як ці окремі елементи та концепції можуть бути

об'єднані в єдину керовану систему, здатну оптимізувати роботу ЛЕС, підвищити її надійність та економічну ефективність [17].

Віртуальні електростанції (Virtual Power Plant, VPP) представляють собою новий тип електричних станцій, що базуються на розподілених технологіях та стратегіях керування системами Smart Grid. По суті, ВЕС – це хмарна інформаційно-технологічна (ІТ) система, до якої підключені географічно розподілені джерела енергії (часто невеликої та середньої потужності), споживачі цієї енергії та системи її накопичення. Така мережа децентралізованих енергетичних ресурсів об'єднується та керується централізовано з метою забезпечення надійного електропостачання [16].

Ключовими компонентами кожної віртуальної електростанції є :

- Розподілені енергетичні ресурси (PER): Це можуть бути генеруючі установки середнього розміру, такі як вітрові електростанції (ВЕС) та сонячні електростанції (СЕС), малі гідроелектростанції, когенераційні установки. Важливу роль відіграють також гнучкі споживачі електроенергії, які мають енергетичні активи з властивою гнучкістю, що може бути використана шляхом реагування на попит (Demand Response). Невід'ємною частиною є гнучкі системи накопичення енергії, наприклад, акумуляторні накопичувачі.
- Споживачі: Активні та пасивні споживачі електроенергії, підключені до системи.
- Системи зберігання енергії (СЗЕ): Як вже зазначалося, СЗЕ є критично важливим елементом, що забезпечує гнучкість ВЕС, дозволяючи накопичувати енергію в періоди її надлишку та віддавати в мережу під час пікових навантажень або дефіциту генерації.
- Програмне забезпечення (централізована ІТ-платформа): Це "мозок" ВЕС, що здійснює моніторинг, координацію, оптимізацію та контроль усіх підключених енергетичних активів в режимі реального часу.

Принцип функціонування ВЕС полягає в інтелектуальній агрегації та координації роботи різноманітних РЕР таким чином, щоб вони функціонували як єдиний, узгоджений об'єкт, здатний надавати електроенергію та системні послуги. Центральна система управління ВЕС розподіляє доступну енергію між споживачами, оптимізує процеси її накопичення в СЗЕ, а також здійснює обмін та торгівлю електроенергією як всередині самої ВЕС (між її учасниками), так і на зовнішніх енергетичних ринках. Наприклад, якщо вдень сонячні панелі, що входять до складу ВЕС, генерують надлишкову електроенергію, система може спрямувати її на зарядку акумуляторних батарей або продати на ринку. Ввечері, коли генерація СЕС знижується, а попит зростає, ВЕС може використати накопичену енергію або активувати інші доступні джерела, наприклад, швидкозапускні газові генератори чи залучити ресурс гнучких споживачів, які погоджуються тимчасово знизити своє навантаження. Керування ВЕС здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке безперервно аналізує величезні масиви даних: прогнози погоди (для ВДЕ), поточне споживання, стан СЗЕ, ціни на енергетичних ринках тощо, – та на основі цього аналізу приймає оптимальні рішення щодо завантаження/розвантаження окремих РЕР [17].

Гнучкість ВЕС проявляється не лише в можливості об'єднувати РЕР, розташовані в різних місцях, але й у здатності динамічно змінювати свій склад та функціонал залежно від потреб енергосистеми та ринкової кон'юнктури. ВЕС не є статичною структурою; вона може адаптуватися, залучаючи різні типи ресурсів – генерацію різного типу (ВДЕ, традиційна мала генерація), системи накопичення, а також кероване навантаження споживачів – для виконання широкого спектра завдань: від простого постачання електроенергії до надання складних допоміжних послуг, таких як регулювання частоти та напруги.

Віртуальні електростанції відіграють дедалі важливішу роль у трансформації сучасних енергосистем, сприяючи підвищенню їх гнучкості, надійності та ефективності. Вони дозволяють повною мірою використовувати

переваги розподіленої генерації, одночасно допомагаючи вирішувати проблеми, пов'язані з її інтеграцією, зокрема, проблему надійності електропостачання. Забезпечуючи оптимальне використання наявних енергетичних ресурсів у кожній конкретній точці та в кожний момент часу, ВЕС сприяють зменшенню навантаження на магістральні електричні мережі та дозволяють уникнути або відтермінувати необхідність будівництва нових потужних генеруючих об'єктів традиційної енергетики та дороговартісних мережевих підкріплень [17].

Внесок ВЕС у балансування потужності та реалізацію функцій самовідновлення в локальних енергосистемах є надзвичайно важливим. Маючи можливість агрегувати та керувати значними обсягами розподіленої генерації та накопиченої енергії, ВЕС можуть активно брати участь у ринках електроенергії та допоміжних послуг, продаючи електроенергію та потужність для стабілізації електромережі під час коливань попиту та пропозиції. Вони здатні забезпечувати виробництво та розподіл електроенергії відповідно до поточного попиту, оперативно залучаючи резерви, наприклад, збережену енергію з акумуляторних батарей, для стабілізації параметрів електросистеми, зокрема частоти та напруги. Така здатність до швидкого реагування та надання послуг гнучкості робить ВЕС важливим інструментом для оператора системи.

Впровадження віртуальних електростанцій супроводжується низкою суттєвих переваг, які охоплюють технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Однак, як і будь-яка нова технологія, ВЕС мають певні недоліки та стикаються з викликами на шляху свого поширення (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Переваги та недоліки ВЕС

Переваги	Недоліки
Зменшення залежності від імпорту енергії, підвищення енергобезпеки. Гнучкість розташування РЕР. Стабілізація мережі, покращення якості електроенергії. Підвищена стійкість до форс-мажорів.	Потреба у відповідній ІКТ-інфраструктурі та модернізації електромереж. Потреба у кваліфікованому персоналі. Складність координації великої кількості РЕР.

Продовження табл. 2.2 – Переваги та недоліки ВЕС

Зниження витрат на електроенергію за рахунок ВДЕ та оптимізації. Можливість заробітку для власників РЕР. Зменшення потреби в дорогих пікових станціях.	Високі початкові інвестиції в РЕР та СНЕ для окремих учасників. Залежність від державної підтримки та фінансових стимулів на початкових етапах.
Значне зниження викидів парникових газів та інших забруднювачів. Сприяння декарбонізації енергетики.	Потенційний локальний негативний вплив окремих РЕР (наприклад, ВЕС на птахів, СЕС на землекористування). Питання утилізації компонентів РЕР та СНЕ.
Активне залучення споживачів до енергоринку, розвиток просьюмерства. Підвищення обізнаності суспільства щодо сучасних енергетичних технологій.	Відсутність або недосконалість законодавчої та регуляторної бази. Необхідність розробки чітких правил функціонування ринку ВЕС та статусу агрегаторів.

Ринок віртуальних електростанцій демонструє динамічний розвиток у глобальному масштабі. Хоча оцінки його обсягів у різних аналітичних звітах можуть дещо відрізнятися через відмінності в методологіях та визначеннях, усі експерти сходяться на думці щодо значних темпів зростання. Так, прогнозувалося, що до 2026 року цей ринок зростатиме щорічно на 25-26%. Більш свіжі дані по Європі вказують на оцінку ринку ВЕС у \$1.50 млрд у 2024 році з прогнозом зростання до \$4.76 млрд до 2030 року, що відповідає середньорічному темпу зростання (CAGR) на рівні 21.3%. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), глобальна ринкова вартість ВЕС оцінювалася в \$762 млн ще у 2016 році, з очікуванням досягти \$4,597 млн у 2023 році [2]. Основними рушійними силами цього зростання є прискорена інтеграція ВДЕ в енергосистеми, зростаючий попит на гнучкість та стабільність роботи електричних мереж, активний розвиток технологій Smart Grid та поширення електромобілів, які можуть виступати як мобільні системи накопичення енергії та ресурс для ВЕС.

В Україні, станом на період до повномасштабного вторгнення, існувала невелика кількість ВЕС, переважно на базі вітрових та сонячних електростанцій, з найбільшою концентрацією у південних та східних областях (Запорізька, Миколаївська, Дніпропетровська, Херсонська, Одеська). Війна завдала значних руйнувань енергетичній інфраструктурі, включаючи об'єкти ВДЕ, особливо на територіях, де велися або ведуться активні бойові дії. Водночас, саме в умовах війни та необхідності підвищення стійкості енергосистеми, концепція ВЕС на базі розподіленої генерації (РГ) набуває особливої актуальності. Розгортання РГ з одиничною електричною потужністю до 15-20 МВт та/або тепловою до 20-30 МВт робить такі об'єкти менш пріоритетними цілями для ворожих атак і сприяє збереженню енергопостачання [4,5].

Для України, особливо в контексті післявоєнного відновлення та нагальної потреби у підвищенні енергетичної стійкості та безпеки, розвиток ВЕС на базі розподіленої генерації може стати одним із стратегічних напрямків. Такий підхід дозволяє одночасно вирішувати завдання енергетичної безпеки (за рахунок диверсифікації та зниження вразливості до атак), децентралізації енергосистеми, інтеграції відновлюваних джерел енергії та залучення інвестицій в енергетичний сектор. Досвід європейських країн у створенні ринків для допоміжних послуг та інтеграції агрегаторів може слугувати цінним орієнтиром для України при розробці власної моделі ринку ВЕС, адаптованої до національних особливостей, поточних викликів та довгострокових стратегічних цілей розвитку.

Віртуальні електростанції є інноваційним та багатофункціональним інструментом, що відіграє дедалі важливішу роль у модернізації сучасних електроенергетичних систем. Вони являють собою інтелектуально керовані об'єднання розподілених енергетичних ресурсів, включаючи відновлювані джерела енергії, системи накопичення та гнучке навантаження споживачів, які функціонують як єдиний, скоординований об'єкт [17].

Аналіз показав, що ВЕС мають значний потенціал для вирішення ключових проблем, пов'язаних з інтеграцією нестабільних ВДЕ, забезпеченням балансу

потужності в локальних енергосистемах та підвищенням їхньої загальної надійності та ефективності. Завдяки використанню передових інформаційно-комунікаційних технологій, штучного інтелекту та Інтернету речей, ВЕС здатні оптимізувати використання енергоресурсів, знижувати витрати, підвищувати стійкість енергосистем до збоїв та сприяти активному залученню споживачів до управління енергоспоживанням.

Попри низку переваг, повномасштабне впровадження ВЕС стикається з певними викликами, зокрема, необхідністю вдосконалення нормативно-правової бази, розбудови відповідної інфраструктури та подолання економічних бар'єрів. Однак, глобальні тенденції та успішний досвід багатьох країн свідчать про високі перспективи цієї технології.

Для України, в умовах необхідності відновлення енергетичної інфраструктури, підвищення її стійкості та енергетичної незалежності, розвиток віртуальних електростанцій на основі розподіленої генерації може стати одним із пріоритетних напрямків. Це дозволить не лише слідувати світовим трендам декарбонізації та децентралізації, але й суттєво посилити енергетичну безпеку країни. Подальший розвиток ВЕС в Україні вимагатиме скоординованих зусиль з боку держави, бізнесу та наукової спільноти для створення сприятливого регуляторного середовища, стимулювання інвестицій та впровадження передових технологічних рішень.

Отже, було детально проаналізовано ключові технології для оптимізації локальних енергосистем (ЛЕС) з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Було розглянуто системи накопичення енергії (СЗЕ) як засіб пом'якшення нестабільності ВДЕ, механізми самовідновлення для підвищення надійності ЛЕС, та концепцію віртуальних електростанцій (ВЕС) як інструмент інтеграції та координації розподілених енергетичних ресурсів (РЕР), включаючи ВДЕ, СЗЕ та кероване навантаження. Таким чином, було показано, що СЗЕ, самовідновлення та ВЕС є важливими інструментами для модернізації ЛЕС та ефективної інтеграції ВДЕ.

Однак, для забезпечення стабільного та економічно ефективного балансування режимів ЛЕС з ВДЕ, необхідно розробити та застосувати обґрунтовані аналітичні та методологічні підходи. У наступному розділі детально описано проблему управління невідповідностями, спричиненими нестабільністю ВДЕ, та досліджено методи оптимізації резервних потужностей. Розглянуто критеріальний метод для оцінки та вибору найбільш ефективної комбінації засобів резервування, що забезпечить надійну та економічно доцільну роботу ЛЕС.

3 БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ ЛЕС З ВДЕ

3.1 Задача оптимізації балансування ЛЕС

Однією з головних проблем при інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальну енергосистему є нерівномірність виробництва електроенергії сонячними та вітровими установками. Оскільки їхня продуктивність безпосередньо залежить від погодних умов і часу доби, фактичний обсяг генерованої потужності часто не відповідає ані поточним запитам споживачів, ані заздалегідь складеним графікам генерації. Це може призводити до виникнення дисбалансу між обсягами виробленої та спожитої електроенергії в межах локальних енергетичних систем (ЛЕС). Для запобігання таким розбіжностям необхідні додаткові резервні потужності, які здатні оперативно компенсувати як дефіцит, так і надлишок енергії [18].

Баланс електроенергії ЛЕС може бути представлений у вигляді наступної формули (з документа “Вибір засобів балансування режимів локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії”):

$$P_{\text{ФЕС}}(t) + P_{\text{ВЕС}}(t) + P_{\text{МГЕС}}(t) + P_{\text{БГУ}}(t) \pm P_{\text{ЕЕС}}(t) \pm P_{\text{в}}(t) \pm P_{\text{х}}(t) - P_{\text{сн}}(t) - \Delta P(t) = 0 \quad (3.1)$$

де $P_{\text{ФЕС}}(t)$ – потужність, що генерується фотоелектричними станціями;

$P_{\text{ВЕС}}(t)$ – потужність, яку виробляють вітрові електростанції;

$P_{\text{МГЕС}}(t)$ – потужність малих гідроелектростанцій;

$P_{\text{БГУ}}(t)$ – електрична потужність, що забезпечується когенераційними установками;

$P_{\text{ЕЕС}}(t)$ – потужність ЕЕС;

$P_{\text{в}}(t)$ – потужність водневих установок;

$P_{\text{х}}(t)$ – потужність електрохімічних накопичувачів;

$P_{cn}(t)$ – потужність всіх споживачів електроенергії, враховуючи також категорію «активних» споживачів;

$\Delta P(t)$ – технологічні витрати в електричних мережах.

Прийнявши за критерій оптимальності сумарні витрати $B_{рез}$ на резервування нестабільної генерації ВДЕ, задача мінімізації витрат, з урахуванням реально доступних на сьогодні способів резервування, може бути записана у вигляді формули (з документа “Вибір засобів балансування режимів локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії”):

$$B_{рез} = B_x(P_x) + B_6(P_6) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) + B_\kappa(P_\kappa) \rightarrow \min \quad (3.2)$$

де $B_x(P_x)$ – витрати на резервування електрохімічних накопичувачів;

$B_6(P_6)$ – витрати на водневі технології;

$B_z(P_z)$ – витрати, зв’язані з використанням біогазових технологій як резерву;

$B_c(P_c)$ – витрати на користування системним резервом;

$B_n(P_n)$ – витрати на запаси пропускної спроможності ліній електропередачі, що необхідно для транспортування електроенергії з/до місця під’єднання резервної потужності до ЕЕС;

$B_\kappa(P_\kappa)$ – витрати на реалізацію координації графіків генерування і споживання електроенергії в ЕЕС;

$P_x, P_6, P_z, P_c, P_n, P_\kappa$ – відповідно оптимальні значення потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування.

3.2 Застосування критеріального методу

Вибір оптимальної комбінації та потужності засобів резервування є складним багатофакторним завданням. Необхідно враховувати технічні характеристики (потужність, ємність, швидкість реакції, кількість циклів

заряду/розряду), економічні показники (капітальні та експлуатаційні витрати), рівень технологічної зрілості, екологічний вплив та специфіку конкретної енергосистеми. Впровадження СЗЕ, особливо у великих масштабах, потребує значних інвестицій, тому обґрунтований вибір найбільш технічно ефективних та економічно доцільних варіантів є критично важливим.

В умовах, коли необхідно порівнювати різноманітні за своєю природою та характеристиками технології резервування, часто за наявності обмеженої або неповної вихідної інформації, ефективним інструментом аналізу стають спеціалізовані математичні моделі [19]. Одним із таких підходів, що добре зарекомендував себе в електроенергетиці, є критеріальний метод, який базується на положеннях теорії подібності [20].

Критеріальний метод є одним із методів теорії подібності та моделювання. Теорія подібності дозволяє встановлювати зв'язки між однойменними фізичними величинами, що характеризують подібні явища або системи, та переносити результати досліджень, отримані на моделях, на реальні об'єкти. Критеріальний метод використовує ці принципи для оцінки ефективності складних техніко-економічних систем та процесів, зокрема, в електроенергетиці, у відносних одиницях [22].

Сутність критеріального методу полягає у наступному:

- Формування математичної моделі: Розробляється математична модель досліджуваного процесу або системи у вигляді цільової функції, яка відображає основний критерій оптимальності (наприклад, мінімум сумарних або питомих витрат, максимум ефективності тощо). Ця функція залежить від ряду керованих змінних (параметрів системи).
- Перехід до критеріальної форми: Математична модель перетворюється у безрозмірну (критеріальну) форму шляхом нормування всіх змінних та самої цільової функції відносно їх оптимальних або базових значень. У цій формі модель виражається через критерії подібності (або критерії оптимальності).

- Визначення критеріїв подібності: Значення цих критеріїв знаходять шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (так званих ортогональних та нормованих або ортонормованих рівнянь), що виводяться з умови екстремуму цільової функції.
- Аналіз результатів: Отримана критеріальна модель дозволяє проводити комплексний аналіз системи, зокрема оцінювати співрозмірність впливу різних факторів та чутливість цільової функції до зміни параметрів.

Основні переваги критеріального методу:

- Можливість роботи з обмеженою інформацією: Метод дозволяє отримувати обґрунтовані висновки та проводити порівняльний аналіз навіть за умов дефіциту точних вихідних даних, що особливо цінно на етапах передпроектних досліджень, стратегічного планування та при аналізі нових, ще недостатньо вивчених технологій.
- Порівняння різнорідних альтернатив: Критеріальний метод надає уніфікований підхід для порівняння техніко-економічної ефективності різних за своєю фізичною природою, технологічним рівнем та вартісними характеристиками варіантів (наприклад, різних типів СНЕЕ, традиційних джерел та заходів з керування попитом).
- Оцінка у відносних одиницях: Результати розрахунків представляються у відносних (безрозмірних) одиницях, що спрощує порівняння та ранжування альтернатив за обраним критерієм оптимальності, а також дозволяє виявляти загальні закономірності функціонування досліджуваних систем.
- Аналіз співрозмірності (пропорційності): Метод дозволяє визначити оптимальне співвідношення (пропорції) між різними компонентами системи або витратами на них для досягнення найкращого значення цільової функції. Це дає змогу обґрунтовано розподіляти ресурси та інвестиції.

- Аналіз чутливості: Критеріальна модель дозволяє легко дослідити, як зміна окремих параметрів системи (наприклад, потужності конкретного засобу резервування, його вартості) впливає на загальний показник ефективності. Це важливо для оцінки стійкості рішень та виявлення найбільш критичних факторів.
- Універсальність застосування: Хоча даний розділ фокусується на задачах електроенергетики, критеріальний метод може бути успішно застосований у найрізноманітніших галузях техніки та економіки для розв'язання оптимізаційних задач.

Завдяки цим перевагам, критеріальний метод є хорошим інструментом для системного аналізу та прийняття обґрунтованих рішень щодо вибору та оптимізації засобів резервування та балансування в ЕЕС з високою часткою ВДЕ.

3.3 Математична модель оптимізації засобів резервування ВДЕ

Для проведення аналізу ефективності різних способів резервування нестабільної генерації ВДЕ за допомогою критеріального методу необхідно спершу сформулювати математичну модель задачі [23]. Як правило, за критерій оптимальності приймають мінімум сумарних приведених витрат або питомих витрат на забезпечення необхідного рівня резервування.

Цільова функція

Математичну модель оптимізації питомих витрат на 1 кВт резервної потужності ($B_{рез}$) для урівноваження генерування ВДЕ, що враховує особливості режимів ЕЕС та різні способи резервування, можна представити у наступному вигляді (з документу “Вибір засобів балансування режимів локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії”):

$$B_{рез} = C_1 P_x^{-1} + C_2 P_{\theta} + C_3 P_z + C_4 P_c^{-1} + C_5 P_{\kappa} + C_6 P_x^2 P_c^2 P_{\theta}^{-1} P_z^{-1} P_{\kappa}^{-1} \rightarrow \min \quad (3.3)$$

де:

$B_{рез}$ – питомі витрати на 1 кВт резервної потужності, грн/кВт (або інша грошова одиниця/кВт);

$P_x, P_e, P_z, P_c, P_n, P_k$ – відповідно оптимальні значення потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування.

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – узагальнені константи, що містять вихідні дані задачі (в першу чергу це цінові показники);

Перший доданок враховує, що вартість ЕХН зменшується, тому їх потужність в ЕЕС нарощується. Другий та третій доданки відображають питомі витрати на водневі та біогазові технології. Четвертий – витрати на користування системним резервом. П'ятий – витрати на реалізацію координації графіків. Останній доданок відображає витрати на покриття втрат електроенергії в елементах мережі [19].

Обмеження

Модель (3.3) розв'язується за певних обмежень, наприклад:

Обмеження на максимальну доступну потужність системного резерву: $P_c \leq G_c$, де G_c – максимально доступна потужність системного резерву. Це обмеження може бути представлене у вигляді $g_c = 1/G_c$

Аналогічні обмеження можуть бути накладені на потужності інших засобів резервування, виходячи з технічних, економічних або ресурсних лімітів.

Припущення моделі

При формуванні цільової функції (3.3) та її подальшому аналізі робляться певні допущення [22]:

Централізоване розміщення: ЕХН, установки для виробництва "зеленого" водню та БГУ розглядаються як централізовано розміщені об'єкти в ЛЕС або ЕЕС. Вибір оптимального місця їх розташування є окремою задачею.

- Врахування втрат: Втрати електроенергії в електричних мережах, пов'язані з функціонуванням засобів резервування, враховуються у цільовій функції (останній доданок).

- Достатність пропускної здатності мереж: На початковому етапі аналізу пропускна здатність ліній електропередачі вважається достатньою для транспортування електроенергії від/до місць підключення резервних потужностей. Витрати на її можливе розширення можуть бути враховані на наступних етапах або через модифікацію констант C_i .
- Стан технологій: Враховується поточний рівень розвитку та вартісні характеристики технологій. Наприклад, вартість ЕХН має тенденцію до зниження, тоді як водневі та біогазові технології як засоби резервування знаходяться на різних етапах комерціалізації, і їх вартість може залежати від попиту в інших секторах.
- Ринкові умови: Вартість системного резерву залежить від стану ЕЕС (дефіцитний чи профіцитний баланс) та ринкових правил.

Перехід до критеріальної форми

Для застосування критеріального методу цільову функцію (1) та змінні в ній нормують, тобто переводять у відносні одиниці [23]. Нормування здійснюється відносно оптимальних значень відповідних величин, які позначаються індексом "о" або "min".

- Відносна питома вартість: $B_{рез*} = B_{рез} / B_{рез\ min}$
- Відносні потужності: $P_{x*} = P_x / P_{xo}$; $P_{\epsilon*} = P_{\epsilon} / P_{\epsilon o}$; $P_{z*} = P_z / P_{zo}$; $P_{c*} = P_c / P_{co}$;
 $P_{k*} = P_k / P_{ko}$

Тоді цільова функція (3.3) у критеріальній формі запишеться так (з документу посилання):

$$B_{рез*} = \pi_{1o} P_{x*}^{-1} + \pi_{2o} P_{\epsilon*} + \pi_{3o} P_{z*} + \pi_{4o} P_{c*}^{-1} + \pi_{5o} P_{k*} + \pi_{6o} P_{x*}^2 P_{c*}^2 P_{\epsilon*}^{-1} P_{z*}^{-1} P_{k*}^{-1} \quad (3.4)$$

де π_{io} – оптимальні значення критеріїв подібності (або критеріїв оптимальності), які визначаються як $\pi_{io} = C_i / B_{рез\ min}$

Значення π_{io} характеризують частку кожного зі способів резервування у формуванні оптимальних (мінімальних) сумарних витрат.

Задача, що описується цільовою функцією (3.3), не відповідає умові канонічності для прямого застосування деяких аспектів критеріального методу, оскільки міра її складності $s = m - n - 1 \neq 0$, де m - кількість членів у системі критеріальних рівнянь, а n - кількість змінних P_i . У даному випадку, $s=2$. Згідно з критеріальним методом, для розв'язання такої задачі записується система ортогональних і нормованих (ортонормованих) рівнянь. Ця система рівнянь дозволяє визначити критерії подібності π_{i_0} .

Для розв'язання системи ортонормованих рівнянь, приймають дві зі складових резервування за базові. Доцільно за базові прийняти витрати на системний резерв та на електрохімічні накопичувачі, оскільки перша є найбільш стабільною, а для других вже встановилися цінові показники. Розв'язок системи рівнянь відносно двох вільних параметрів (наприклад, π_6 та π_7 , що відповідають цим базовим змінним) дозволяє виразити оптимальні критерії $\pi_{10} \dots \pi_{50}$ через них. У загальному вигляді, вектор критеріїв $\pi = [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5]^T$ може бути

представлений як $\pi = b_0 + b_n \begin{bmatrix} \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix}$, де b_0 - вектор нормалізації, а b_n - матриця векторів нев'язки.

Для конкретного випадку, коли вплив цих вільних параметрів π_6 і π_7 дорівнює нулю (базовий сценарій), оптимальні критерії подібності приймають значення:

- $\pi_{10} = 2 / 7$ (для електрохімічних накопичувачів P_x);
- $\pi_{20} = 1 / 7$ (для водневих технологій P_v);
- $\pi_{30} = 1 / 7$ (для біогазових технологій P_b);
- $\pi_{40} = 2 / 7$ (для системного резерву P_c);
- $\pi_{50} = 1 / 7$ (для компенсації втрат електроенергії)

Тоді рівняння (3.4) для відносних витрат $V_{рез*}$ набуває вигляду (з документу “Відносне оцінювання вартості засобів резервування відновлюваних джерел енергії”):

$$V_{рез*} = \frac{2}{7}P_{x*}^{-1} + \frac{1}{7}P_{e*} + \frac{1}{7}P_{z*} + \frac{2}{7}P_{c*}^{-1} + \frac{1}{7}P_{k*} + \frac{1}{7}P_{x*}^2 P_{c*}^2 P_{e*}^{-1} P_{z*}^{-1} P_{k*}^{-1} \quad (3.5)$$

З рівняння (3.5) видно, що якщо значення потужностей заходів резервування є оптимальними, тобто у відносних одиницях всі $P_{i*}=1$, то $V_{рез*}=1$. Це означає, що вираз (3.5) дозволяє аналізувати заходи резервування генерування ВДЕ на співрозмірність і чутливість $V_{рез*}$ до відхилення потужностей P_{i*} від їх оптимальних значень у відносних одиницях.

На основі моделі (3.5) можна зробити висновки щодо економічно доцільного співвідношення витрат на різні засоби резервування. Сумарні витрати будуть економічно доцільними, якщо вони розподіляться у таких пропорціях: витрати на водневі і біогазові технології мають бути однаковими; також однаковими мають бути витрати на електрохімічне акумулювання і використання системного резерву. Поки водневі та біогазові технології розвиваються, доцільно користуватися системним резервом і електрохімічним акумулюванням, хоча це може бути удвічі дорожче порівняно з оптимальним розподілом за умови повної доступності всіх технологій. Ці результати отримані виходячи з того, що значення оптимальних критеріїв подібності не залежать від узагальнених констант $C1, \dots, C5$ у цільовій функції (3.3).

Вплив же самих узагальнених показників $C1, \dots, C5$ на економічно доцільні значення потужностей $P_{x*}, P_{v*}, P_{г*}, P_{с*}$ та на загальні витрати $V_{рез}$ можна оцінити, визначивши їх значення із системи рівнянь, записаних згідно методу інтегральних аналогів з (3.3) з врахуванням критеріїв з (3.5) (для випадку $\pi_6=0$, $\pi_7=0$). Наприклад, для такого базового сценарію, оптимальні потужності та витрати визначаються формулами (з документу “Відносне оцінювання вартості засобів резервування відновлюваних джерел енергії”):

$$- P_x = \left[\frac{C_1^5}{8 * C_2 * C_3 * C_4^2 * C_5} \right]^{\frac{1}{7}} ;$$

$$- P_x = \left[\frac{C_1^2 * C_2^4 * C_4^2 * C_5}{16 * C_3^3} \right]^{\frac{1}{7}} ;$$

$$- P_z = \left[\frac{C_1^2 * C_2 * C_4^2 * C_5}{16 * C_3^6} \right]^{\frac{1}{7}} ;$$

$$- P_c = \left[\frac{C_4^5}{8 * C_1^2 * C_2 * C_3 * C_5} \right]^{\frac{1}{7}} .$$

$$B_{рез} = \frac{1}{7} \left[16 * C_2^1 * C_2 * C_3 * C_4^2 * C_5 \right]^{\frac{1}{7}} \quad (3.6)$$

Ці вирази показують, що економічно доцільні значення потужностей, що визначаються з кожного зі способів резервування, і витрати на їх реалізацію залежать від прийнятого сценарію (значень C_i). Тому економічно доцільні способи резервування та їх потужності, а також параметри реалізації кожного способу обираються з врахуванням їх взаємовпливу в системі. Наприклад, якщо C_1 (вартісний показник електрохімічних накопичувачів) відносно базисного збільшиться на 20% при незмінних C_2, C_3, C_4, C_5 , то сумарні витрати $B_{рез}$ на урівноваження графіка генерування ВДЕ шляхом резервування зростуть на 40% (згідно з аналізом чутливості у статті).

3.4 Застосування в локальних електроенергетичних системах (ЛЕС)

Критеріальний метод є особливо цінним інструментом при проектуванні, аналізі та оптимізації функціонування локальних електроенергетичних систем (ЛЕС). ЛЕС часто характеризуються значною часткою ВДЕ, співрозмірністю місцевої генерації та споживання, а також можливістю роботи як у складі об'єднаної ЕЕС, так і в автономному або острівному режимі. У таких системах завдання забезпечення балансу потужності та компенсації нестабільності ВДЕ стоїть особливо гостро [22].

Застосування критеріального методу дозволяє для конкретної ЛЕС:

- Оцінити та порівняти ефективність різних доступних засобів резервування та балансування: місцевих СНЕЕ (ЕХН, водневі технології, БГУ), можливостей активного керування попитом (узгодження графіків споживання), а також взаємодії з магістральною ЕЕС (використання системного резерву).
- Визначити оптимальну структуру резервних потужностей в ЛЕС, тобто знайти найкраще співвідношення між різними типами накопичувачів, маневреними джерелами та заходами DSM.
- Обґрунтувати доцільність інвестицій у ті чи інші технології балансування з урахуванням специфіки ЛЕС (склад ВДЕ, характер навантажень, наявність зв'язків із зовнішньою мережею).

У третьому розділі розглянуто проблему балансування локальних енергетичних систем (ЛЕС) із значною часткою нестабільних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та необхідність резервних потужностей. Центральне місце відведено критеріальному методу як інструменту для вибору оптимальної комбінації та потужності засобів резервування [23]. Розкрито його теоретичні основи, що базуються на теорії подібності, та методологію, яка включає формування математичної моделі у безрозмірній критеріальній формі для аналізу критеріїв оптимальності. Показано, що критеріальний метод дозволяє оцінювати ефективність різних засобів балансування та визначати оптимальну структуру резервів, надаючи науково-методичну основу для забезпечення стабільної та економічно ефективної роботи ЛЕС з високою часткою ВДЕ.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі експлуатації силового обладнання електричних мереж, зокрема відновлювальних джерел електроенергії. На оперативно-ремонтний персонал, що здійснює експлуатацію системи електропостачання, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [24, 25]:

- фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);
- хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);
- фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

В електроустановках понад 1000 В працівники зі складу оперативних або оперативно-виробничих працівників, які одноособово обслуговують електроустановки, а також старші в зміні повинні мати групу IV, решта - групу III. В електроустановках до 1000 В працівники зі складу оперативних або оперативно-виробничих працівників, які одноособово обслуговують електроустановки, повинні мати групу III.

Забороняється в електроустановках наближення людей, механізмів та вантажопідіймальних машин до неогороджених струмовідних частин, що перебувають під напругою, на відстань, меншу за зазначену в інструкціях з ОП. Виняток становлять роботи з використанням електрозахисних засобів.

Огляд електроустановок електростанцій, підстанцій та розподільчих пунктів може виконувати один працівник з групою III зі складу оперативних та оперативно-виробничих працівників або працівник з групою V зі складу керівників чи спеціалістів підприємства. Огляд виконується з дозволу особи, в управлінні якої знаходиться електроустановка.

Огляд електроустановок неелектротехнічними працівниками та екскурсії слід проводити під наглядом працівника з групою V або оперативного працівника з групою IV, якщо є дозвіл керівництва підприємства. Огляд ПЛ слід виконувати відповідно до вимог цих Правил. Електротехнічних працівників, які не обслуговують дані електроустановки, слід допускати до них у супроводі оперативних або оперативно-виробничих працівників з групою IV, або іншого працівника з групою V. Працівник, який супроводить, повинен забезпечити створення безпечних умов для людей та попереджати їх про заборону наближення до струмовідних частин.

Під час огляду електроустановок понад 1000 В забороняється відчиняти двері приміщень, комірок, не обладнаних сітчастими огороженнями або бар'єрами, якщо відстань між дверима і струмовідними частинами менша за зазначену в цих Правилах. Перелік таких приміщень і комірок затверджує керівництво підприємства. В електроустановках понад 1000 В, в яких вхід до

приміщень, комірок обладнано сітчастими огороженнями або бар'єрами, під час огляду забороняється відчиняти двері сітчастих огорожень і проникати за огороження або бар'єри. В електроустановках до 1000 В під час огляду дозволяється відчиняти двері щитів, збірок, пультів керування та інших пристроїв. Забороняється під час огляду виконувати будь-яку роботу.

В електроустановках 6-35 кВ забороняється наближатись до місця замикання на землю на відстань менше 4 м в ЗРУ та менше 8 м у ВРУ та на ПЛ. Наближення до місця замикання на землю в цих електроустановках допускається тільки для знімання напруги та звільнення людей, які потрапили під напругу. У цьому разі потрібно користуватись електрозахисними засобами.

Вимикати та вмикати роз'єднувачі, відокремлювачі, вимикачі понад 1000 В з ручним приводом необхідно в діелектричних рукавичках.

Знімати та встановлювати запобіжники необхідно при знятій напрузі. Під напругою, але без навантаження, допускається знімати та встановлювати запобіжники на приєднаннях, в схемі яких відсутні комутаційні апарати, що дозволяють зняти напругу.

Під напругою та під навантаженням допускається замінювати запобіжники у вторинних колах, мережах освітлення та запобіжники трансформаторів напруги.

Під час знімання та встановлення під напругою запобіжників необхідно користуватись:

- в електроустановках понад 1000 В - ізолювальними кліщами (штангою) із застосуванням діелектричних рукавичок та захисних окулярів (масок);
- в електроустановках до 1000 В – ізолювальними кліщами або діелектричними рукавичками. Роботу слід виконувати із застосуванням захисних окулярів (масок).

В разі розташування запобіжників приєднання вертикально один над одним (вертикальне розташування фаз) на щитах і збірках до 1000 В та у разі відсутності комутаційних апаратів допускається встановлювати та знімати запобіжники під

навантаженням. У такому разі рекомендується використовувати замість засобів захисту очей засоби захисту обличчя (захисні маски).

Двері приміщень електроустановок, камер, щитів та збірок слід зачиняти на замок, крім тих, в яких проводяться роботи.

Ключі від електроустановок всіх класів напруг повинні перебувати на обліку у оперативних працівників. В електроустановках без місцевих оперативних працівників ключі можуть перебувати на обліку у керівників або спеціалістів. Ключі слід пронумерувати. Один комплект ключів повинен бути запасним. Запасний комплект ключів повинен бути у оперативних працівників. Ключі видаються під розписку:

- працівникам, які мають право на одноособовий огляд, - від усіх приміщень;
- в разі допуску - працівнику, який допускає (далі - допускачу), керівнику робіт, працівнику, який спостерігає за безпечним виконанням робіт (далі - наглядачу) - від приміщень, в яких треба буде працювати.

Ключі слід повертати кожного дня після завершення огляду або роботи. Під час виконання роботи в електроустановках без місцевих оперативних працівників ключі слід повертати не пізніше наступного робочого дня після огляду або повного закінчення роботи. Необхідність видавання ключів на тривалий термін працівникам підприємств-споживачів, які мають право на оперативні перемикання в РУ підприємств електромереж, а також оперативним, оперативно-виробничим працівникам, керівникам та спеціалістам свого підприємства, які мають право одноособового огляду, визначається керівництвом підприємства. Видавання та повернення ключів слід реєструвати в журналі довільної форми або в оперативному журналі.

У разі нещасних випадків для звільнення потерпілого від дії електричного струму слід негайно зняти напругу без попереднього дозволу.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;
- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;
- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які

повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [26], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та

на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат виробничого приміщення

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99. Мікроклімат приміщення характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відотною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання. Оперативно-ремонтні з обслуговування електрообладнання відносяться до категорії Пб по важкості праці [29]. Енерговитрати за цією категорією становлять – до 140-174Вт.

Допустимі норми температури, відотної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Допустимі норми параметрів повітря

Період року	Категорія робіт	Температура, °С Допустима		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Верхня межа	Нижня межа	Допустима	Допустима
Холодний	Пб	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м3 [29].

При здійсненні будівельно-монтажних робіт виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні в приміщення може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при оздоблювальних технологічних

процесах в будівництві, що знаходяться в повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні для обслуговуючого персоналу

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до ДСН [30] проектом передбачені наступні рішення [30]: застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановленні безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення; необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні; застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

4.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності [31].

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в».

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

4.2.4 Виробничий шум

Під час виконання будівельно-монтажних робіт виникає виробничий шум з такими характеристиками: за характером спектру – широкосмуговий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою постійний; за походженням – механічний і гідродинамічний. Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 3.3.6.037 [9] і наведені в таблиці 4.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого двигуни будівельних машин і механізмів виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 4.4 – Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звукового тиску, ДБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

4.2.5 Виробничі вібрації

Допустимі рівні загальної вібрації на постійних місцях у виробничих приміщеннях [33] наведені в таблиці 4.5.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних

конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація:	1,3 108	0,45 99	0,22 93	0,2 92	0,2 92	0,2 92	-	-	-	-
На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях										

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10-2, знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

4.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [34, 35]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [37].

Приміщення підстанції вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-ІІІ (місця, де

зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [38] наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зов-ніш-ні не-несу-чі	внут-рішні не-несучі (пере-город-ки				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [38] наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 4.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 4.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.8 (знаменник) [38].

Таблиця 4.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На територіях підстанцій встановлено до 16 вогнегасників ВП-5 [39].

ВИСНОВОК

У бакалаврській кваліфікаційній роботі проведено глибоке та всебічне дослідження нагальної проблеми інтеграції відновлюваних джерел енергії в локальні енергетичні системи України, що набуває особливої актуальності в умовах глобальної декарбонізації та необхідності зміцнення енергетичної стійкості країни, особливо в умовах повномасштабної війни. Аналіз показав, що Україна володіє значним потенціалом для розвитку різноманітних ВДЕ: сонячної енергетики (потужність якої перевищила 8 ГВт, з активним ростом децентралізованих СЕС), вітрової (потужність близько 1.9 ГВт з величезним невикористаним потенціалом), гідроенергетики (що відіграє важливу роль у балансуванні, незважаючи на втрати, як Каховська ГЕС), біоенергетики (з потенціалом заміщення значних обсягів газу) та геотермальної енергії (переважно для теплопостачання). Ці ресурси є ключовими для досягнення енергетичної незалежності та екологічних цілей.

Однак, головною перешкодою на шляху до їх масштабного впровадження залишається притаманна ВДЕ нестабільність та нерівномірність генерації. Ця проблема, що залежить від погодних умов та часу доби, створює суттєві виклики для підтримання балансу потужності в ЛЕС та забезпечення надійного електропостачання, що додатково ускладнюється руйнуваннями енергетичної інфраструктури внаслідок воєнних дій.

Для подолання цих викликів у роботі детально розглянуто та проаналізовано ключові технологічні рішення. Системи збереження енергії, зокрема літій-іонні батареї, вартість яких значно знизилась, гідроакумуючі станції та інші, визначені як критично важливий інструмент для згладжування коливань ВДЕ, зберігання надлишкової енергії та надання допоміжних послуг. Механізми самовідновлення, що базуються на автоматизованому виявленні, локалізації та усуненні несправностей з подальшим відновленням живлення, розглядаються як засіб кардинального підвищення надійності та життєздатності

ЛЕС, особливо при роботі в ізольованому режимі. Віртуальні електростанції (ВЕС) представлені як інноваційна ІТ-платформа, що дозволяє інтелектуально агрегувати та координувати роботу географічно розподілених ресурсів – ВДЕ, СЗЕ та гнучких споживачів, перетворюючи їх на єдиний керований об'єкт, здатний брати участь у ринках та забезпечувати стабільність. Розвиток ВЕС на базі розподіленої генерації є особливо перспективним для України для підвищення стійкості до атак.

Зважаючи на необхідність економічно обґрунтованого вибору комбінації цих технологій, центральну увагу приділено застосуванню критеріального методу для оптимізації структури засобів резервування. Було продемонстровано, що цей метод, заснований на теорії подібності, дозволяє перетворити складну багатофакторну задачу мінімізації витрат (що враховує вартість ЕХН, водневих технологій, біогазу, системного резерву та мережевих обмежень) у безрозмірну форму. Це дає змогу проводити порівняльний аналіз різнорідних за своєю природою та вартістю технологій, визначати їх оптимальні пропорції та чутливість до зміни вихідних параметрів, навіть за умов обмеженої інформації.

Важливим аспектом, розглянутим у роботі, є питання охорони праці та пожежної безпеки. Було визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори для персоналу та запропоновано технічні рішення з безпечної організації робочих місць, електробезпеки, гігієни праці (мікроклімат, освітлення, шум, вібрація) та пожежної безпеки, що є невід'ємною частиною впровадження та експлуатації ЛЕС з ВДЕ.

Отже, дана робота не лише аналізує сучасний стан та перспективи ВДЕ в Україні та світі, але й надає науково-методичний інструментарій для вибору оптимального складу засобів балансування та резервування, враховуючи при цьому ключові вимоги безпеки. Результати дослідження мають важливе практичне значення, оскільки вони спрямовані на підвищення надійності, ефективності, стійкості та безпеки локальних енергетичних систем з високою

часткою ВДЕ, що є критично важливим для побудови майбутньої, більш безпечної та сталої енергетики України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Відновлювані джерела енергії : монографія / С. О. Кудря, Н. М. Мхітарян, В. Ф. Резцов, Т. В Суржик та ін.; за ред. С. О. Кудрі. Київ : ІВЕ НАН України, 2020.
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, сталий розвиток": схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р.
3. Лежнюк П. Д. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання / П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2019. – Т. 38, № 2. – С. 100–106.
4. Малогулко Ю. В. Вплив російсько–української війни на функціонування відновлюваних джерел енергії / Ю. В. Малогулко, А. О. Гресько // Матеріали ЛІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р.
5. Malogulko Yu. The development renewable energy sources problems during the war / Malogulko Yu., Kovalchuk N., Lastivka V. // Znanstvena misel journal. №100/2023, pp. 34-37. ISSN 3453-9875.
6. Малогулко Ю. О. Дослідження генерування вітроелектроустановок з системами накопичення енергії / Ю. О. Малогулко, К. М. Повстянко, М. Затхей // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 4 (311). – С. 9–13.
7. Корчевий Р. Ю. Робота ГАЕС в енергосистемі України : магістерська кваліфікаційна робота / Р. Ю. Корчевий ; наук. кер. П. Д. Лежнюк ; Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2020. – 115 с.
8. Повстянко К.О., Лежнюк П.Д. Вплив відновлюваної енергетики на надійне забезпечення енергетичного балансу в Україні. Матеріали ЛІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р.

9. Лежнюк П.Д., Ковальчук О.А. Взаємовплив відновлюваних джерел енергії і електроенергетичних систем та підвищення їх енергоефективності. Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2022р.
10. Малогулко Ю. В. Аналіз впливу BESS на функціонування розподільних електричних мереж [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, В.Б. Ластівка // Матеріали молодіжної науково-практичної інтернет-конференції студентів аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)» : збірник матеріалів. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 180-184 с. - Електрон. текст. дані. – 2022.
11. Малогулко Ю.В. Дослідження сучасних технологій систем накопичення енергії / Малогулко Ю.В., Ластівка В.Б. // Znanstvena misel journal. №65/2022, pp. 65-68. ISSN 3124-1123.
12. Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. Дослідження використання систем накопичення електричної енергії. Матеріали LIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р.
13. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Оптимізація роботи відновлюваних джерел енергії в електроенергетичних системах / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // Матеріали VI Міжнародної студентської наукової конференції «Міждисциплінарні наукові дослідження та перспективи їх розвитку», м. Миколаїв, 14 березня 2025 р. – Миколаїв, 2025. – С. 35. – ISBN 978-617-8440-58-9.
14. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Самовідновлення електропостачання в інтелектуальній локальній електроенергетичній системі / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // VIII Міжнародна студентська наукова конференція «Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень», м. Рівне, 31 січня 2025 р. – Рівне, 2025. – С. 53. – ISBN 978-617-8440-46-6.
15. Малогулко Ю. В. Дослідження функціонування віртуальних електростанцій [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, Н. О. Пасло, В.

- Б. Ластівка // Матеріали ЛІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р
16. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії в електроенергетичних системах / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // VIII Міжнародна студентська наукова конференція «Модернізація та сучасні українські і світові наукові дослідження», м. Луцьк, 24 січня 2025 р. – Луцьк, 2025. – С. 172. – ISBN 978-617-8440-45-9.
17. Лежнюк П.Д., Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. Вибір засобів балансування режимів локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії / Лежнюк П.Д. Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2024), ВНТУ, Вінниця, 16-17 жовтня 2025 р.
18. Malogulko Yu. The power energy storage systems technology research / Yu. Malogulko, V. Lastivka // East European Scientific Journal. – 2022. – Vol. 1, No. 01 (77). – P. 22–25.
19. Лежнюк, П. Д. Відносне оцінювання вартості засобів резервування відновлюваних джерел енергії / Лежнюк П. Д., Комар В. О., Повстянко К. О. // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2023. – № 1 (71). – С. 39-45. – Бібліогр.: 12 назв.
20. Лежнюк П. Д. Балансування потужності та електроенергії в електроенергетичній системі з відновлюваними джерелами енергії критеріальним методом / П. Д. Лежнюк, О. А. Буславець, О. О. Рубаненко // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2021. – № 1 (2). – С. 62–70.
21. Electrical power and energy balance in the local electrical system by using reconciliation of the generation and consumption schedules [Text] / Petro Lezhniuk, Oleh Kozachuk, Natalia Komenda, Juliya Malogulko // Przegląd Elektrotechniczny. – 2023. – № 9. – Pp. 57-63.

22. Критеріальний метод в електроенергетиці. / Лежнюк П. Д., Комар В. О., Бевз С. В., Остра Н. В., Рубаненко О. О. // Навчальний посібник. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2012. – 214 с.
23. Petro Lezhniuk, Viacheslav Komar, Olena Rubanenko. Criterion modeling of the process redundancy of renewable energy sources power generation instability by electrochemical accumulators // Computational Problems of Electrical Engineering, 2021, Volume 11, No2, pp. 12–17.
24. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
25. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
26. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.
27. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
28. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.
29. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
30. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
31. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення.
32. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

33. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.
34. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
35. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.
36. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація.
37. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек.
38. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.
39. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників».

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії в електроенергетичних системах»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (вказати))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: д.т.н., професор кафедри ЕСС Лежнюк П. Д.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	93,7 %
Загальна схожість	6,3 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований

Системою щодо роботи

Автор

[підпис]
(підпис)

Ластівка В.Б.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

[підпис]
(підпис)

Вишневський С.Я.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

[підпис]
(підпис)

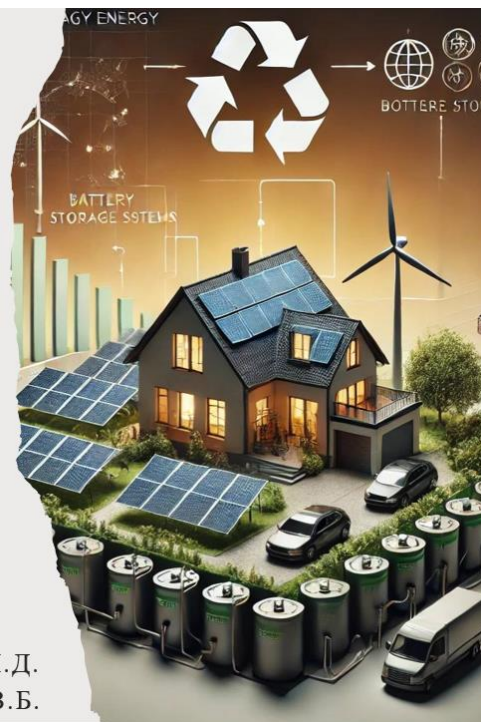
[підпис]
(прізвище, ініціали, посада)

ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Лежнюк П.Д.
Ластівка В.Б.



Актуальність дослідження

Сучасна енергетика переживає глибокі трансформації, викликані глобальними трендами та потребою України у зміцненні енергетичної стійкості в умовах війни. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) є ключовими для екологічних цілей та зменшення залежності від імпорту. Проте, їхня нестабільність створює виклики для балансування та надійного електропостачання. Тому необхідні сучасні рішення, такі як системи накопичення енергії, механізми самовідновлення та віртуальні електростанції.





Мета та завдання роботи

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування науково-методичних підходів до вибору оптимальної структури засобів балансування та резервування для підвищення надійності та економічної ефективності локальних енергетичних систем з високою часткою ВДЕ.

Завдання:

- Аналіз поточного стану та потенціалу ВДЕ в Україні.
- Дослідження технологій інтеграції ВДЕ (СНЕ, самовідновлення, ВЕС).
- Застосування критеріального методу для оптимізації засобів резервування.
- Розробка заходів з охорони праці та пожежної безпеки



Види ВДЕ та їхній стан в Україні

У роботі проаналізовано п'ять основних видів ВДЕ:

- Сонячна
- Вітрова
- Гідроенергетика
- Біоенергетика
- Геотермальна енергія

Україна має великий потенціал в усіх напрямках, але існують обмеження — від інфраструктурних до воєнних. Незважаючи на це, сектор активно відновлюється і розвивається.



Сонячна енергетика

Сонячна енергетика є лідером серед ВДЕ в Україні. Завдяки доступності сонячного ресурсу та зростанню кількості домогосподарств із власними СЕС, цей напрям демонструє сталий ріст. У 2025 році встановлена потужність перевищила 8 ГВт.

Зростає роль так званих просьюмерів — споживачів, які водночас є виробниками енергії. Застосовуються нові технології: двосторонні панелі, системи стеження за сонцем, smart-інвертори.



Вітрова енергетика

Вітрова енергетика — ще один важливий напрям. На 2025 рік — майже 1.9 ГВт потужності. Війна негативно вплинула на розвиток, але галузь зберігає потенціал. Найперспективнішими є проєкти у південних регіонах та можливості офшорної генерації.

Розвиваються нові технології — плаваючі вітротурбіни, вітрові змії, біонічні конструкції лопатей. Вітрова енергія доповнює сонячну завдяки виробництву у вечірні та нічні години.



Гідро-, біо-, геотермальна енергетика

Гідроенергетика — традиційна складова енергосистеми України. Хоча частина потужностей втрачена під час війни, продовжується модернізація об'єктів, зокрема Дністровської ГАЕС.

Біоенергетика активно розвивається: пелети, біогаз, біометан.

Геотермальна енергія має локальний потенціал у західних регіонах. Інтеграція цих джерел дозволяє створювати стабільні комбіновані системи.

Сучасні рішення для оптимізації ЛЕС з ВДЕ

Головна проблема ВДЕ — їх нестабільна генерація. Генерація залежить від часу доби, погодних умов, сезонності. Ці коливання у виробництві ускладнюють балансування енергосистеми та можуть призводити до перебоїв. Для ефективного використання ВДЕ потрібні додаткові технічні рішення — зокрема, системи накопичення та автоматичного регулювання.



У роботі розглянуто три ключові інструменти стабілізації ЛЕС:

1. Системи накопичення енергії: акумулятори, гідроакумулюючі електростанції.
2. Механізми самовідновлення, які дозволяють ЛЕС швидко перезапустити себе після аварій або збоїв.
3. Віртуальні електростанції — цифрові системи управління, які об'єднують розподілені джерела, споживачів і накопичувачі в єдину мережу.

Баланс електричної енергії:

$$P_{\text{ФЕС}}(t) + P_{\text{ВЕС}}(t) + P_{\text{мГЕС}}(t) + P_{\text{БГУ}}(t) \pm P_{\text{ЕЕС}}(t) \pm P_{\text{е}}(t) \pm P_{\text{х}}(t) - P_{\text{ен}}(t) - \Delta P(t) = 0 \quad (9.1)$$

$P_{\text{ФЕС}}(t)$ – потужність ФЕС

$P_{\text{ВЕС}}(t)$ – потужність ВЕС

$P_{\text{мГЕС}}(t)$ – потужність малих гідроелектростанцій

$P_{\text{БГУ}}(t)$ – електрична потужність когенераційних установок

$P_{\text{ЕЕС}}(t)$ – потужність ЕЕС

$P_{\text{е}}(t)$ – потужність водневих установок

$P_{\text{х}}(t)$ – потужність електрохімічних накопичувачів;

$P_{\text{ен}}(t)$ – потужність споживачів електроенергії, в тому числі «активних»

$\Delta P(t)$ – технологічні витрати в електричних мережах.



За критерій оптимальності взято сумарні витрати на резервування нестійкої генерації ВДЕ, тоді з урахуванням сучасних можливостей резервування задача мінімізації записана наступним чином:

$$B_{\text{рез}} = B_x(P_x) + B_e(P_e) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) + B_k(P_k) \rightarrow \min \quad (10.1)$$

$B_x(P_x)$ – витрати на резервування накопичувачами електрохімічного типу

$B_e(P_e)$ – витрат на водневі технології

$B_z(P_z)$ – витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву

$B_c(P_c)$ – витрати на користування системним резервом, що є фактично компенсацією за утримання резерву на енергоагрегатах ТЕС, що працюють за ціновими заявками

$B_n(P_n)$ – витрати на запаси пропускної спроможності ліній електропередачі, що необхідно для транспортування електроенергії з/до місця під'єднання резервної потужності до ЕЕС;

$B_k(P_k)$ – витрати на реалізацію координації графіків генерування і споживання електроенергії в ЕЕС

$P_x, P_e, P_z, P_c, P_n, P_k$ – відповідно оптимальні значення потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування



Критеріальний метод

Критеріальний метод – метод дослідження, який дозволяє ефективно проводити аналіз і розв’язок задач оптимальності. Математичний зміст цього методу – теорія подібності і математичне нелінійне програмування. Кінцевою метою дослідження з використанням критеріального методу є виявлення закономірностей, які за певних умов можуть бути представлені як закон.

Для вибору засобів резервування використовують математичні моделі, засновані на даному методі. Вони оцінюють ефективність різних технологій за параметрами. Моделі дозволяють порівняти різні способи резервування ВДЕ та створити рейтинг за обраним критерієм.

За допомогою критеріального методу ми можемо дати відносну оцінку для порівняння між собою окремих способів резервування ВДЕ і отримати їх рейтинг за обраним критерієм оптимальності.

Математична модель формується відповідно до можливостей методу та вимагає певних припущень. Електрохімічні накопичувачі, установки «зеленого» водню і когенераційні біогазові установки розміщують централізовано в ЛЕС. Це розміщення пов’язане з втратами електроенергії в мережах, які враховуються в моделі оптимізації.

Отже, математична модель оптимізації питомих витрат на 1 кВт резервної потужності для урівноваження генерування ВДЕ, в якій враховуються особливості режимів ЕЕС, має вигляд:

$$B_{рез} = C_1 P_x^{-1} + C_2 P_\theta + C_3 P_z + C_4 P_c^{-1} + C_5 P_k + C_6 P_x^2 P_c^2 P_\theta^{-1} P_z^{-1} P_k^{-1} \rightarrow \min \quad (12.1)$$

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – узагальнені константи, що містять вихідні дані задачі (в першу чергу це цінові показники)

G_c – максимальна потужність системного резерву, яку можна використати для урівноваження генерування ВДЕ ($g_c = 1/G_c$)

Більш детальний опис рівняння (12.1):

$$B_{рез} = C_1 P_x^{-1} + C_2 P_\theta + C_3 P_c + C_4 P_c^{-1} + C_5 P_K + C_6 P_x^2 P_c^2 P_\theta^{-1} P_c^{-1} P_K^{-1} \rightarrow \min$$

У ньому не враховані деякі складові резервування в задачі мінімізації, зокрема витрати на збільшення пропускної здатності ліній електропередачі, яка на початковому етапі вважається достатньою.

Перша складова враховує питомі витрати на електрохімічні накопичувачі, які зменшуються, що призводить до збільшення їх обсягу і потужності в ЕЕС.

Друга складова стосується витрат на систему отримання і використання водню як накопичувача енергії; оскільки частина водню використовується в інших сферах, витрати на відтворення електроенергії в балансуєчій групі будуть обернено пропорційні до P_v .

Витрати на використання біогазу для резервування мають лінійну залежність: з доступністю системного резерву і зменшенням його вартості P_c буде зростати. Останній член цільової функції відображає витрати на покриття втрат електроенергії в елементах мережі, пов'язані із засобами резервування.

Для аналізу оптимального складу способів і засобів резервування ВДЕ на співрозмірність і чутливість представлено (12.1) в критеріальній формі. За базові значення прийнято параметри оптимального варіанту. Тоді в критеріальній формі вираз витрат (8.1):

$$B_{рез*} = \pi_{1o} P_x^{-1} + \pi_{2o} P_\theta + \pi_{3o} P_c + \pi_{4o} P_c^{-1} + \pi_{5o} P_K + \pi_{6o} P_x^2 P_c^2 P_\theta^{-1} P_c^{-1} P_K^{-1} \quad (14.1)$$

$$\begin{aligned} B_{рез*} &= B_{рез} / B_{рез \min} & P_\theta^* &= P_\theta / P_{\theta o} & P_c^* &= P_c / P_{co} \\ P_x^* &= P_x / P_{xo} & P_c^* &= P_c / P_{co} & P_K^* &= P_K / P_{Ko} \end{aligned}$$

P_x, P_θ, P_c, P_K – відповідно поточні та оптимальні значення потужності способів резервування

$\pi_{io} = C_i / B_{рез \min}$ – оптимальні значення критеріїв подібності.

Для оптимізації та аналізу способів і засобів резервування генерування ВДЕ і визначення π_{io} використано методи теорії подібності, зокрема критеріального методу, то відповідно система ортогональних і нормованих (ортономованих) рівнянь має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\pi_1 + 2\pi_6 = 0; \\ \pi_2 - 2\pi_6 = 0; \\ \pi_3 - \pi_6 = 0; \\ -\pi_4 + 2\pi_6 + \pi_7 = 0; \\ \pi_5 - \pi_6 = 0; \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 = 1; \end{array} \right. \Rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \\ \pi_6 \\ \pi_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14.2)$$



Застосування критеріального методу в ЛЕС

Критеріальний метод є особливо цінним інструментом при проектуванні, аналізі та оптимізації функціонування локальних енергетичних систем (ЛЕС). Застосування цього методу дозволяє оцінити та порівняти ефективність різних доступних засобів резервування та балансування, включаючи місцеві СНЕ, можливості активного керування попитом та взаємодію з магістральною енергосистемою.

Він допомагає визначити оптимальну структуру резервних потужностей в ЛЕС та обґрунтувати доцільність інвестицій у ті чи інші технології балансування з урахуванням специфіки кожної конкретної системи. Це забезпечує надійну та економічно ефективну роботу ЛЕС з високою часткою ВДЕ.



Охорона праці

Для запобігання електротравмам застосовуються технічні заходи підготовки робочого місця та електрозахисні засоби. Норми мікроклімату, складу повітря, освітлення, шуму та вібрації регламентуються відповідними ДСН.

Пожежна безпека визначається категорією приміщень, ступенем вогнестійкості будівель, протипожежними перешкодами та відстанями. Дотримання цих норм є невід'ємною частиною безпечної експлуатації енергетичних об'єктів.

Забезпечення охорони праці та пожежної безпеки є ключовим при експлуатації силового обладнання ВДЕ. Оперативно-ремонтний персонал піддається впливу фізичних (мікроклімат, шум, вібрація, освітлення), хімічних (пил) та трудових факторів.

Висновок

Україна має значний потенціал для розвитку відновлюваних джерел енергії, проте стикається з проблемою нестабільності генерації. Системи накопичення енергії, механізми самовідновлення та віртуальні електростанції є ключовими технологічними рішеннями для подолання цих викликів. Застосування критеріального методу виявилось ефективним інструментом для оптимізації засобів резервування, дозволяючи економічно обґрунтовано вибирати оптимальну структуру. Практичне значення роботи полягає у підвищенні надійності, ефективності, стійкості та безпеки локальних енергетичних систем з високою часткою ВДЕ в Україні, що є критично важливим для її енергетичної безпеки та сталого розвитку