

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ
ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З АКУМУЛЮЮЧИМИ
ПРИСТРОЯМИ**

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми
навчання освітнього ступеня «Магістр»,
освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

_____ **Богдан НИКУЛЯК**

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ **Юрій ПАНЦИР**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«__» _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми

«Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

м. Кам'янець-Подільський, 2025р.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АВТОНОМНІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ОБ’ЄКТІВ	9
1.1 Особливості електроживлення аграрних споживачів	9
1.2 Застосування сонячної та вітрової енергії в локальних енергетичних системах.....	19
1.3 Акумуляторні резерви енергії в автономних електричних комплексах.....	30
Висновки до 1 розділу	32
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	34
2.1 Порівняльна характеристика параметрів технологій накопичення енергії	34
2.2 Електрохімічні системи зберігання енергії та їх експлуатаційні властивості ..	37
2.3 Структурна модель автономної вітроенергетичної системи	48
Висновки до 2 розділу	52
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ В СТРУКТУРІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ	55
3.1 Математичне моделювання функціональних складових системи електропостачання	55
3.2 Методика визначення вітроенергетичного потенціалу для конкретного об’єкта.....	62
3.3 Розрахунок споживання електроенергії та вибір електричного обладнання для сільськогосподарського об’єкту.....	69
Висновки до 3 розділу	72
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ГІДРОАКУМУЛЮВАННЯ	74
4.1 Вибір оптимальних параметрів комбінованої енергосистеми з ВДЕ.....	74
4.2 Моделювання та розрахунок економічних показників індивідуальних енергетичних проектів	76

	4
4.3 Техніко-економічне обґрунтування систем акумулювання енергії	87
Висновки до 4 розділу	93
РОЗДІЛ 5. ОБґРУНТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З НАКОПИЧУВАЧАМИ	94
Висновки до 5 розділу	104
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	104
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота виконана на тему «Розробка та дослідження системи електропостачання на базі вітроелектростанції з акумулюючими пристроями». Робота містить 111 сторінок основного тексту, рисунки, таблиці, бібліографічні джерела за переліком посилань та додатки.

Актуальність теми зумовлена зростаючою потребою у впровадженні сучасних технологій та інтегрованих технічних рішень для забезпечення електропостачання автономних об'єктів. Особливого значення набуває проєктування комбінованих автономних систем, здатних не лише генерувати, а й ефективно акумулювати надлишкову електроенергію. У цьому контексті важливою є оцінка та застосування найбільш конкурентоспроможних для сучасних умов господарювання в Україні технологій акумулювання енергії, які забезпечують підвищення надійності та автономності енергосистем.

Метою роботи є обґрунтування вибору оптимальних за сукупністю технічних та економічних показників конструктивних рішень комбінованої автономної системи електропостачання для конкретного господарського об'єкта. Така система повинна забезпечувати ефективну організацію процесів перетворення, накопичення та раціонального використання електроенергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

– Обґрунтувати доцільність створення та відібрати конкурентні варіанти конструктивної реалізації системи електропостачання автономного об'єкта на основі вітроенергетичної установки, визначивши вітровий потенціал регіону за допомогою статистичних даних щодо швидкості вітру.

– Провести розрахункове дослідження техніко-економічних характеристик різних систем акумулювання енергії, зокрема електрохімічних акумуляторних батарей і засобів гідравлічного акумулювання.

– На основі отриманих техніко-економічних результатів обґрунтувати переваги застосування системи енергозабезпечення з гідравлічним акумулюванням для автономного сільськогосподарського об'єкта.

Об'єктом дослідження є комбінована система автономного електропостачання сільськогосподарського об'єкта, що функціонує на базі

вітроелектричної установки та обладнана засобами акумулювання виробленої енергії.

Предмет дослідження охоплює технологічні особливості конструктивних і технічних рішень систем децентралізованого енергопостачання, що використовують енергію вітру та механізми її акумулювання. Також досліджуються порівняльні техніко-економічні показники, характерні для умов ринкового енергозабезпечення сільськогосподарських споживачів.

Наукові результати кваліфікаційної роботи отримано із застосуванням методів статистичного і техніко-економічного аналізу, а також інструментів економіко-математичного моделювання.

Новизна роботи полягає в обґрунтуванні технічної здійсненності та ефективності впровадження інноваційних автономних систем електропостачання, що передбачають використання конкурентоздатних і екологічно безпечних технологій акумулювання енергії. Такі рішення потребують порівняно невеликих фінансових витрат на підтримання функціонування протягом усього життєвого циклу та дають змогу уникнути значних експлуатаційних витрат, пов'язаних із необхідністю утилізації традиційних електрохімічних акумуляторів із обмеженим ресурсом циклів перезаряду.

Ключові слова: ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, АВТОНОМНЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ, ГІДРАВЛІЧНИЙ АКУМУЛЯТОР, ВІТРОВИЙ ПОТЕНЦІАЛ, СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, SMART GRID, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ВІТРОТУРБИНА, ІНВЕРТОР, КОНТРОЛЕР ЗАРЯДУ, ГІБРИДНА СИСТЕМА, ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНА АВТОНОМНІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМИ.

ВСТУП

В сільському господарстві, на тлі зростання рівня індустріалізації виробництва сільськогосподарської продукції, спостерігається стрімке підвищення втрат, спричинених перебоями електропостачання та погіршенням показників якості електроенергії. Подібні порушення дедалі істотніше впливають на технологічні процеси, що зумовлює необхідність пошуку нових технічних рішень і методів, спрямованих на підвищення надійності та стабільності електроживлення в умовах сучасного аграрного виробництва. Одним із ключових напрямів модернізації електропостачання сільськогосподарських підприємств є впровадження систем безперервного електроживлення, основу яких становлять автономні енергетичні комплекси, побудовані із застосуванням як традиційних, так і відновлюваних джерел енергії.

На даний час функціонує значна кількість малих господарств, що формально підключені до централізованих електричних мереж, проте фактично стикаються з численними проблемами, пов'язаними з недотриманням норм якості електроенергії. Аварійні відключення, коливання напруги та інші енергетичні збурення часто спричиняють порушення технологічних процесів, зокрема у тваринництві, що негативно позначається на продуктивності аграрних підприємств. За таких умов завдання створення стабільних систем автономного електропостачання для малих і віддалених господарств, а також для тих, що мають хронічні проблеми із централізованим живленням, набуває особливої актуальності.

Протягом останніх років значного поширення набули інженерні рішення автономних енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії, які доповнюються резервними джерелами та акумуляторними станціями. Популярність таких систем зумовлена їх екологічними перевагами порівняно з енергетикою, що використовує викопне паливо. Однак електрохімічні акумуляторні батареї, які є основою більшості подібних систем, мають суттєвий недолік – обмежений ресурс циклів заряд–розряд, що призводить до необхідності їх регулярної заміни. Це, своєю чергою, збільшує не лише експлуатаційні витрати, а й навантаження на систему утилізації відпрацьованих акумуляторів.

Підвищення ефективності систем акумулювання енергії є одним із ключових завдань розвитку сучасних автономних енергетичних комплексів. У зв'язку з цим активно ведуться розробки альтернативних, перспективних акумуляторних рішень, що характеризуються нижчими витратами на забезпечення накопичення енергії та зменшеним екологічним впливом порівняно з традиційними електрохімічними системами. Питання створення резервних енергетичних комплексів на основі технологій відновлюваної енергетики з використанням різних форм накопичувачів є предметом численних досліджень як вітчизняних, так і зарубіжних учених.

Емпіричну основу кваліфікаційної роботи становлять методичні матеріали, довідкові джерела та статистичні дані. Наукові результати отримано із застосуванням статистичного та техніко-економічного аналізу, а також методів економіко-математичного моделювання.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні технічної здійсненності застосування інноваційних автономних систем електропостачання, у яких використовуються конкурентоспроможні та екологічно безпечні технології акумулювання енергії. Такі системи потребують помірних витрат на підтримання працездатності протягом усього життєвого циклу та дають змогу мінімізувати додаткові витрати, пов'язані з утилізацією традиційних електрохімічних акумуляторів з обмеженим ресурсом циклів. Варіантні техніко-економічні розрахунки виконані з використанням економіко-математичної моделі життєвого циклу.

Публікації: Богдан НИКУЛЯК / Підвищення ефективності систем електропостачання на основі вітроенергетичних установок з акумулюючими пристроями // V Всеукраїнська студентська науково-практична конференція «Ефективне використання енергії: стан і перспективи» (12 листопада 2025 року) / Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Кам'янець – Подільський. 2025.

РОЗДІЛ 1. АВТОНОМНІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Особливості електроживлення аграрних споживачів

Сільськогосподарське виробництво характеризується низкою специфічних особливостей, що визначають як умови постачання, так і режими споживання електричної енергії. В українських реаліях ці особливості формуються під впливом комплексу факторів, серед яких можна виокремити специфічні природно-кліматичні умови, низьку щільність електричних навантажень та значну розосередженість споживачів, переважання малих питомих навантажень із яскраво вираженою сезонністю, а також тісний взаємозв'язок технічних засобів із біологічними об'єктами виробництва. Важливою передумовою сучасного стану електропостачання є також історичні особливості розвитку енергетичної інфраструктури сільського господарства.

До 1953 року більша частина електроенергії надходила до сільського господарства від автономних локальних електростанцій. За таких умов широко застосовувалися електростанції, що працювали на паливі, малі гідроелектростанції, а також вітроенергетичні установки різного призначення.

Підключення аграрних споживачів до централізованих енергосистем стало імпульсом для інтенсивного розвитку систем електропостачання в країні. У подальші десятиліття, на тлі стрімкого зростання споживання електроенергії в агропромисловому секторі, невпинно збільшувалася частка електроенергії, отриманої від зовнішніх джерел. Так, якщо у 1953 році частка централізованого електропостачання становила лише 33 %, то у 1965 році вона досягла 69 %, а вже у 1983 році перевищувала 99 % [2]. Таким чином, у 1980-х роках роль автономних джерел живлення у структурі електропостачання сільських споживачів стала незначною.

Паралельно у світі активно розвивалися комп'ютерні засоби зв'язку, системи автоматизованого керування технологічними процесами та інформаційно-телекомунікаційні технології, які поступово впроваджувалися й у сільському господарстві. Такі споживачі належать до першої категорії за

надійністю і потребують стабільного й безперебійного електроживлення. В умовах зростання індустріалізації аграрного виробництва втрати, спричинені перервами електропостачання або погіршенням якості електроенергії, суттєво збільшуються. Аварії електричних мереж, коливання якості електроенергії та порушення технологічних режимів утримання тварин негативно впливають на продуктивність сільськогосподарських підприємств.

Отже, сучасні тенденції економічного розвитку галузі обумовлюють необхідність пошуку нових технічних рішень, спрямованих на підвищення надійності та якості електропостачання. Значний потенціал у цьому напрямку мають системи безперебійного електроживлення, основою яких є системи автономного електропостачання (САЕП). Подібні системи можуть базуватися не лише на традиційних технологіях виробництва електроенергії, але й активно інтегрувати сучасні методи з використанням відновлюваних джерел енергії (ТВЕ).

Крім того, значна кількість малих фермерських і приватних господарств, хоча й підключені до централізованих електромереж, регулярно стикаються з порушеннями вимог до якості електроенергії з боку постачальників [3]. Найпоширенішими проблемами є відхилення та коливання напруги, її провали, несиметрія або спотворення форми напруги, тимчасові перенапруги, відхилення частоти, аварійні стани мереж і часті тривалі перерви живлення. Сукупність цих чинників змушує керівників господарств розглядати можливість переходу на автономні системи електропостачання.

Отже, питання створення ефективних систем автономного електроживлення для малих сільськогосподарських підприємств, що знаходяться на значній відстані від централізованих електромереж або мають системні проблеми з якістю живлення, є надзвичайно актуальним. На сьогодні запропоновано широкий спектр технічних рішень та практичних варіантів побудови таких систем. Найбільш поширені різновиди САЕП для аграрних споживачів можуть бути класифіковані за схемою, наведеною на рисунку 1.1.

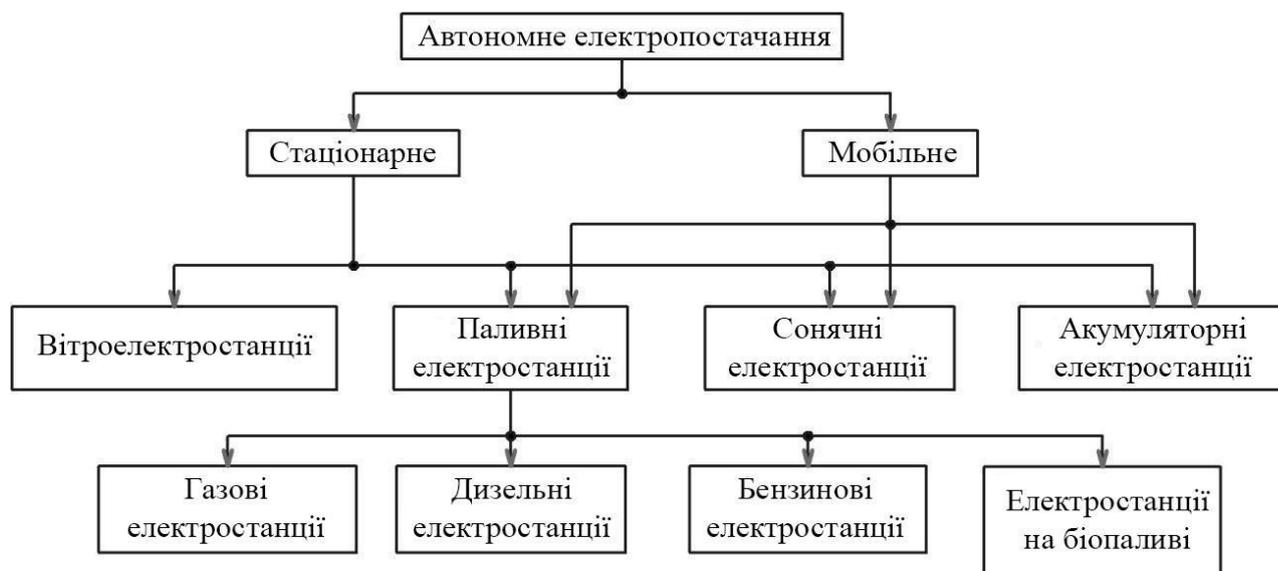


Рисунок 1.1 – Класифікація та типологія систем автономного електропостачання для потреб сільськогосподарських споживачів

Комбіноване використання різних варіантів електропостачання, представлених на рисунку 1.1, є поширеним підходом до підвищення надійності й гнучкості енергетичних систем для сільськогосподарських споживачів. У подібних гібридних структурах один із видів джерел зазвичай виконує роль основного, тоді як інший застосовується як резервний або дублюючий елемент. Найбільш поширеними прикладами таких систем є комбінації вітроелектричних установок (ВЕУ) та сонячних фотоелектричних установок (СФЕУ) з дизельними електрогенераторами, а також варіанти ВЕУ і СФЕУ, доповнені акумуляторними енергонакопичувачами.

Останніми роками суттєвого поширення набули компоновочні схеми систем автономного електропостачання (САЕП), у яких дублювальним джерелом є акумуляторні електростанції. Така тенденція значною мірою зумовлена екологічними перевагами подібних технологій порівняно з генераторами, що працюють на вуглеводневому паливі. Акумуляторні системи не супроводжуються шкідливими викидами, працюють безшумно та дозволяють зменшити експлуатаційні витрати, що є важливими критеріями для сучасних аграрних господарств.

Потреба в дублюванні основного джерела енергії пояснюється високими

вимогами до надійності електроживлення сільськогосподарських об'єктів. Перерви в подачі електроенергії здатні спричинити значні матеріальні втрати, особливо у процесах, де безперервність технологічного циклу є критично важливою (зокрема, у тваринництві, системах підтримання мікроклімату, зберіганні продукції тощо). Саме тому резервування основних джерел генерації є необхідною умовою забезпечення стабільного функціонування таких систем.

Разом із тим, ВЕУ та СФЕУ мають характерні недоліки, пов'язані з волатильністю процесу виробництва електроенергії, що обумовлено стохастичною природою їх первинних енергетичних ресурсів – сонячної радіації та вітрової активності. Для вітроелектричних установок ключовим є те, що параметри вітрового потоку належать до наймінливіших метеорологічних величин: швидкість та напрямок вітру можуть істотно змінюватися протягом коротких часових інтервалів. Сонячні електростанції, у свою чергу, здатні виробляти електроенергію лише у світлий період доби, а їхня потужність залежить від погодних умов, зокрема хмарності та інтенсивності сонячного випромінювання.

Таким чином, для забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання системи, що базуються на технологіях відновлюваної енергетики, потребують резервування, яке компенсує нестабільність процесу генерування та дозволяє гарантувати безперервність електроживлення споживачів у будь-яких умовах.

Автономні енергетичні комплекси на базі двигунів внутрішнього згорання та біоенергетичних технологій

Найпоширенішими джерелами автономного електропостачання в сучасних енергетичних системах залишаються електростанції, що працюють на вуглеводневому паливі та покладаються на двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) як основний приводний елемент. Ключовим критерієм для класифікації таких електростанцій є тип палива, що використовується, а тому виділяють газові, бензинові та дизельні електростанції. Кожен із зазначених типів має специфічні технічні, експлуатаційні й економічні характеристики, що повинні враховуватися

під час вибору базової енергетичної установки для проектування автономних систем електроживлення.

Газові електростанції. Газові генераторні установки функціонують на стиснутому газі, який у більшості випадків є економічно вигіднішим порівняно з бензином та дизельним паливом. Принцип їх роботи полягає у подачі газу до камери згоряння двигуна, де внаслідок його згоряння утворюються газоподібні продукти з високим тиском, що переміщують поршні ДВЗ та приводять у дію колінчастий вал. Отримана механічна енергія через відповідні трансмісійні компоненти – варіатори або муфти зчеплення – передається на електрогенератор електромашинного типу. Подібні установки здатні виробляти не лише електричну, а й теплову енергію, а окремі моделі тригенераторів, крім цього, забезпечують виробництво холоду. Газові електростанції можуть бути розраховані як на тривалий безперервний режим роботи, так і на аварійне чи періодичне електропостачання. Як паливо в газових ДВЗ застосовують природний газ, пропан, пропан-бутанові суміші та інші газові композиції. Окрему групу становлять газотурбінні установки, у яких механічна робота на валу виникає внаслідок використання енергії стислого та нагрітого газу, що дозволяє відмовитися від механічних коробок передач.

Переваги газових електростанцій включають високу зносостійкість, що зумовлена утворенням легких продуктів згоряння, які не спричиняють інтенсивного абразивного впливу на поверхні циліндропоршневої групи. Крім цього, газові установки характеризуються підвищеним коефіцієнтом корисної дії, нижчою вартістю палива, високими екологічними показниками та здатністю працювати тривалий час без дозаправки. Водночас складність монтажу, необхідність спеціалізованого транспорту для доставки газу, вимога до висококваліфікованого персоналу та значні бюрократичні процедури при підключенні до газових мереж належать до основних недоліків.

Дизельні електростанції. Дизельна електростанція (ДЕС) – це стаціонарна або мобільна установка, в основі якої лежить дизель-генератор, закріплений на міцній рамі та з'єднаний з електрогенератором через коробку передач, муфту зчеплення або багатоступінчасту ремінну передачу. Основними перевагами

автономних дизельних електростанцій є висока продуктивність, можливість тривалої безперервної експлуатації, економічна витрата палива завдяки його високій енергетичній щільності, довговічність, простота технічного обслуговування, надійність і відносно високий ККД. Значною перевагою є також низька вибухонебезпечність дизельного палива. Недоліки дизельних систем включають високий рівень шуму, складнощі запуску при низьких температурах та низький ККД на холостому ході, де мінімальне допустиме навантаження повинне становити не менше 40% від номінального.

Бензинові електростанції. Принцип роботи бензинових установок загалом аналогічний дизельним: ДВЗ та електрогенератор монтуються на одній рамі та функціонують як єдиний агрегат. Зазвичай такі установки оснащуються одно- або двоциліндровими чотиритактними двигунами з верхнім розташуванням клапанів. Хоча бензинові ДВЗ мають меншу економічність і моторесурс порівняно з дизельними, їх основною перевагою є нижча вартість, що робить їх поширеним рішенням для малих автономних систем. Серед переваг бензинових електростанцій варто виокремити компактність, невелику масу, простоту експлуатації, легке регулювання напруги та низький рівень шуму. Проте ці установки мають низку істотних недоліків: низький ККД (20–30%), невисокий крутний момент двигуна, утворення шкідливих випарів, обмежену придатність до тривалих навантажень, дороговартісне технічне обслуговування, значний екологічний вплив та обмеження щодо виробництва трифазної напруги.

Усі види паливних електростанцій мають спільні недоліки: потребу в кваліфікованому персоналі для обслуговування, негативний вплив на довкілля та залежність від ресурсів, запаси яких є невичерпними й з часом скорочуються.

Біопаливо розглядається як альтернативний та більш екологічно прийнятний енергетичний ресурс. Воно виробляється з органічної сировини рослинного або тваринного походження, а також із промислових або біологічних відходів. Виділяють тверде біопаливо (деревина, гранули, брикети, солома), рідке (біодизель, етанол, біомазут) та газоподібне (біогаз, синтез-газ, водень). Біомаса може використовуватися безпосередньо шляхом спалювання або залучатися до процесів перероблення для отримання більш енергоємних паливних продуктів.



Рисунок 1.2 – Методи та технології генерації електричної та теплової енергії з біомаси

Україна має значний енергетичний потенціал біомаси, який, за оцінками 2023 року, перевищує 27 млн т у.п./рік. Водночас у сучасних умовах для енергетичних цілей використовується лише близько 10% від цього обсягу, тобто приблизно 2,7 млн т у.п./рік. Основна частка застосовуваної біомаси припадає на деревні ресурси – дрова, тріску, паливні гранули та брикети, які сумарно становлять приблизно 86% річного обсягу споживання. Ще одним важливим видом біопалива, що активно використовується, є лушпиння соняшника, частка якого сягає близько 8% [4]. Ці дані свідчать про те, що внутрішній енергетичний потенціал біомаси в Україні все ще реалізується недостатньо, що відкриває перспективи його подальшого розвитку у контексті переходу до відновлюваної енергетики.

Переваги електростанцій, що працюють на біопаливі, є багатогранними та охоплюють економічні, екологічні та соціальні аспекти. Насамперед, залучення місцевих біоресурсів у процес енергогенерації сприяє зміцненню регіональної економіки, стимулює розвиток сільського господарства та створює додаткові робочі місця. Оскільки біомаса належить до відновлюваних джерел енергії, її використання усуває ризики виснаження запасів традиційних паливних ресурсів і, відповідно, мінімізує ймовірність різких стрибків цін на енергоносії. Важливою перевагою є й екологічна безпечність: порівняно з іншими видами твердого

палива, біомаса характеризується зниженими викидами шкідливих речовин та парникових газів. Крім того, у перерахунку на одиницю виробленої енергії біопаливо зазвичай є дешевшим, що робить його економічно вигідною альтернативою традиційним енергоресурсам.

Разом з тим виробництво та використання енергії з біопалива супроводжується певними обмеженнями, які необхідно враховувати при проектуванні відповідних енергетичних систем. Зокрема, вирощування енергетичних культур або отримання значних обсягів біомаси потребує великих сільськогосподарських площ, що може створювати конкуренцію за землю з продовольчими культурами. Етапи компостування або тривале зберігання органічної сировини можуть супроводжуватися виділенням неприємних запахів, що створює санітарно-екологічні труднощі. Біогазові установки, попри свою ефективність, вимагають висококваліфікованого персоналу для експлуатації та технічного обслуговування, що підвищує експлуатаційні витрати. Окремою проблемою є складність зберігання і транспортування біогазу, зумовлена його фізико-хімічними властивостями, необхідністю використання герметичних газгольдерів та спеціалізованого обладнання.

Таким чином, хоча біопаливо є перспективним та екологічно безпечним джерелом енергії, його використання вимагає комплексного підходу, що враховує не лише енергетичну ефективність, а й технологічні, аграрні та екологічні чинники.

Когенераційні системи на паливних елементах для автономного енергозабезпечення

У традиційних паливних електростанціях, що працюють на базі двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), відбувається багатоступеневе перетворення енергії. Спочатку хімічна енергія вуглеводневого палива трансформується у теплову енергію процесу горіння, потім – у механічну енергію обертання колінчастого вала, і лише після цього – в електричну енергію за допомогою електромеханічного генератора. Сукупні втрати на кожному з етапів призводять до того, що загальний коефіцієнт корисної дії подібних систем зазвичай не

перевищує 35%. Застосування систем утилізації теплової енергії дозволяє підвищити загальний рівень використання енергії палива до 90–95%, проте такі рішення потребують наявності у споживача відповідного теплового навантаження та розвиненої інфраструктури тепlopостачання, що обмежує їх використання у низці випадків.

На відміну від ДВЗ, які працюють на газі, вугіллі чи мазуті та здійснюють саме процес спалювання, паливні елементи (ПЕ) реалізують принципово інший спосіб отримання енергії. Вони не спалюють вуглеводневе паливо, а здійснюють електрохімічну реакцію, у ході якої хімічна енергія безпосередньо перетворюється на електричну та теплову. Такий підхід усуває необхідність у гучних високонапірних роторах, вихлопних системах та компонентах, що створюють вібрації. Робота паливних елементів відбувається майже безшумно, що значно підвищує комфортність їх експлуатації та розширює можливості застосування.

Висока енергоефективність є однією з ключових переваг паливних елементів. Вони практично не продукують парникових газів – викиди вуглекислого газу, метану чи оксиду азоту є мінімальними або повністю відсутніми. Єдиним побічним продуктом, що утворюється під час роботи паливних елементів, є водяна пара, а за умови використання чистого водню як палива викиди CO_2 взагалі не утворюються [5]. Це робить паливні елементи одними з найбільш екологічно безпечних джерел енергії серед сучасних технологій.

З огляду на сукупність технічних та екологічних переваг, паливні елементи розглядаються як один із найбільш перспективних напрямів розвитку автономних систем електропостачання. Паливний елемент являє собою пристрій, у якому хімічна енергія палива перетворюється безпосередньо на електричну енергію без проміжного етапу спалювання, що значно підвищує загальну ефективність процесу [6].

Основні типи паливних елементів та їхні ключові характеристики наведено у таблиці 1.1 [7], що дозволяє класифікувати їх за робочою температурою, типом електроліту, видом палива та сферами застосування.

Таблиця 1.1 – Основні типи паливних елементів

Параметри	Типи паливних елементів				
	ТППЕ	ЛПЕ	ФКПЕ	КРПЕ	ТОПЕ
Матеріал: <i>анода</i>	Pt/C, Pt-Ru/C	Pt/C, Pt-Co/C, Pt-Pd/C	Pt/C, Pt-Ru/C	Ni-Al, Ni-Cr	Ni, NiO
<i>катода</i>	Pt/C	Ni (Pt)	Pt/C, Pt-WO ₃ /C	NiO, LiFeO ₂	LaSrMnO ₃
<i>електроліту</i>	Полімерна мембрана	КОН/NaOH на носію	H ₃ PO ₄ на носію	LiKCO ₃ , LiNaCO ₃ на носію	ZrO ₂ , CeO ₂ , Y ₂ O ₃
Діапазон оптимальних потужностей	0,01÷100кВт	~ 100кВт	~ 100кВт	≥ 1 МВт	≥ 1 МВт
Ресурс, год	до 2·10 ⁴	до 1·10 ⁴	до 5·10 ⁴	до 2·10 ⁴	до 6·10 ⁴

ТППЕ – твердополімерні ПЕ, ЛПЕ – лужні ПЕ, ФКПЕ – фосфорнокислотні ПЕ, КРПЕ – карбонатно-розчинні ПЕ, ТОПЕ – твердооксидні ПЕ.

Переваги електростанцій, що працюють на паливних елементах, полягають у низці технічних, експлуатаційних та екологічних особливостей, які вигідно відрізняють їх від традиційних генераторних установок. Передусім паливні елементи характеризуються підвищеною довговічністю та мінімальною потребою у технічному обслуговуванні, оскільки їх робота не передбачає наявності рухомих механічних частин, що піддаються зносу. Завдяки цьому значно зменшуються експлуатаційні витрати протягом життєвого циклу обладнання. Крім цього, паливні елементи демонструють вищу ефективність під час забезпечення електроенергією малопотужних споживачів у порівнянні зі звичайними генераторами, що робить їх придатними для роботи в автономних або віддалених системах електропостачання.

Застосування водню як основного палива є ще однією суттєвою перевагою, оскільки цей елемент є нетоксичним і за умови дотримання вимог безпеки забезпечує мінімальні викиди у довкілля. Водневі паливні елементи продукують лише незначну кількість забруднювальних газів, а при використанні традиційних вуглеводневих газів, таких як метан чи пропан, рівень екологічного впливу все

одно залишається істотно нижчим порівняно з генераторами на двигунах внутрішнього згоряння. До додаткових переваг належить можливість використання існуючої газотранспортної інфраструктури для подачі метану до електростанцій з паливними елементами, а також перспективність застосування палива місцевого виробництва, зокрема біогазу чи синтез-газу, що сприяє енергетичній автономності регіонів.

Водночас експлуатація електростанцій на паливних елементах супроводжується певними технологічними та організаційними труднощами. У низці регіонів виникають проблеми з технічним обслуговуванням через обмежену доступність спеціалізованих запчастин або недостатню кількість підготовлених фахівців. Однією з ключових перешкод для широкого впровадження водневих установок є складність логістики та зберігання водню, що потребує спеціальних систем і значних витрат. Крім того, водень має відносно низьку енергоємність порівняно з іншими видами палива, а також є високогорючою та вибухонебезпечною речовиною, що підвищує вимоги до безпеки при його експлуатації.

Суттєвим економічним недоліком є висока вартість отримання водню з природних сполук, що зумовлює значні експлуатаційні витрати. Найбільш ефективним напрямом використання паливних елементів на сьогодні є впровадження когенераційних установок, що забезпечують одночасне вироблення електричної та теплової енергії. У випадку застосування паливних елементів виключно для вироблення електроенергії їхній коефіцієнт корисної дії істотно знижується [8]. На сучасному етапі розвитку енергетичного господарства технології виробництва електричної та теплової енергії з використанням паливних елементів залишаються недостатньо розвинутими в Україні, що також обмежує їх широкомасштабне застосування [9].

1.2 Застосування сонячної та вітрової енергії в локальних енергетичних системах

Сонячні електростанції (СЕС) поділяються на два основних типи: теплові та фотоелектричні. Кожен з цих типів має свої принципи роботи, конструктивні

особливості та сфери застосування.

У геліотермоенергетиці використовуються термодинамічні перетворювачі, у яких сонячна енергія спершу трансформується в тепло, яке надалі перетворюється в механічну енергію і, зрештою, у електричну. Процес перетворення включає кілька етапів: концентратор сонячного випромінювання фокусує його на приймачі, що поглинає світло та передає тепло робочій рідині; нагріта рідина рухається до системи перетворення енергії, де за допомогою теплових машин (турбін) виробляється електрична енергія. Термодинамічні СЕС можуть застосовуватися як для вироблення електроенергії, так і для теплопостачання об'єктів, що робить їх універсальним джерелом енергії.

Фотоелектроенергетика забезпечує пряме перетворення сонячної енергії в електричну за допомогою фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), які також називають сонячними модулями або батареями. ФЕП зазвичай комплектуються в модулі потужністю до кількох сотень ват, які можна об'єднувати в більші батареї для отримання необхідної потужності. Такі системи застосовуються як в автономних електропостачальних системах для окремих споживачів, так і у вигляді елементів мережевих сонячних електростанцій. Найбільше поширення отримали ФЕП на основі кремнію, що поділяються на монокристалічні, полікристалічні та аморфні залежно від структури матеріалу.

Типова фотоелектрична станція складається з кількох основних компонентів. Фотоелектричні перетворювачі здійснюють перетворення сонячного випромінювання у постійний електричний струм. Контролер циклу заряд-розряд акумуляторної батареї забезпечує захист батарей від глибокого розряду, регулює заряд ФЕП і стежить за точкою максимальної потужності. Акумуляторна батарея накопичує електричну енергію і забезпечує живлення споживачів у моменти, коли виробництво електроенергії ФЕП зменшується або припиняється. Інвертор перетворює постійний струм в змінний, що дозволяє підключати споживачів до стандартних електромереж або жити побутові прилади.

Таким чином, фотоелектричні СЕС забезпечують надійне та екологічне вироблення електроенергії, а їх модульна конструкція дозволяє масштабувати потужність системи відповідно до потреб споживачів.

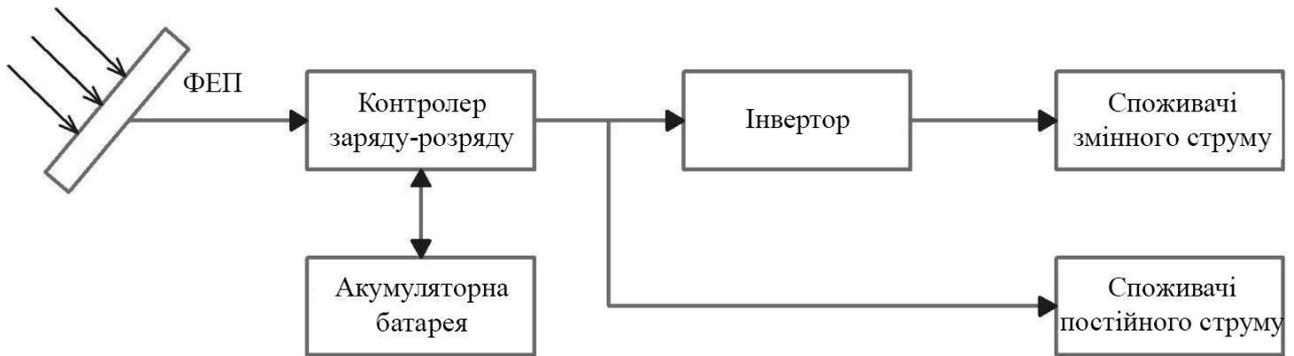


Рисунок 1.3 – Структурна організація автономної сонячної електростанції з резервним акумуляторним блоком для живлення споживачів постійного та змінного струму

Схема включає як джерело енергії (сонячні панелі), так і систему накопичення енергії (акумулятори) для забезпечення безперервного живлення різних типів споживачів, а також дозволяє наочно уявити взаємозв'язок між компонентами системи.

Потенціал використання сонячної енергії на території України є достатньо високим для впровадження як теплоенергетичних, так і фотоелектричних систем. Середньорічна кількість сумарної сонячної енергії на один квадратний кілометр території країни коливається від приблизно 1070 кВт·год у північних областях до понад 1400 кВт·год у південних регіонах, що робить південь України особливо перспективним для розвитку сонячної енергетики.

Серед ключових переваг сонячних електростанцій варто виділити невичерпність джерела енергії, екологічну чистоту виробництва електроенергії та довготривалий термін експлуатації. Фотоелектричні панелі практично не містять рухомих частин, що значно уповільнює їх зношення, і за умови правильної експлуатації термін служби може перевищувати 25 років. Крім того, сонячні системи дозволяють нарощувати потужність шляхом додавання нових модулів та забезпечують незалежність від традиційного палива, що робить їх ефективним рішенням для автономних або гібридних електросистем.

Водночас існують певні обмеження у використанні сонячних електростанцій. Значні початкові інвестиції, необхідні для встановлення обладнання, є суттєвим

бар'єром у порівнянні з підключенням до центральної електромережі. Крім того, ефективність систем значною мірою залежить від погодних умов: у похмурі дні, при тумані або низьких температурах ККД панелей знижується. Також для забезпечення високої продуктивності потрібне регулярне очищення поверхні модулів від пилу, бруду та снігу. Для генерації значного обсягу електроенергії необхідні великі площі, а після завершення експлуатаційного терміну виникають проблеми з утилізацією відпрацьованих панелей.

Таким чином, сонячна енергетика в Україні має високий потенціал розвитку, особливо в південних регіонах, але ефективне її впровадження потребує врахування економічних, технологічних та кліматичних факторів.

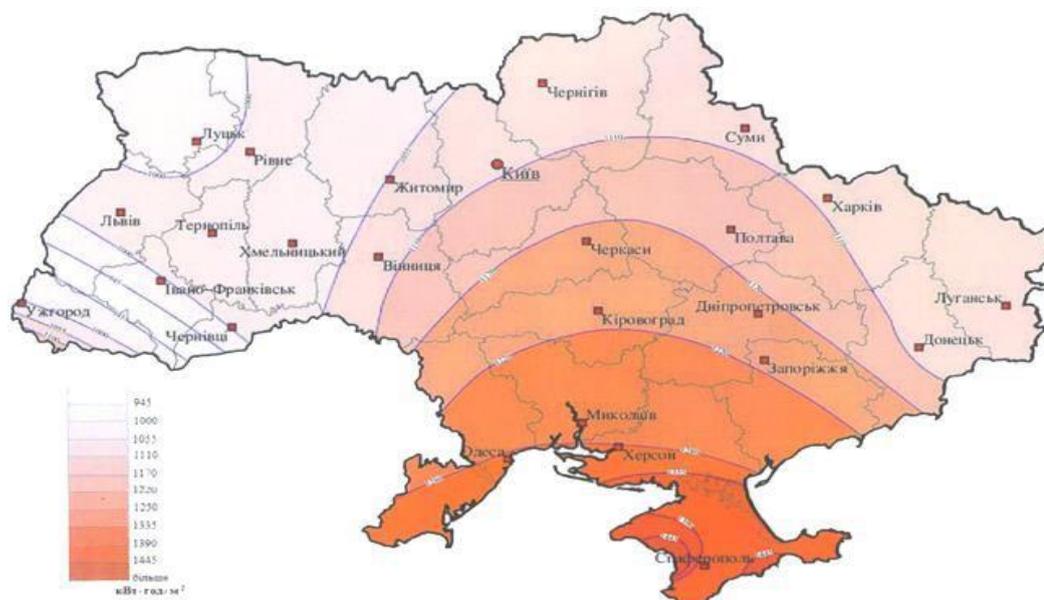


Рисунок 1.4 – Питома сонячна радіація, за рік

Питома сонячна радіація, що надходить на земну поверхню, характеризується нерівномірним річним розподілом, який зумовлений сезонними змінами висоти Сонця над горизонтом, тривалістю світлового дня та метеорологічними умовами конкретного регіону. Упродовж календарного року значення сумарної сонячної енергії поступово змінюються, формуючи характерну хвилеподібну динаміку, що має важливе практичне значення при проектуванні систем автономного енергопостачання, зокрема фотоелектричних та гібридних установок.

У зимовий період – з грудня по лютий – інтенсивність сонячної радіації є

мінімальною. Це пояснюється низьким кутом підйому Сонця, короткою тривалістю дня та високою частотою хмарності. Навіть у регіонах із відносно сприятливими кліматичними умовами зимове значення питомої радіації становить лише незначну частку від річного потенціалу.

Навесні відбувається поступове зростання інсоляції. Із підвищенням висоти Сонця над горизонтом збільшується і час, протягом якого поверхня отримує пряме випромінювання, що сприяє більш рівномірному та стабільному надходженню енергії.

Максимальні значення питомої сонячної радіації спостерігаються в літні місяці – з червня по серпень. У цей період на поверхню надходить найбільша кількість прямої й розсіяної сонячної енергії завдяки тривалому світловому дню, найвищій кутовій висоті Сонця та переважно стабільним погодним умовам. Саме літній максимум визначає енергетичну продуктивність фотоелектричних систем і є базовою точкою при оцінюванні їх річної ефективності.

Восени рівень інсоляції знову починає знижуватися, повторюючи загальну тенденцію переходу до зимових мінімумів. Паралельно зменшується тривалість дня, зростає ймовірність хмарності та атмосферних опадів, що додатково зменшує кількість енергії, доступної для перетворення.

Таким чином, річний розподіл питомої сонячної радіації має чітко виражений сезонний характер: мінімум – взимку, поступове зростання – навесні, максимум – влітку та спад – восени. Ця закономірність є ключовою для точного прогнозування роботи фотоелектричних модулів, оптимізації параметрів систем накопичення енергії та забезпечення стабільності автономного енергопостачання в різних кліматичних умовах.

Основними напрямками підвищення ефективності сонячних електростанцій є підвищення ККД фотоелектричних перетворювачів та оптимізація системи периферійних пристроїв сонячної фотоелектричної установки. Це включає удосконалення контролерів заряду акумуляторів, інверторів, систем відстеження сонця та охолодження панелей, що дозволяє максимально використовувати доступну сонячну енергію та зменшувати втрати при її перетворенні.

Вітроелектростанції (ВЕУ) є складними автоматизованими

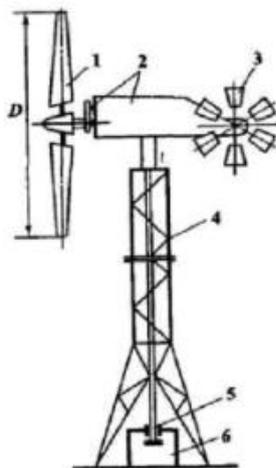
електромеханічними комплексами, призначеними для перетворення кінетичної енергії вітру в електричну. Основні елементи ВЕУ включають ротор з лопатями, електрогенератор, редуктор передачі крутного моменту, башту та систему регулювання режимів роботи.

Існують дві принципово різні конструкції ВЕУ: з вертикальною та горизонтальною віссю обертання. Горизонтальні вітроустановки середньої та великої потужності, як правило, оснащуються швидкохідним вітроколесом із двома або трьома лопатями. Такі установки досягають максимального вироблення потужності при високих обертах ротора, що забезпечує необхідну частоту обертання для електрогенератора. Водночас ВЕУ із більшою кількістю лопатей здатні виробляти значну потужність навіть при невеликій швидкості вітру, досягаючи максимуму потужності на низьких обертах.

Конструктивно ВЕУ з горизонтальною віссю обертання складається з лопатей, редуктора, електрогенератора та башти. Спеціальна конфігурація лопатей створює несиметричні сили в потоці повітря, що призводить до виникнення крутного моменту та обертання ротора.

Оскільки швидкість та напрямок вітру є стохастичними, сучасні вітроелектроустановки оснащуються системами безпеки та контролю. До них належать механізми нахилу лопатей при критичній швидкості вітру, системи повороту осі обертання за напрямком вітру, автоматичне регулювання потужності та аварійного відключення, що забезпечує надійну та безпечну експлуатацію, особливо для установок великої потужності.

Таким чином, ефективність роботи ВЕУ залежить не лише від конструктивних особливостей ротора, а й від інтегрованих систем контролю та регулювання, які дозволяють адаптувати роботу електростанції до мінливих природних умов.



1 – робоча лопать, 2 – трансмісія, 3 – віндроза, 4 – вежа, 5 – вал відбору потужності, 6 – електрогенератор.

Рисунок 1.5 – Конструктивна схема вітряка з горизонтальною віссю обертання

Конструктивна схема вітроелектроустановки (ВЕУ) з горизонтальною віссю обертання включає сукупність функціонально зв'язаних механічних, аеродинамічних і електричних компонентів, призначених для перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію. У типовій схемі виділяють наступні основні складові та їх короткий опис функцій:

Вітроколесо (ротор із лопатями) – аеродинамічний елемент, що сприймає енергію вітру; кількість і профіль лопатей (зазвичай 2–3) визначають режим роботи, ширину робочих швидкостей і коефіцієнт використання вітру.

Насадка/обтікач (нагнітач) – конструктивні елементи, що забезпечують оптимальну підводку повітря до лопатей і зменшують аеродинамічні втрати.

Вісь ротора (гондола) – несуча частина, що передає крутний момент від ротора до трансмісії; розташована горизонтально і закріплена на станині (навігаційній голівці).

Система регулювання куту лопатей (пітч-система) – дозволяє змінювати кут атаки лопаті щодо потоку для контролю моменту і захисту від перевантажень; реалізується гідравлічними або електромеханічними приводами.

Система орієнтування (йоул- або азимутальна система) – механізм повороту гондоли за напрямком вітру (yaw), що забезпечує оптимальне розташування ротора відносно потоку; включає датчики напрямку вітру і привод повороту.

Редуктор передачі (якщо присутній) – пристрій для підвищення частоти обертання від ротора до допустимого рівня для електрогенератора; в сучасних багатьох установках застосовуються прямі приводи без редуктора.

Електрогенератор – перетворювач механічної енергії на електричну (синхронний або асинхронний, з чи без редуктора; у сучасних турбінах часто використовуються генератори з постійними магнітами або синхронні генератори з частотною електронікою).

Система гальмування і аварійного відключення – механічні та електричні засоби для зупинки ротора при аварійних режимах або для технічного обслуговування (диск- або стрічкові гальма, активне фіксування лопатей у безпечному положенні).

Система супровідної електроніки і керування (SCADA, контролер потужності) – контролює режими роботи, реалізує алгоритми відстеження максимальної потужності (MPPT), захисти, логування й передачу телеметрії в центр управління.

Електрична частина (силові перетворювачі, трансформатор, вимикачі) – забезпечує перетворення і передачу виробленої енергії в мережу або до локальної системи: випрямляч/інвертор (у випадку змінної частоти), фільтри, трансформатор підвищення напруги, системи захисту від перенапруг і коротких замикань.

Башта (вежа, опора) – конструктивна опора, що забезпечує необхідну висоту установки ротора; може бути трубчастою або решітчастою; вежа містить внутрішній простір для кабелів, привідних ланцюгів та доступу для обслуговування.

Фундамент і система кріплення – забезпечують стійкість і передають навантаження від вітроустановки на ґрунт; проєктуються залежно від геологічних умов і конфігурації вежі.

Кабельні та комутаційні ланцюги, система заземлення – забезпечують безпечну передачу електроенергії та захист від грозових перенапружень і витоків струму.

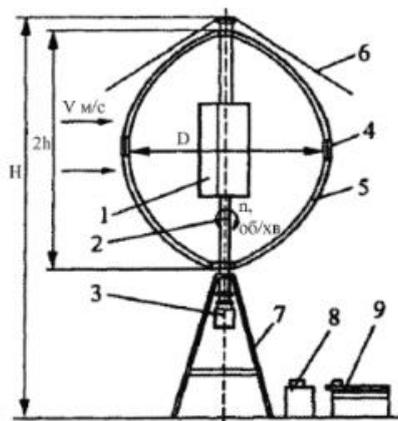
У тексті технічного опису доцільно супроводжувати цей перелік графічною

ілюстрацією (наприклад, структурною схемою – рисунок 1.5), де позначено взаємне розташування компонентів: ротор – гондола – редуктор/генератор – система керування – вежа – фундаменти – підключення до електромережі. Для інженерних розрахунків кожного елемента слід наводити конструктивні параметри (діаметр ротора, довжина лопаті, номінальна потужність генератора, передавальне відношення редуктора, висота вежі, маса оголовка, робочі напруги, ступінь захисту тощо) та оцінювати вплив аеродинамічних і конструктивних характеристик на загальну ефективність ВЕУ.

Вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання (ВЕУ ВВО) мають ряд переваг порівняно з горизонтальною конструкцією. Насамперед відсутня необхідність у системах орієнтації на вітер, що значно спрощує конструкцію та зменшує експлуатаційні витрати. Крім того, знижуються гіроскопічні навантаження на конструкцію, а редуктор можна розмістити безпосередньо в основі вежі, що полегшує технічне обслуговування та підвищує надійність установки.

Одним із найпоширеніших типів ВЕУ ВВО є ротор Дар'є. Принцип його роботи базується на використанні підйомної сили, що виникає в аеродинамічно профільованих лопатях. Цей ротор самостійно не здатен розкручуватися при запуску, тому для початкового обертання застосовують електрогенератор, який працює в режимі двигуна, або стартер, відомий як ротор Савоніуса. Така схема забезпечує надійний запуск і стабільну роботу вітроустановки при змінних швидкостях вітру.

Конструктивна схема вітроустановки з ротором Дар'є включає центральну вісь, лопаті з аеродинамічним профілем, систему стартера або генератора для початкового запуску, а також механізм передачі обертального моменту на електрогенератор, що дозволяє ефективно перетворювати кінетичну енергію вітру в електричну енергію (рисунок 1.6).



1 – стартер (ротор Савоніуса), 2 – вал, 3 – електрогенератор, 4 – гальмівний пристрій, 5 – робоча лопать, 6 – розтяжки, 7 – рама, 8 – перетворювач напруги, 9 – акумулятор.

Рисунок 1.6 – Вертикальний вітряк

Вітроелектроустановки (ВЕУ) класифікують за потужністю генератора, що дозволяє оцінити їх можливості у виробленні електроенергії та оптимально планувати їх встановлення для різних потреб (таблиця 1.2) [11].

Таблиця 1.2 – Класифікація вітроелектроустановок

Клас установки	Потужність, кВт	Діаметр колеса, м	Кількість лопатей	Призначення
Мала потужність	< 100	3-10	3-2	Зарядка накопичувачів, побутові потреби
Середня потужність	100-1000	25-44	3-2	Енергетика
Велика потужність	>1000	>45	2	Енергетика

На рисунку 1.7 наведено енергетичний потенціал України, що до вітрової енергетики[13].

Питомий енергетичний потенціал вітру на території України варіюється залежно від середньорічної швидкості вітру та висоти вежі ВЕУ (таблиця 1.3) [13]. Енергія вітру розподілена по території країни нерівномірно: південні області мають значно вищий потенціал порівняно з північними.

Згідно з оцінками, площа територій, де експлуатація вітроенергетичних об'єктів є доцільною, становить близько 8-9 тис. км². Використання лише 20–30% цієї території з щільністю будівництва ВЕС 5–8 МВт/км² дозволяє спорудити вітроелектростанції загальною потужністю 8–24 тис. МВт та генерувати 16–48

млрд кВт·год електроенергії на рік [14].

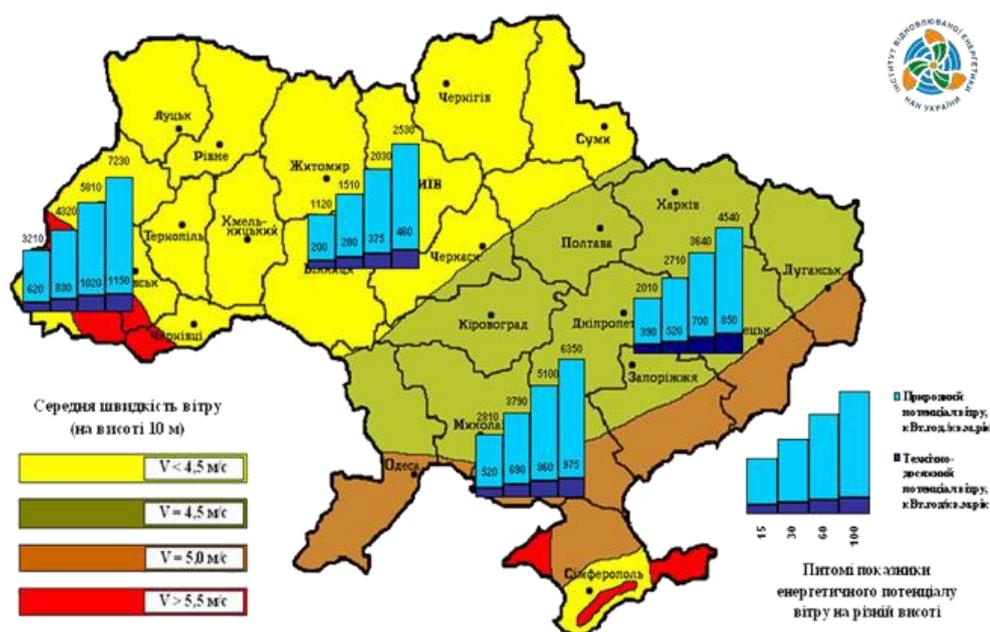


Рисунок 1.7 – Вітроенергетика України

Таблиця 1.3 – Питомий енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

Середньорічна швидкість вітру, V_{cp} , м/с	Висота, м	Природний потенціал вітру за рік кВт·год/м ²	Технічно досяжний потенціал вітру за рік кВт·год/м ²
< 4,25	15	1120	200
	30	1510	280
	60	2030	375
	100	2530	460
4,5	15	2010	390
	30	2710	520
	60	3640	700
	100	4510	850
5	15	2810	520
	30	3790	690
	60	5100	860
	100	6350	975
5,5	15	3200	620
	30	4320	830
	60	5810	1020
	100	7230	1150

Незважаючи на значне поширення та масове виробництво ВЕУ, будівництво сучасної вітрової електростанції потребує суттєвих капіталовкладень. Проте, витрати на її експлуатацію залишаються відносно низькими. Вітроенергетика відповідає всім критеріям, необхідним для віднесення її до екологічно чистих джерел енергії.

Серед основних переваг вітроелектроустановок слід зазначити:

- екологічне вироблення електроенергії без викидів шкідливих речовин;
- невичерпність джерела енергії;
- відносно невеликі площі для розміщення установок;
- простоту обслуговування та низькі експлуатаційні витрати.

Недоліки ВЕУ включають:

- стохастичність швидкості вітру, що призводить до коливань вироблення електроенергії;
- великі початкові інвестиції;
- виникнення аеродинамічного шуму під час роботи.

Особливо важливо відзначити, що стохастична природа вітру є ключовим обмеженням при використанні вітроелектроустановок у складі систем автономного електропостачання (САЕП), оскільки вона ускладнює підтримку стабільного рівня електроживлення споживачів.

1.3 Акумуляторні резерви енергії в автономних електричних комплексах

Основними недоліками технологій відновлюваної енергії (ТВЕ), таких як сонячні та вітрові електростанції, є низька щільність енергетичного потоку та стохастичність процесу генерації електроенергії. Низька щільність енергетичного потоку означає, що на одиницю площі надходить обмежена кількість енергії, що змушує створювати великі площі енергоустановок – наприклад, широкі приймальні поверхні сонячних панелей або великі площі вітроколеса. Стохастичність процесу, у свою чергу, ускладнює точне прогнозування вироблення електроенергії, що призводить до необхідності резервування

електростанцій за допомогою інших джерел енергії або акумуляторів (рисунок 1.8).

Удосконалення автономних вітроелектростанцій (АВЕУ) відбувається у кількох напрямках. Перший із них – підвищення технічних характеристик вітроустановок для збільшення коефіцієнта використання енергії вітру. Сьогодні сучасні вітроустановки демонструють коефіцієнт використання вітру на рівні 0,45–0,48, тоді як теоретичний максимум не перевищує 0,51. Це означає, що значного приросту ефективності очікувати не варто.

Другий напрямок удосконалень пов'язаний із оптимальним формуванням систем автономного електропостачання (САЕП) з урахуванням конкретних споживачів електроенергії. Проте при цьому залишається невирішеною проблема акумулювання енергії, яка обумовлена стохастичною природою вітру. Для забезпечення необхідної надійності автономних систем доводиться використовувати акумуляторні батареї великої енергоємності, маса яких часто наближається до економічно критичного значення, що ускладнює практичне застосування таких систем.

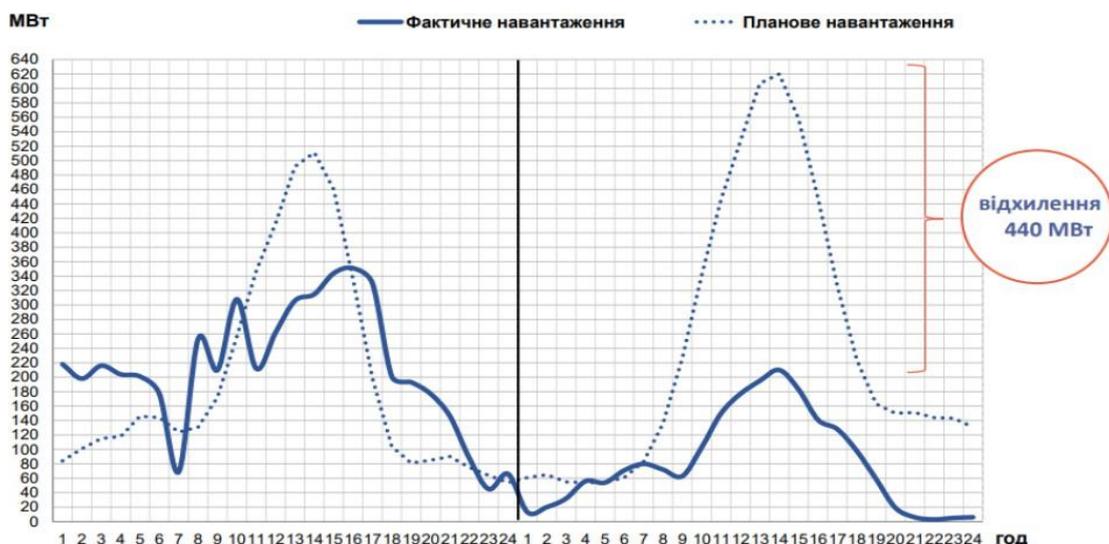


Рисунок 1.8 – Графік точності прогнозування

Спосіб резервування вітроелектростанцій є одним із ключових питань при проектуванні структурної схеми автономної системи електропостачання (САЕП). Основними методами резервування є акумуляторне резервування та використання інших джерел електроенергії як резерву.

Використання паливних електростанцій, таких як дизельні або бензинові,

для резерву негативно впливає на екологічність САЕП та створює низку проблем, пов'язаних із недоліками цих джерел. Аналогічно, застосування сонячних електростанцій для резервування теж має обмеження, головним чином через високу вартість обладнання та нерегулярність надходження сонячної енергії. Поєднання нерегулярності сонячного та вітрового джерел створює ризик одночасного припинення вироблення електроенергії, що знову потребує застосування додаткових резервів.

Найбільш поширеним методом резервування є використання електрохімічних акумуляторів. Вони компактні та мають високий ККД, проте їхні недоліки включають високу вартість та обмежену кількість циклів заряд-розряд. Вдосконалення акумуляторних систем дозволило б значно підвищити ефективність автономних систем електропостачання на основі вітроустановок. У цьому напрямку розробляються перспективні акумуляторні системи, які не потребують значних витрат на акумуляування енергії.

Висновки до 1 розділу

Автономні системи електропостачання, що використовують відновлювані джерела енергії, зокрема вітрові установки, стикаються з фундаментальною проблемою, обумовленою стохастичним (випадковим) характером їхньої роботи. Нестабільність і непередбачуваність вітрового потоку (та сонячного випромінювання) призводить до суттєвої нерівномірності генерації та надходження електроенергії.

Ця особливість створює значні труднощі в керуванні графіком електропостачання, особливо в агропромисловому секторі, де технологічні процеси часто вимагають безперервного та надійного забезпечення енергією. Як наслідок, для гарантування надійності, якості та стабільності електропостачання критично необхідне інтегрування ефективних систем акумуляування енергії.

Традиційні електрохімічні акумулятори (наприклад, літій-іонні чи свинцево-кислотні) є поширеним рішенням, проте вони мають низку експлуатаційних недоліків, які часто є критичними для сільського господарства:

- Висока вартість: Значні початкові інвестиції та висока експлуатаційна вартість (через необхідність періодичної заміни).
- Обмежений життєвий цикл (ресурс): Їхній термін служби прямо залежить від суворого дотримання технічних умов заряджання/розряджання, температури та глибини розряду, що є складним завданням в умовах віддаленої або менш кваліфікованої експлуатації.
- Складність обслуговування: Потреба у власній складній системі керування (BMS) та регулярному технічному обслуговуванні.

Ці фактори можуть нівелювати економічну доцільність використання ВДЕ в малих та середніх агропромислових господарствах.

Для подолання вказаних недоліків набуває актуальності диверсифікація методів акумулювання. Застосування систем, які накопичують енергію у кінетичній (наприклад, маховики) та потенційній (наприклад, гідроакумулювальні станції чи пневматичні системи) формах, відкриває шлях до зниження частки дорогих та вимогливих електрохімічних батарей.

Це дозволяє покращити економічні показники системи та збільшити її надійність без погіршення якості електропостачання.

Таким чином, інженерні дослідження, спрямовані на:

- Розробку та оптимізацію гібридних систем акумулювання (поєднання електрохімічних, кінетичних та потенційних накопичувачів).
- Створення ефективних алгоритмів керування такими гібридними комплексами.

є надзвичайно актуальними і мають високе науково-практичне значення для сталого розвитку агропромислового комплексу.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

2.1 Порівняльна характеристика параметрів технологій накопичення енергії

Збільшення частки традиційних відновлюваних джерел енергії (ТВД), зокрема вітроелектростанцій (ВЕС), у складі енергосистеми та автономних систем енергозабезпечення значно підвищує роль акумулювальних систем (АС) у забезпеченні надійного та стабільного електропостачання. В залежності від тривалості акумулювання, АС дозволяють вирішувати низку важливих завдань: перерозподіл енергії ТВД в часі, концентрацію енергії (накопичення протягом тривалого періоду та її видачу у піковий час), стеження за динамічно змінним навантаженням, згладжування графіка вироблення енергії ВЕС та забезпечення безперебійного живлення.

Сучасні системи акумулювання енергії реалізуються у вигляді електрохімічних, теплових, механічних, хімічних або електричних накопичувачів (рисунок 2.1)[16][17]. Найбільш поширеним є акумулювання електричної енергії, для чого використовуються різні типи АС. Основними параметрами таких систем є енергоємність, потужність, ККД, час відгуку, кількість циклів «заряд-розряд» та вартість, при цьому кожен тип АС має власні переваги та обмеження, що визначає їх ефективність для конкретної системи електропостачання.

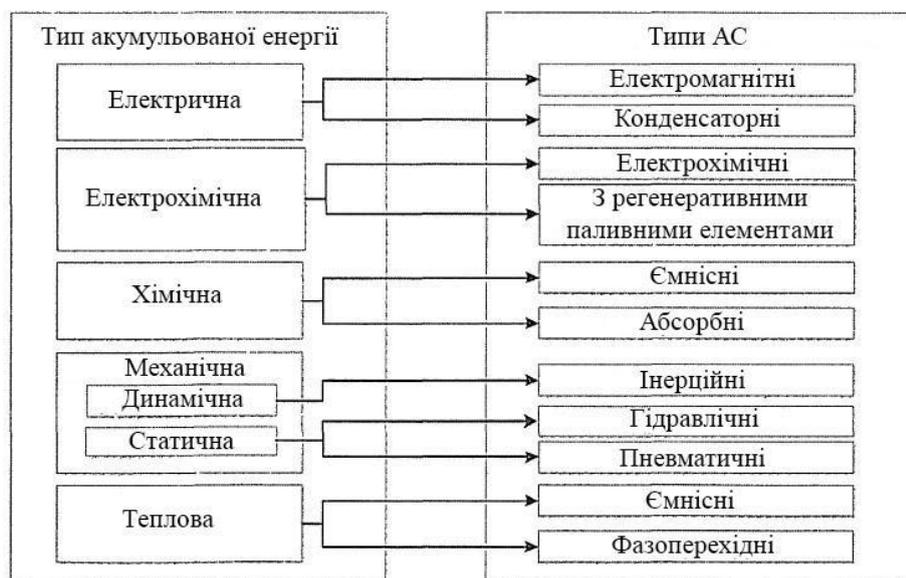


Рисунок 2.1 – Існуючі системи акумуляції

Функції накопичувачів електричної енергії залежать від їх енергоємності:

– Накопичувачі ємністю 1–30 кВт·год використовуються для підтримки локальної напруги на підстанціях при зміні навантаження та короткочасних аварійних відключеннях;

– Накопичувачі ємністю 30–300 кВт·год забезпечують підвищення статичної та динамічної стійкості енергосистем;

– Накопичувачі ємністю 300 кВт·год–5 МВт·год застосовуються для безперебійного енергопостачання;

– Накопичувачі ємністю 5–100 МВт·год забезпечують резервну потужність та акумулювання енергії ТВЕ;

– Накопичувачі ємністю понад 100 МВт·год використовуються для покриття пікових навантажень, регулювання графіка споживання та створення розосереджених енергосистем.

Сучасні системи акумуляції електричної енергії класифікують за потужністю та енергоємністю з урахуванням різних технологій: електрохімічні акумуляторні батареї (АКБ), потокові акумулятори (ПАБ), супермаховики (СМ), суперконденсатори (СК), надпровідникові індуктивні накопичувачі енергії (НПІНЕ), повітряно-акумулювальні електростанції (ПАЕС) та гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС) (рисунок 2.2).

Особливістю енергії вітру є її найбільша непередбачуваність серед усіх ТВЕ. Для однієї мегаватної турбіни мінімальна енергоємність акумулювання для згладжування генерації та мікрорегулювання складає 5–10 кВт·год на МВт за 10 хвилин, 50 кВт·год за 30 хвилин, а потужність АС досягає 400 кВт на МВт встановленої потужності. Таким чином, розвиток ефективних акумулювальних систем є ключовим фактором підвищення надійності та якості електропостачання при зростанні частки відновлюваної енергії в енергосистемі.

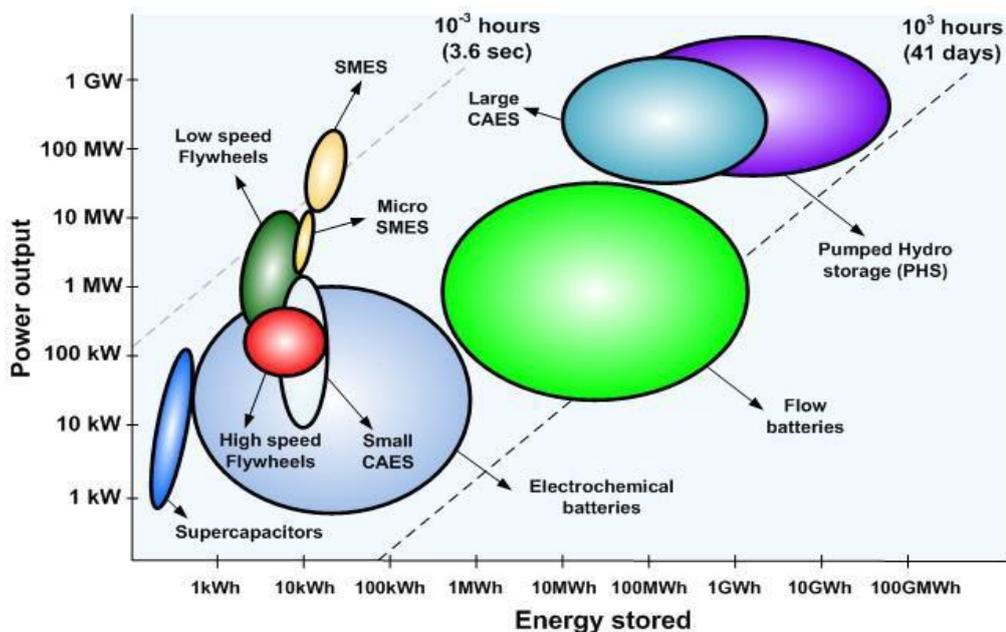


Рисунок 2.2 – Графік відповідності виробітку та методів збереження енергії

Системи акумулювання енергії на основі супермаховиків (СМ), суперконденсаторів (СК), надпровідникових індуктивних накопичувачів енергії (НПІНЕ) та потокових акумуляторних батарей (ПАБ) є оптимальними для застосування при невеликих потужностях та короткочасному акумулюванні енергії. Головною перевагою таких систем є надзвичайно швидкий час реагування – менше 5 мс, що дозволяє ефективно згладжувати генерацію від ТВЕ та регулювати частоту електричної мережі. Незважаючи на високі технічні характеристики цих систем, їх широке впровадження стримується високою вартістю та значним відхиленням від стандартів енергетичних мереж.

Для середньострокового регулювання та перерозподілу навантаження енергоємність акумулювання повинна становити кілька МВт·год на МВт встановленої потужності. Таким чином, для великих ВЕС з десятками або сотнями МВт встановленої потужності короткострокова компенсація потребує акумулювання енергії від кількох МВт·год і більше, а для середньострокового та довгострокового регулювання – від сотень до тисяч МВт·год. Для цього застосовують гідравлічне акумулювання енергії за допомогою ГАЕС та ГЕС, а також повітряно-акумулювальні електростанції (ПАЕС) для регулювання протягом кількох годин або доби. З електрохімічних систем для накопичення великих обсягів енергії використовують сірчано-натрієві акумулятори та потокові

батареї.

Для забезпечення електропостачання малопотужних споживачів у автономних системах найбільш доцільними є електрохімічні акумуляторні батареї. До переваг таких систем відносять високу маневреність і модульність установок, надійність, відносно низький негативний вплив на навколишнє середовище (безшумність, відсутність потреби у технічній воді) за умови правильної утилізації акумуляторів[22].

2.2 Електрохімічні системи зберігання енергії та їх експлуатаційні властивості

Свинцево-кислотні акумуляторні батареї (АКБ) є одними з найпоширеніших і найстаріших типів акумуляторів, які застосовуються для накопичення електричної енергії. Вони відносяться до вторинних джерел живлення, тобто можуть багаторазово заряджатися та розряджатися. Енергія в свинцево-кислотних АКБ виробляється в результаті електрохімічних реакцій окислення та відновлення між матеріалом електродів та електролітом, яким служить водний розчин сірчаної кислоти.

Сучасні свинцево-кислотні батареї можуть мати різні конструктивні рішення: з рідким електролітом, з гелеподібним електролітом (GEL) та AGM-батареї, в яких електроліт абсорбований у скловолоконному сепараторі[23]. Батареї типів AGM і GEL вважаються більш зручними й надійними в експлуатації через відсутність рідкого електроліту, що знижує ризик протікання та спрощує монтаж і обслуговування.

Переваги свинцево-кислотних АКБ включають:

- порівняно низьку вартість;
- широке поширення та легку доступність;
- відсутність ефекту пам'яті, що дозволяє не дотримуватись повного циклу заряд-розряд;
- наявність великої кількості готових рішень для різних застосувань.

Недоліки свинцево-кислотних АКБ полягають у:

- використанні токсичних матеріалів (свинець та кислота);

- чутливості до низьких температур, що знижує ефективність;
- обмеженому ресурсі при глибоких циклах розряду-заряду;
- чутливості до повного розряду та неможливості зберігання в розрядженому стані;
- високому рівні саморозряду;
- додаткових вимогах до транспортування та монтажу батарей із рідким електролітом.

У таблиці 2.1 наведено технічні характеристики свинцево-кислотних АКБ різних виробників та моделей, що дозволяє порівнювати їх за ємністю, напругою, типом електроліту та кількістю циклів заряд-розряд .

Таблиця 2.1 – Параметри свинцево-кислотних АКБ

Найменування	Напруга, В	Ємність, А·год	Ресурс роботи, циклів	ДхШхВ, мм; маса, кг	Вартість, грн
Delta DTM 12150 L	12	150	250	482x170x240, 47	9400
Trojan IND29-4V	4	1448	1600	688x263x605, 211	69500
Trojan IND9-6V	6	414	1600	389x260x598, 100	36000
Leoch DJM 12200	12	200	300	522x240x218, 61	11000
Challenger G12-200	12	183	700	522x240x219, 60	15300
Ventura VG12-250	12	250	350	526x268x241, 73	13000

Недоліком свинцево-кислотних акумуляторів у складі автономних систем електропостачання є їх висока токсичність через використання кислот та важких металів, що ускладнює процес утилізації та підвищує ризики експлуатації. Механічні пошкодження корпусу можуть спричинити витік електроліту або коротке замикання, а наростання внутрішнього тиску здатне порушити цілісність батареї. Для зниження цього ризику сучасні моделі оснащуються клапанами для

скидання надлишкового тиску. Незважаючи на ці обмеження, свинцево-кислотні АКБ залишаються домінуючими в побутовому сегменті завдяки поширеності, доступності та відносно низькій вартості при достатньо тривалому терміні служби. Вони застосовуються там, де потрібна велика потужність за помірною ціною, а вага та габарити не є критичними, наприклад у блоках безперебійного живлення, охоронних системах або системах резервного освітлення.

Нікель-кадмієві акумулятори (Ni-Cd) широко використовуються в промисловості та техніці, незважаючи на обмеження через токсичність кадмію. Основна перевага цього типу АКБ – стабільна подача потужності при великих зарядних і розрядних струмах без перегріву, що робить їх незамінними у деяких технічних пристроях. Принцип роботи ґрунтується на електрохімічній реакції гідроксиду нікелю та кадмію з водою.

Переваги Ni-Cd акумуляторів:

- стабільна робота при великих струмах;
- збереження ємності при низьких температурах;
- великий ресурс циклів повного заряду-розряду;
- тривалий термін зберігання незалежно від стану заряду;
- простота та швидкість зарядки;
- можливість зберігання в розрядженому стані;
- пожежо- та вибухобезпечність;
- стійкість до механічних навантажень.

Недоліки Ni-Cd акумуляторів:

- ефект пам'яті, що знижує ефективну ємність при неповному циклі заряду-розряду;
- відносно високий саморозряд при тривалому зберіганні;
- токсичність кадмію та необхідність спеціальної утилізації;
- низька номінальна напруга елемента (1,2 В), що вимагає підключення великої кількості елементів для досягнення необхідної напруги, підвищуючи вартість системи[24].

У таблиці 2.2 наведено приклади деяких моделей Ni-Cd АКБ та їхні основні

технічні характеристики.

Таблиця 2.2 – Порівняння нікель-кадмієвих АКБ

Найменування	Напруга, В	Ємність, А·год	Ресурс роботи, циклів	ДхШхВ, мм; маса, кг	Вартість, грн
EverExceed EBH500	1,2	500	1800	184х398х562, 53	20000
EverExceed EBL400	1,2	400	1800	152х170х385, 17.5	15400
Hengming	1,2	250	1200	282х170х348,	7000
GNZ250				21.8	

Літій-іонні акумуляторні батареї (Літій-іонні АКБ) є одними з найбільш сучасних та ефективних типів джерел електричної енергії. У цих батареях в якості анода використовується металевий літій або його сполуки, що мають високий електрохімічний потенціал, завдяки чому забезпечується велика щільність енергії та висока розрядна напруга. Це робить Літій-іонні АКБ надзвичайно ефективними для застосування в автономних системах електропостачання, мобільних пристроях та електротранспорті.

Перші спроби створити комерційні літійові акумулятори були ускладнені високою хімічною активністю металевих літію: при досягненні критичної температури всередині батареї може виникнути хімічна реакція літію з електролітом, що призводить до вибуху. Для вирішення цієї проблеми були розроблені літій-іонні акумулятори, у яких використовується не металевий літій, а його іони. Хоча такі батареї мають трохи нижчу енергетичну щільність порівняно з літійовими, вони значно безпечніші за умови дотримання правильних режимів заряду та розряду.

Переваги літій-іонних АКБ:

- Велика кількість циклів заряд-розряд;
- Відсутність ефекту пам'яті;

- Невеликий саморозряд;
- Легка вага;
- Висока енергетична щільність.
- Недоліки літій-іонних АКБ:
 - Висока вартість;
 - Складність заряду при низьких температурах;
 - Вибухонебезпечність при механічних пошкодженнях корпусу або порушенні герметичності;

Зниження ємності з часом, навіть якщо батарея не використовується.

У таблиці 2.3 наведено параметри деяких моделей літій-іонних акумуляторів, що дозволяє оцінити їх технічні характеристики та сферу застосування в автономних енергосистемах.

Таблиця 2.3– Порівняння літій-іонних АКБ

Найменування	Напруга, В	Ємність, А·год	Ресурс роботи, циклів	ДхШхВ, мм; маса, кг	Вартість, грн
Sony Module П1001М	51,2	22	6000	421x432x80, 17	39000
Powerbrick 12v 100ah	12,8	100	3000	260x168x212, 14	50000
LG RESU 3.3	48	63	6000	452x401x120, 31	115000

Для оцінювання та зіставлення різних видів АКБ використовують показник відносної вартості.

Розмір цього показника визначають за допомогою такої формули:

$$c = \frac{C^{CAP}}{E_{AKB}} \quad (2.1)$$

де C^{CAP} – вартість АКБ, грн; E_{AKB} – електрична ємність, Вт·год.

вартості одиниці енергії акумуляторів (у \$/Вт·год) наведені в таблиці 2.4 демонструють суттєві відмінності між різними типами батарей. Найвища вартість припадає на літій-іонні та нікель-кадмієві акумулятори, що пояснюється не лише

особливостями їхніх матеріалів і технології виготовлення, а й додатковими функціональними можливостями. До таких можливостей відносяться наявність систем управління батареями (BMS), здатність з'єднувати елементи в єдину батарейну збірку, наявність інтерфейсів RS-232 або CAN для моніторингу та управління, контролер заряду, а також інші технологічні рішення, що підвищують надійність та безпеку експлуатації.

У той же час свинцево-кислотні акумулятори демонструють найнижчу вартість ват-години, що зумовлено їх широкою номенклатурою, поширеністю на ринку та відносно простою технологією виготовлення. Незважаючи на нижчу ціну, вони залишаються ефективним і економічно вигідним рішенням для автономних систем електропостачання там, де критичними є великі маса та габарити батарей, а також відносно невисока енергетична щільність не є обмеженням.

Таким чином, вибір типу акумуляторів у автономних системах енергопостачання є компромісом між вартістю, надійністю, технічними характеристиками та додатковими функціями, необхідними для конкретного застосування.

Одним із ключових параметрів для порівняння акумуляторів різних типів є номінальна напруга однієї комірки. Як видно з рисунку 2.3 [26], найвищу напругу мають літій-іонні акумулятори. Це забезпечує можливість використання меншої кількості комірок для досягнення необхідної вихідної напруги системи, що є особливо важливим у компактних конструкціях батарейних блоків.

Ще одним показником порівняння є об'ємна ємність – відношення ємності акумулятора до його фізичного об'єму. Результати розрахунків цього параметра наведені в таблиці 2.4. Однак для стаціонарних автономних систем електропостачання маса та габарити батарей не мають критичного значення, тому цей показник не є вирішальним при виборі АКБ.

Таблиця 2.4– Розрахункові значення показників

Акумулятор	Тип	c , грн/Вт·год	Об'ємна ємність (Вт·год)/см ³	V, см ³
Delta DTM 12150 L	LA	5,22	0,0915	19666
Trojan IND29-4V	LA	12	0,0529	109471
Trojan IND9-6V	LA	14,5	0,041	60482
Leoch DJM 12200	LA	4,58	0,088	27311
Challenger G12-200	LA	6,9	0,08	27436
Ventura VG12-250	LA	4,33	0,088	33973
EverExeed EBH500	NiCd	33,33	0,0146	41156
EverExeed EBL400	NiCd	32,1	0,0483	9948
Hengming GNZ250	NiCd	23,33	0,018	16683
Sony Module IJ1001M	Li-ion	34,6	0,0774	14550
Powerbrick 12v 100ah	Li-ion	39	0,911	1405
LG RESU 3.3	Li-ion	38	0,138	21931

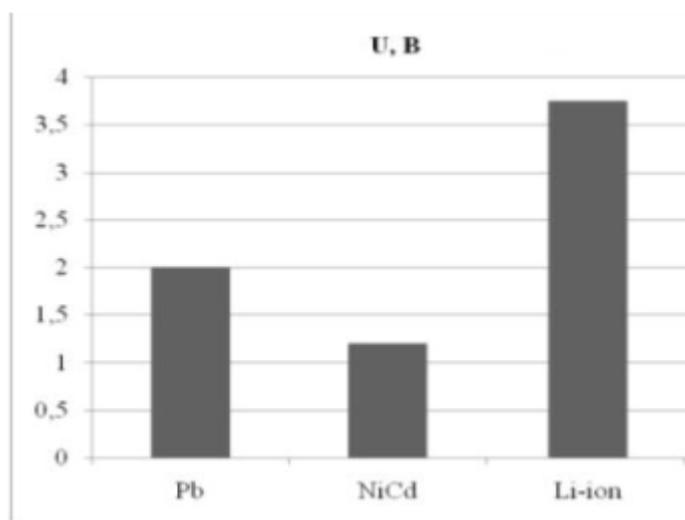


Рисунок 2.3 – Значення напруги однієї з комірок

Важливим критерієм при виборі акумуляторів також є їх ресурс і стійкість до роботи в режимі розряд-заряд. Свинцево-кислотні АКБ більш чутливі до глибоких розрядів і менш витривалі при глибині розряду понад 20 %, тоді як інші типи акумуляторів, зокрема літій-іонні та нікель-кадмієві, демонструють вищу стійкість до таких режимів експлуатації. Найбільшу кількість циклів заряд-розряд

мають літій-іонні АКБ, а термін їхньої експлуатації при невеликій глибині розряду може сягати 10–15 років. Для свинцево-кислотних батарей аналогічний показник становить близько 12 років. Це свідчить про те, що, незважаючи на більш просту конструкцію, сучасні свинцево-кислотні АКБ залишаються конкурентоспроможними за ресурсом порівняно з більш сучасними типами. Застосування батарей типів AGM та GEL дозволяє уникнути багатьох труднощів, характерних для моделей із рідким електролітом.

Проаналізувавши наведені фактори – питому вартість, номінальну напругу комірки, ресурс та наявність широкого асортименту моделей – можна дійти висновку, що оптимальним варіантом для використання в автономних системах електропостачання є свинцево-кислотні АКБ. Додатковими перевагами цього типу батарей є їхня поширеність і доступність. Недоліки, такі як нижча екологічність або необхідність регламентного обслуговування, у сучасних моделях значною мірою подолані або не є критичними, враховуючи інші переваги.

Водночас перспективним залишається застосування літій-іонних АКБ у складі автономних систем, проте їхнє широке впровадження обмежене високою вартістю. Саме тому свинцево-кислотні акумулятори є найпоширенішим типом батарей у готових побутових автономних електростанціях на світовому ринку.

Гідравлічні методи акумулювання енергії та їх інженерні рішення

Гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС) використовують надлишок електроенергії, виробленої енергосистемою, переважно у нічні години, для перекачування води з нижнього у верхнє водоймище за допомогою гідроагрегатів. У періоди пікового навантаження вода із верхнього резервуару подається по трубопроводу до гідроагрегатів, що працюють у турбінному режимі. Вироблена електроенергія віддається в енергосистему, а вода, пройшовши через турбіни, накопичується у нижньому водоймищі. Обсяг акумульованої енергії визначається робочим напором ГАЕС та ємністю водойм. Верхній басейн може бути як штучним, так і природним (наприклад, озеро), а нижній басейн часто утворюється внаслідок перекриття річки греблею.

Гідроагрегати ГАЕС підбираються залежно від висоти напору та витрати води і оснащуються діагональними, поворотно-лопатевими, ковшовими або радіально-осьовими турбінами. Час запуску та зміни режимів роботи ГАЕС вимірюється хвилинами, що забезпечує високу маневреність та швидку адаптацію до потреб енергосистеми.

Сьогодні гідравлічне акумулювання є найбільш ефективним і економічним способом накопичення великих обсягів енергії та забезпечує близько 99% світового обсягу акумулювання енергії. Основна функція ГАЕС полягає у підтриманні ефективної роботи потужностей базового навантаження шляхом генерації електроенергії у періоди пікового попиту та акумулювання її в години з низьким споживанням. Крім того, ГАЕС надають допоміжні послуги, такі як стабілізація частоти та напруги в електричній мережі, що робить їх важливим елементом сучасних енергосистем [27, 28].

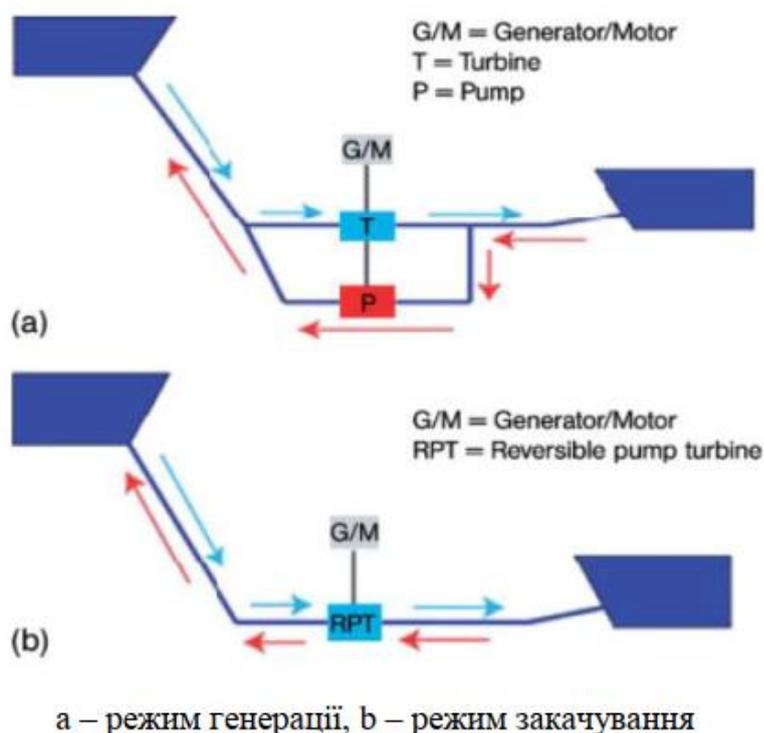


Рисунок 2.4 – Схема роботи ГАЕС

У останні роки зростає комерційний і технічний інтерес до гідроакумулювальних електростанцій (ГАЕС). Основними факторами цього процесу є політичні цілі щодо розвитку відновлюваних джерел енергії, збільшення попиту на електроенергію та модернізація існуючих електростанцій [29, 30]. На сьогоднішній день загальна встановлена потужність ГАЕС у світі

становить приблизно 130 ГВт, з яких близько 45 ГВт розташовано в Європі, 30 ГВт – у Японії, 24 ГВт – у Китаї та 22 ГВт – у США. Близько 24 ГВт потужності введено в експлуатацію після 2005 року, а прогнозоване встановлення до 2050 року може досягти 500–600 ГВт. Серед європейських країн з найбільшою встановленою потужністю ГАЕС – Німеччина, Італія, Іспанія, Франція, Сполучене Королівство, Австрія та Україна [28].

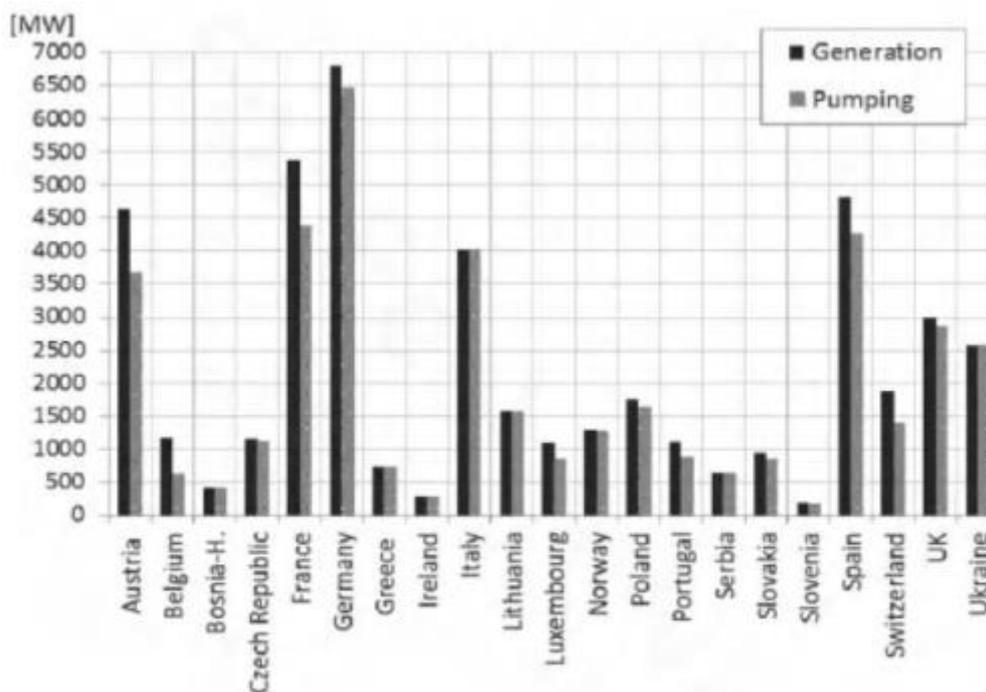


Рисунок 2.5 – Встановлені потужності ГАЕС в Європі

Типова сучасна європейська ГАЕС має встановлену потужність 200–300 МВт і відносно короткий цикл зберігання енергії – генерацію протягом 4–9 годин та акумуляцію на 6–12 годин. На багатьох станціях потужність гідрогенераторів для вироблення електроенергії перевищує потужність для закачування води у верхній резервуар. Наприклад, у Німеччині до 2012 року потужність для генерації складала 6,8 ГВт, а для закачування – 6,45 ГВт; у Швейцарії ці показники становили 1,9 та 1,4 ГВт відповідно. Об’єм нижнього резервуара зазвичай менший за верхній, що обмежує обсяг води та акумульованої енергії у циклах зберігання.

Перші ГАЕС були побудовані в альпійських регіонах Швейцарії, Італії, Австрії та в Німеччині у період між 1960 і 1990 роками, коли великі потужності

традиційних електростанцій інтегрувалися в енергосистему [31].

Експериментальні проекти гідроакумулювання енергії вітроелектростанцій (ВЕУ) демонструють нові можливості інтеграції технологій відновлюваної енергетики. У 2017 році німецька компанія Max Bögl Wind реалізувала проект вітропарку потужністю 13,6 МВт у районі містечка Гайльдорф поблизу Штутгарта. Щорічна генерація станції складає не менше 10,5 ГВт·год, при вартості проекту 70 млн євро та прогнозованому річному доході близько 6,5 млн євро, що дозволяє окупити інвестиції за 11 років [32].

Особливістю цієї гібридної електростанції є компенсація нестабільної генерації ВЕУ за рахунок гідравлічного акумулювання. Вежі вітрогенераторів оснащені резервуарами для накопичення води: у періоди низького споживання електроенергії вода закачується у верхні резервуари, а в години пікового навантаження потенційна енергія води використовується для обертання гідрогенератора, встановленого на 200 м нижче. Перепад висоти забезпечується через злив води в нижній резервуар, розташований у колишній шахті, що дозволяє акумулювати до 70 МВт·год енергії.

Важливою перевагою такої гібридної станції є інтеграція ВЕУ та ГАЕС в єдину систему: це значно знижує вартість об'єднаних установок у порівнянні з будівництвом окремих об'єктів. ГАЕС та ВЕУ використовують спільне підключення до електричної мережі, а кабелі вітрових турбін прокладені разом із трубопроводом. У проекті Гайльдорфа чотири вітрогенератори та три гідроагрегати ГАЕС підключені до однієї підстанції кабелями напругою 20 кВ [33].

Введення в експлуатацію електростанцій із гідравлічним акумулюванням у провідних країнах енергетичного сектору, таких як Німеччина, свідчить про перспективність застосування гідроакумулювання навіть у масштабах, менших за традиційні ГАЕС. Це відкриває можливості для ефективного використання такої технології в автономних системах електропостачання, забезпечуючи стабільність енергопостачання та інтеграцію відновлюваних джерел енергії навіть на локальному рівні.

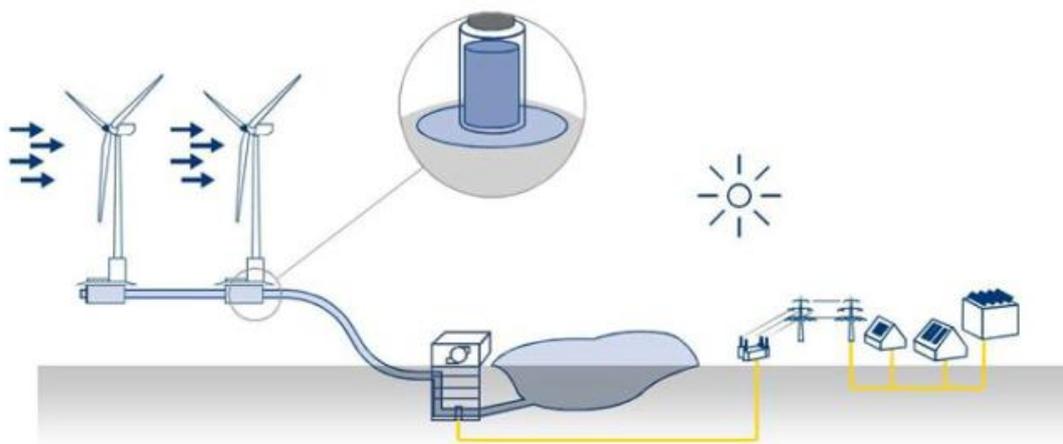


Рисунок 2.6 – Схема електростанції в Гайльдорфі

2.3 Структурна модель автономної вітроенергетичної системи

На сучасному етапі автономні системи електропостачання на основі вітроенергетичних установок відзначаються великою різноманітністю як у загальній структурі (рисунок 2.7), так і в компонентах, що входять до їх складу. Відповідно, особливої уваги потребує ефективне формування таких систем, оскільки державна політика дедалі більше спрямована на впровадження енергоефективних та енергозберігаючих технологій.



Рисунок 2.7 – Основні системи автономного електропостачання на основі ВЕУ

Одним із ключових питань при проектуванні автономної системи електропостачання є вибір способу резервування вітроелектростанції. Як показано на рисунку 2.7, існують два основні підходи: акумуляторне

резервування та використання інших джерел електроенергії як резерву. Застосування паливних електростанцій (рисунок 2.8), таких як дизельні або бензинові генератори, забезпечує надійність системи, але водночас зменшує її екологічність та супроводжується низкою проблем, притаманних цим джерелам, зокрема високими витратами на паливо, шумом та викидами шкідливих речовин.

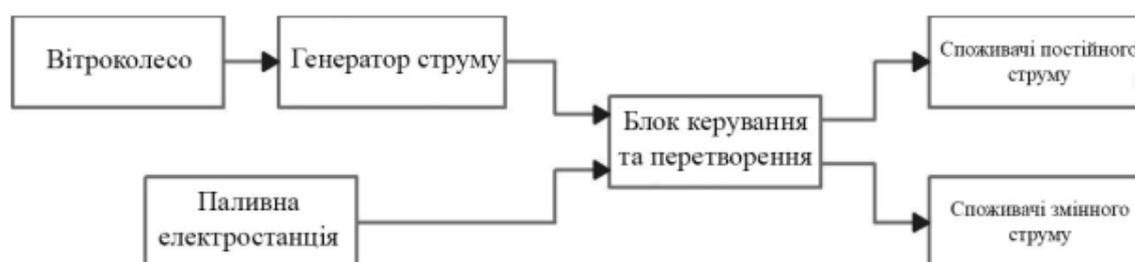


Рисунок 2.8 – Структурна схема автономної системи електропостачання на основі ВЕУ та паливної електростанції

Використання сонячних електростанцій як резервного джерела (рисунок 2.9) також має суттєві обмеження. Основними є висока вартість обладнання та стохастичність надходження енергії. Подібно до вітру, нестабільність сонячної генерації створює ризик одночасного припинення вироблення електроенергії обома джерелами, що знову ж таки змушує впроваджувати додаткові резервні рішення.

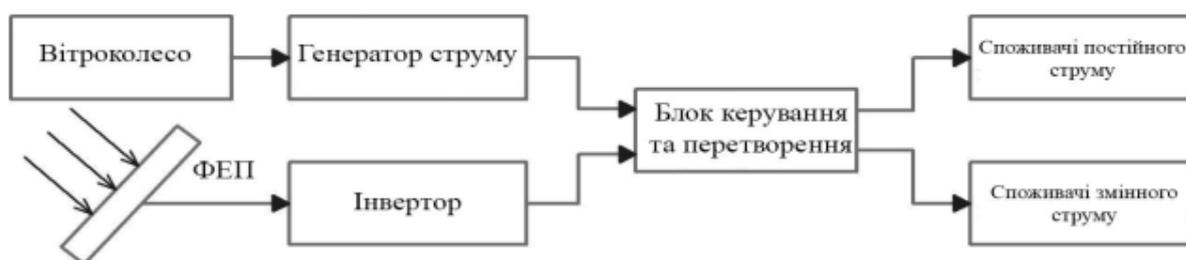


Рисунок 2.9 – Структурна схема автономної системи електропостачання на основі ВЕУ з резервуванням сонячною електростанцією

Найпоширенішим методом резервування в автономних системах є акумуляторне резервування (рисунок 2.10), здебільшого за допомогою електрохімічних акумуляторів. До основних недоліків цього підходу належать

висока вартість батарей, обмежена кількість циклів «заряд-розряд», а також необхідність регулярного технічного обслуговування та контролю режимів експлуатації. Незважаючи на це, акумуляторне резервування залишається одним із найбільш ефективних способів забезпечення безперебійного живлення автономних об'єктів.



Рисунок 2.10 – Структурна схема автономної системи електропостачання на основі ВЕУ з акумуляторним резервом

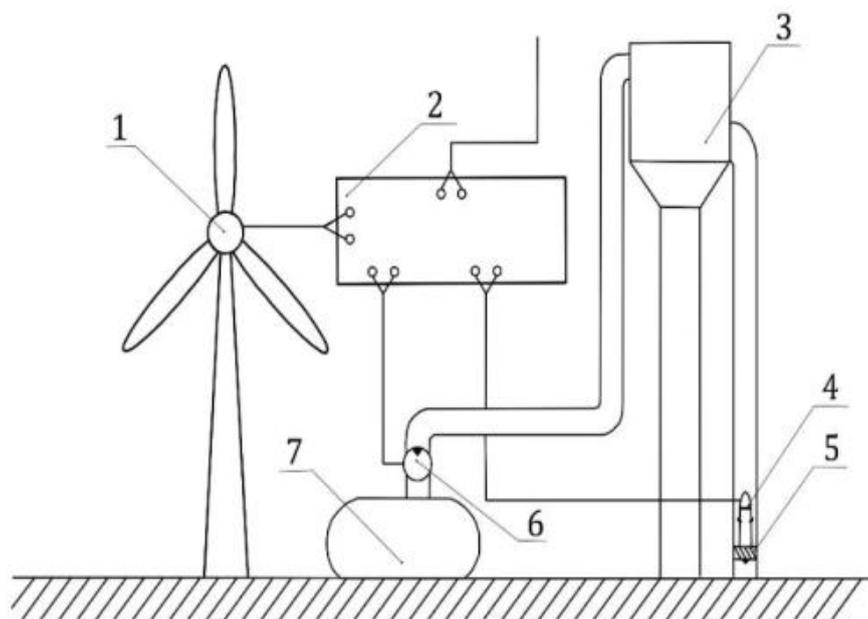


Рисунок 2.11 – Структурна схема автономної системи електропостачання на основі ВЕУ з гідравлічним акумулюванням

У сучасних автономних системах електропостачання існує перспективна можливість використання гідравлічних акумуляторів енергії як альтернативи або доповнення до традиційних електрохімічних акумуляторів. На рисунку 2.12 наведена схема автономної вітроелектроустановки з гідравлічним акумулятором

електроенергії, яка функціонує за наступним принципом [34, 35].

Накопичення енергії. У разі, коли енергія, вироблена вітроустановкою, не повністю споживається навантаженням, її частина використовується для живлення електродвигуна насоса. Насос перекачує воду у верхній резервуар, акумулюючи потенційну енергію. Процес накопичення припиняється у випадку зупинки вітрогенератора, досягнення максимального об'єму резервуару або при повному споживанні виробленої електроенергії.



1-вітроелектроустановка, 2 - блок управління і перетворення струму, 3 - ємність для накопичення води, 4 - електрогенератор, 5 - гідротурбіна, 6 - насос, 7 - джерело води

Рисунок 2.12 – Схема автономної вітроелектростанції з використанням гідравлічного акумулятора електроенергії

Використання накопиченої енергії. Коли вітрогенератор не здатний забезпечити споживача необхідним обсягом електроенергії (через недостатню швидкість вітру або його відсутність), вода з верхнього резервуару направляється до гідроагрегату. Потік води приводить у дію гідротурбіну, з'єднану з електрогенератором. Генерована електроенергія через блок управління і перетворення струму подається безпосередньо споживачу.

Схема електричних з'єднань такої автономної системи зображена на рисунку 2.13. ВЕУ та гідроакумулятор підключені до загального контролера, який забезпечує подачу енергії на споживача. Передбачається, що вітрова установка розташована близько до генератора та центру навантаження, що мінімізує втрати

в електричній мережі.

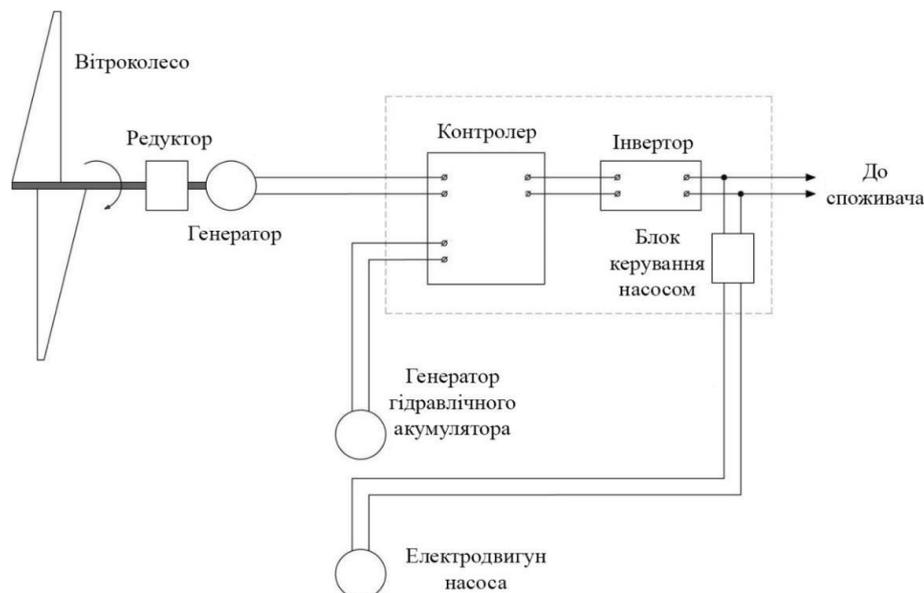


Рисунок 2.13 – Електричні з'єднання

Висновки до 2 розділу

Свинцево-кислотні акумулятори (СКА) на сьогоднішній день залишаються домінуючим рішенням у сегменті побутових та невеликих автономних електростанцій. Їхня широка поширеність обумовлена кількома ключовими перевагами:

- Економічна привабливість: Відносно низька питома початкова вартість (у перерахунку на одиницю накопиченої енергії).
- Технічна зручність: Задовільний рівень напруги однієї комірки та великий вибір серійних моделей на ринку.
- Середній ресурс: При дотриманні умов експлуатації забезпечують середній термін служби.

Проте, незважаючи на ці переваги, СКА мають суттєві експлуатаційні та екологічні обмеження. Головним недоліком є обмежена кількість допустимих циклів заряд-розряд (особливо при глибоких розрядах), що робить необхідною їх регулярну, відносно часту заміну. Це, у свою чергу, призводить до:

- Підвищення експлуатаційних витрат (ОРЕХ): Необхідність періодичного капітального оновлення парку батарей.
- Проблеми утилізації: Складна та екологічно чутлива утилізація відпрацьованих

електрохімічних батарей, що містять токсичні речовини (свинець, сірчана кислота).

Альтернативним підходом, спрямованим на подолання недоліків електрохімічних систем, є впровадження гідравлічних акумуляторів енергії (ГАЕ). Ці системи, які накопичують енергію у потенційній формі (найчастіше за принципом гідроакумулявальних електростанцій, але адаптованих для малих та автономних комплексів), дозволяють частково або навіть повністю замінити електрохімічні батареї.

Ключові переваги ГАЕ:

- Довговічність і надійність: Високий ресурс циклів, відсутність хімічних реакцій, що деградують, та можливість підтримки високого рівня надійності енергосистеми.
- Екологічність: Значне зниження потреби в утилізації небезпечних хімічних компонентів.

Параметри та конструктивні особливості гідроакумулявальних пристроїв безпосередньо визначаються режимами роботи та специфічними умовами експлуатації конкретної автономної вітроелектростанції (ВЕУ), включно з необхідним обсягом резервування та добовим графіком споживання.

Ефективна інтеграція стохастичної генерації вітрової енергії з інерційним гідроакумуляванням вимагає вирішення ряду комплексних технічних та теоретичних завдань.

Нагальна потреба існує у розробці та науковому обґрунтуванні нових методик розрахунку параметрів та оптимальних режимів роботи гібридних систем електропостачання на базі ВЕУ з гідравлічним акумуляванням. Ці методики мають бути універсальними та забезпечувати ефективну експлуатацію таких комплексів як:

- У складі централізованих енергомереж (для надання послуг балансування).
- В повністю автономних мережах (для забезпечення стабільної якості електроенергії та надійності постачання).

Таким чином, оптимізація структури накопичувачів за рахунок впровадження гідроакумулювання є ключовим напрямком для підвищення техніко-економічної ефективності та екологічної стійкості автономних енергетичних систем.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ В СТРУКТУРІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

3.1 Математичне моделювання функціональних складових системи електропостачання

Математична модель вітрової енергетичної установки у складі автономної системи

Вітровий режим у районі розташування вітроелектроустановки (ВЕУ) визначається поєднанням загального вітрового клімату території та локальних факторів, які мають значний вплив на формування вітрового потоку біля ротора. До таких локальних факторів належать висота над рівнем земної поверхні, наявність затінення від будівель чи дерев, тип підстильної поверхні, а також орографія або рельєф місцевості. Ці фактори безпосередньо впливають на швидкість, напрямок і турбулентність вітру, що є критичними для ефективної роботи ВЕУ [36, 37].

Основні чинники, які враховуються при розрахунку вітрового режиму, включають:

Вплив неоднорідної земної поверхні та перешкод. Нерівності поверхні та будівельні об'єкти сповільнюють потік вітру поблизу землі, що зменшує ефективну швидкість вітру на рівні ротора.

Орографія місцевості. Рельєф впливає на напрямок вітрового потоку та його профіль, формуючи зони прискорення або загальмування потоку.

Локальні перешкоди та взаємодія з сусідніми ВЕУ. Будівельні конструкції та розташовані поруч ВЕУ створюють турбулентність та локальні зміни швидкості потоку, що можуть знижувати ефективність генерації.

Для визначення наявної потужності ВЕУ використовується крива потужності, що надається виробником.

$$N_{\text{веу}} = f_p(V),$$

де f_p – крива потужності ВЕУ;

V – швидкість вітрового потоку перед ротором ВЕУ.

У паспорті вона приведена до стандартних умов: щільності повітря на рівні моря

$\rho_0=1,225$ кг/м³ та коефіцієнта інтенсивності турбулентності. Щоб врахувати реальні умови конкретного місця розташування ВЕУ, криву потужності коригують за допомогою поправочного коефіцієнта k_p , що враховує місцеву щільність повітря.

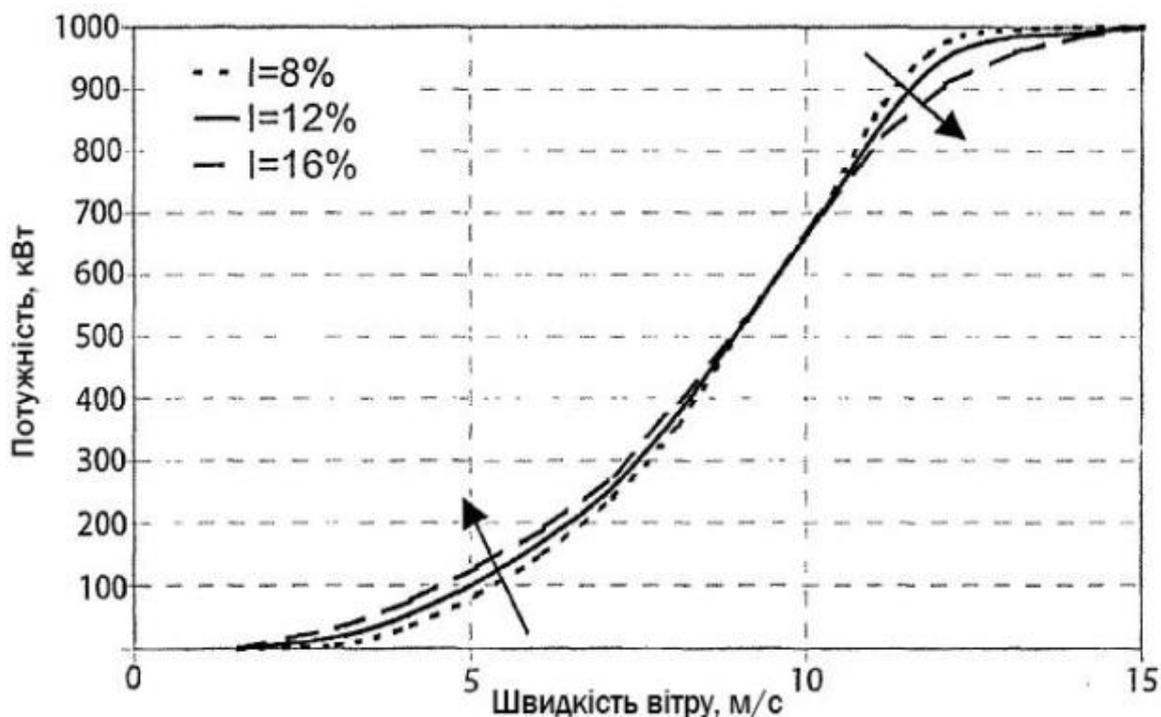


Рисунок 3.1 – Крива потужності ВЕУ при різній інтенсивності турбулентності

Особливу увагу слід приділити втратам на орієнтацію ВЕУ за напрямком вітру. Внаслідок раптових змін напрямку вітрового потоку гондола не завжди встигає відреагувати миттєво, і ротор приймає вітер під кутом, що зменшує ефективну площу обдуву та потужність генератора. Втрати на орієнтацію можна розраховувати за допомогою рекурентної формули, яка враховує зміну обдуваної площі в залежності від швидкості та кута повороту гондоли:

$$k_B = \frac{\cos(\gamma_t)}{2} \cdot \frac{\gamma_t}{\Delta t_{\text{вим}} \cdot T_T}, \quad (3.2)$$

де k_B – коефіцієнт урахування втрат на орієнтацію;
 $\gamma_t = \varphi_{t-\Delta t_{\text{вим}}} - |\varphi_t - \pi|$ – кут вітрового потоку по відношенню до осі ротора ВЕУ; $\Delta t_{\text{вим}}$ – інтервал вимірювань; T_T – швидкість орієнтації гондоли ВЕУ.

В середньому напрямок вітру змінюється на $\pm 30^\circ$ протягом 10 хвилин. Для ВЕУ мегаватного класу, де швидкість повороту гондоли становить $25\text{--}50^\circ/\text{хв}$, середні втрати на орієнтацію оцінюються близько 1%. У складних орографічних умовах і з високою турбулентністю цей показник може бути значно більшим, що необхідно враховувати при проектуванні та оптимізації автономних вітрових електростанцій.

Таким чином, потужність ВЕС можна записати як:

$$N_{\text{вес}_t}(m, V, \varphi, a) = \sum_{i=1}^m f_{P_i}(V_i) \cdot a \cdot k_{\text{в}}(\varphi) \leq N_{\text{вес}_t}(m, V, \varphi) \leq N_{\text{вес}}^{\text{в}}(m), \quad (3.3)$$

де $N_{\text{вес}_t}(m, u)$ – наявна потужність ВЕС, за $\sum_{i=1}^m a_i = 1$; a – коефіцієнт розподілу навантаження на i -ій ВЕУ; m – кількість ВЕУ; $N_{\text{вес}}^{\text{в}}$ – встановлена потужність ВЕС; $V=V(h_0)$ – швидкість вітрового потоку в місці вимірювання.

Математичний опис роботи гідроенергетичної установки

Потужність гідравлічної турбіни визначають за допомогою класичного співвідношення, яке враховує напір, витрату води та ефективність гідроагрегату. Загальна формула для розрахунку потужності на валу i -ої гідротурбіни має вигляд:

$$P_i = \eta_i \cdot H_i \cdot Q_t \cdot g \cdot \rho$$

де:

- P_i — потужність на валу i -ої гідротурбіни,
- Q_t — витрата води через турбіну,
- H_i — напір на i -ому гідроагрегаті,
- η_i — ККД гідротурбіни на даному режимі,
- g — прискорення вільного падіння,
- ρ — щільність води.

Оскільки потужність гідротурбіни залежить одночасно від напору і витрати, для практичного розрахунку використовують енергетичну характеристику турбіни, яка відображає зв'язок між напором, витратою та потужністю на валу. Цю характеристику можна отримати з експлуатаційної характеристики турбіни (рисунок 3.2 [39]) і застосовувати для прогнозування роботи гідроагрегату в

різних режимах.

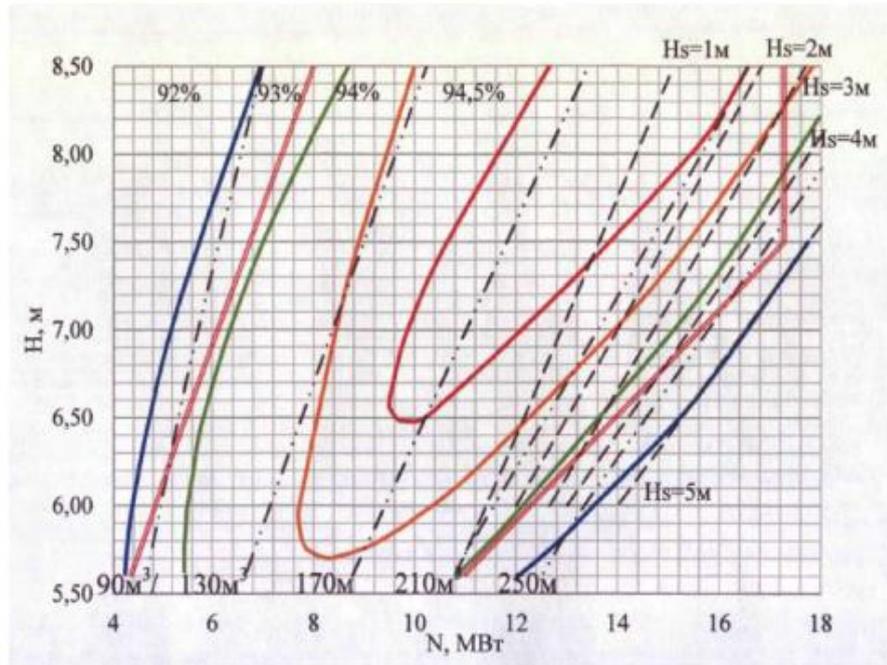


Рисунок 3.2 – Графіки залежності потужності від напору водяного потоку (експлуатаційні характеристики поворотно-лопатевої турбіни)

$$N_{T_i} = \frac{N_{G_i}}{\theta_i(N_{G_i})}, \quad (3.5)$$

де $\theta_i(N_{G_i})$ – залежність ККД гідрогенератора від його потужності.

Для опису енергетичної характеристики гідротурбін використовують такі методи:

Табличний вигляд із лінійною інтерполяцією – дозволяє використовувати готові експлуатаційні дані і знаходити значення між точками вимірювань.

Поліном до 4 ступеня – забезпечує гладке відтворення залежності, зручне для чисельних розрахунків.

Непараметричні моделі інтерполяції – гнучкий метод, який дозволяє описати складні залежності без введення конкретної функціональної форми.

Залежності ККД гідрогенератора від потужності на валу гідротурбіни ($\eta(P_{\text{турбіни}})$) та від потужності генератора ($\eta(P_{\text{генератора}})$) наведені на рисунку 3.3. Вони демонструють, що ефективність роботи гідроагрегату змінюється в залежності від режиму експлуатації, і для точного розрахунку слід враховувати конкретну точку роботи турбіни та генератора.

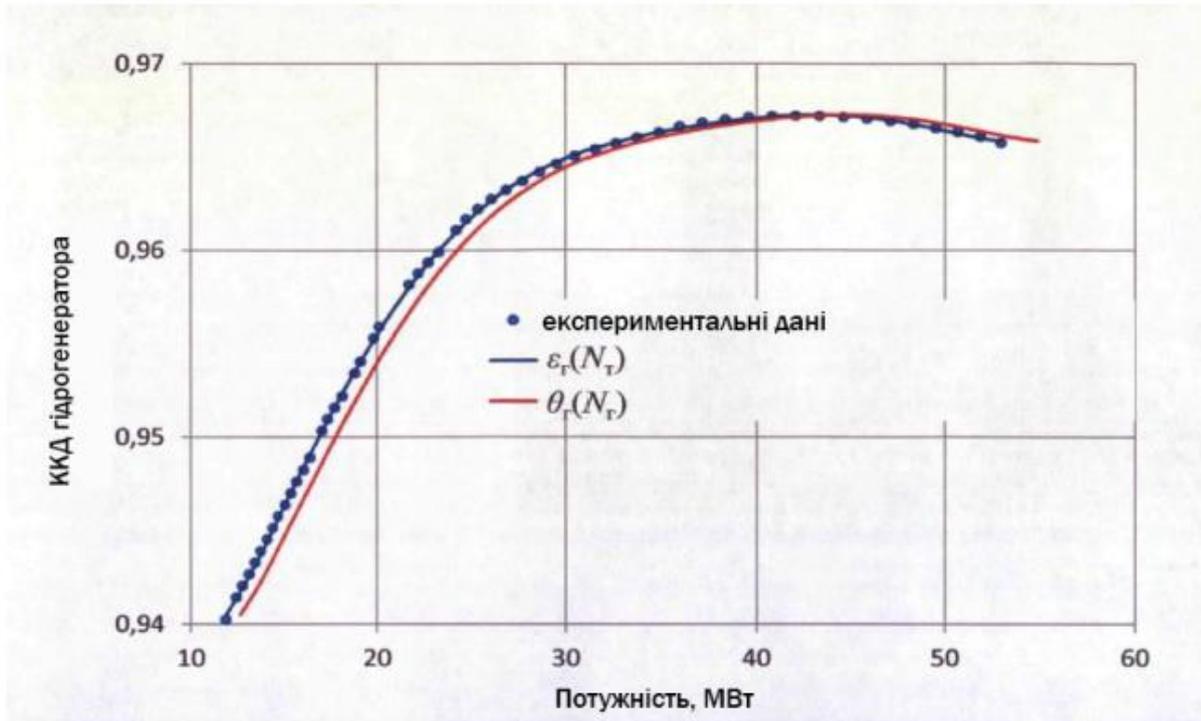


Рисунок 3.3 – Вид характеристики гідрогенератора ($\cos\varphi = 0,8$)

Врахування втрат напору. Повна втрата напору в напірному трубопроводі H складається з втрати на тертя по довжині труб Δh_l і суми втрат на подолання місцевих опорів Σ :

$$\Delta H_{\text{тр}} = \Delta h_l + \Sigma h_m, \quad (3.6)$$

Втрати напору по довжині виражаються через швидкісний напір відповідно до залежності Вейсбаха-Дарсі [36]:

$$\Delta h_l = I \cdot l_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} \frac{\lambda_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3.7)$$

де $l_{\text{тр}}$ – довжина трубопроводу, м; I – гідравлічний ухил; $\lambda_{\text{тр}}$ – коефіцієнт опору тертю.

Під час визначення втрат напору враховується турбулентний режим течії води.

Коефіцієнт λ може бути отриманий як за довідковими таблицями, так і з використанням емпіричних залежностей Блазіуса, Альтшуля чи Шіфрінсона.

Локальні втрати напору виникають у ділянках трубопроводу, де відбувається зміна його діаметра, напрямку руху потоку (наприклад, на поворотах або вигинах),

залежать від квадрата швидкості та можуть визначатися за формулою Вейсбаха [40]:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (3.8)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору.

Таким чином, для турбулентного течії, використовуючи формулу Вейсбаха-Дарсі і виражаючи в ній швидкість через витрату води, отримуємо:

$$\Delta H_{\text{тр}i} = (Q_i)^2 \cdot K_{\text{тр}} = (Q_i)^2 \cdot \left(\sum \zeta + \lambda_{\text{тр}} \frac{l_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}} \right) \frac{16}{2g\pi^2(d_{\text{тр}})^4}, \quad (3.9)$$

$K_{\text{тр}}$ – величина, яка називається опором трубопроводу.

Втрати напору в напірному трубопроводі ГАЕС є важливим параметром для оцінки ефективності роботи гідроагрегату. На рисунку 3.4 показано залежність втрат напору від витрати води через турбіну.

Пояснення явищ:

Динамічні коливання тиску – при зміні витрати води в трубопроводі виникають перехідні процеси, відомі як гідроудар.

Позитивний гідроудар – зниження витрати води призводить до різкого підвищення тиску і, як наслідок, збільшення напору на гідроагрегаті.

Негативний гідроудар – збільшення витрати води викликає тимчасове падіння напору, що затримує зростання потужності турбіни.

Таким чином, хоча гідроудари формують короточасні коливання напору, їх вплив на середню вироблену потужність електростанції мінімальний, і в розрахунках середніх режимів генерації ними можна знехтувати.

Це означає, що при плануванні роботи ГАЕС для акумуляції та генерації електроенергії основний упор роблять на середню витрату і напір, а не на короточасні коливання тиску.

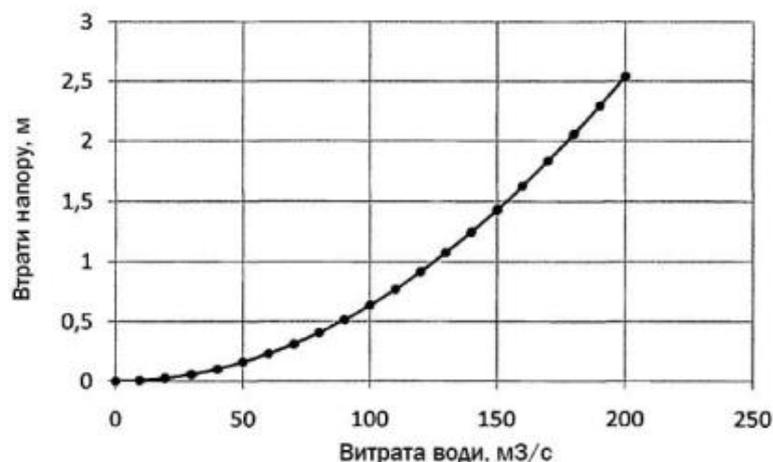


Рисунок 3.4 – Залежність втрат напору $\Delta H_{\text{тр}i}$ у трубопроводі i від витрати води через гідроагрегат Q_i

Модель процесу перетворення потенційної енергії в електричну у гідравлічній системі накопичення

Перетворення потенціальної енергії, накопиченої в гідроаккумуляторі, в електричну енергію здійснюється таким чином: вода з верхнього резервуара спрямовується на лопатки гідротурбіни, змушуючи її обертатися, а турбіна, у свою чергу, приводить у рух якор генератора постійного струму. Відомо, що електрорушійна сила, яка виникає в якорі машини постійного струму, прямо залежить від швидкості його обертання та величини магнітного потоку збудження.

$$E_{\text{я}} = \Phi_{\text{з}} n \left(\frac{\pi D}{60} l N \frac{1}{S} \right), \quad (3.10)$$

де $E_{\text{я}}$ – електрорушійна сила якоря машини постійного струму, В;

$\Phi_{\text{з}}$ – магнітний потік збудження, Вб;

n - частота обертання якоря, об / хв;

D - діаметр якоря, м;

l - активна довжина провідника, м;

N - число провідників обмотки якоря;

S - перетин поверхні полюса, м².

Параметри, що подані в дужках, залежать від конструктивних особливостей і залишаються незмінними для конкретної машини. Тому їх зазвичай об'єднують у коефіцієнт C_e . У результаті формула для обчислення електрорушійної сили якоря набуває такого вигляду:

$$E_{\text{я}} = \Phi_{\text{з}} n C_{\text{е}}, \quad (3.11)$$

Коли збудження здійснюється за допомогою постійних магнітів, магнітний потік збудження не змінюється. Тому електрорушійна сила якоря в такій машині залежить виключно від швидкості його обертання.

$$E_{\text{я}} = n, \quad (3.12)$$

Якір генератора механічно пов'язаний з гідротурбіною, яка обертається під дією водяного потоку. Відомо, що частота обертання турбіни визначається величиною напору та витратою води. Остання може бути розрахована за формулою:

$$Q = V_{\text{в}} S, \quad (3.13)$$

де Q – витрата води, $\text{м}^3 / \text{год}$;

$V_{\text{в}}$ – швидкість потоку води, $\text{м} / \text{год}$;

S – площа перетину через який протікає вода, м^2 .

Зростає потужність при зміні відстаней між рівнями:

$$N_{\text{г}} = P_{\text{ст}} Q, \quad (3.14)$$

де $P_{\text{ст}}$ – тиск стовпа води, Па ;

Q – витрата води через гідротурбіну, $\text{м}^3 / \text{год}$.

Зі збільшенням висоти стовпа, зростає і тиск:

$$P_{\text{ст}} = \rho g h, \quad (3.15)$$

де ρ – щільність води, $\text{м}^3 / \text{кг}$;

h – висота стовпа води, м .

3.2 Методика визначення вітроенергетичного потенціалу для конкретного об'єкта

Обсяг енергії, яку може виробляти вітроелектростанція (ВЕУ), у значній мірі залежить від швидкості вітру, тому для ефективного проектування та експлуатації об'єктів вітроенергетики критично важливо знати вітровий потенціал

регіону.

Вітрові ресурси зазвичай оцінюють за двома основними параметрами: швидкістю вітру та щільністю ймовірності потужності, що дозволяє визначити потенціал енергії вітру в конкретній території.

На загальнодержавному рівні інформація про вітрові ресурси використовується для стратегічного планування та включає: розподіл вітроенергетичних ресурсів по регіонах; частку від загального споживання електроенергії, яку можна забезпечити за рахунок вітру; можливості використання наявного потенціалу.

На місцевому рівні, або для потенційного інвестора, важливо визначити: енергетичний потенціал вітру у конкретній точці; прогнозований обсяг електроенергії, що виробляється ВЕУ протягом року; вартість виробленої електроенергії; термін окупності проекту; варіації швидкості вітру та щільність енергії вітру.

Для отримання таких даних традиційно проводять інструментальні виміри швидкості вітру на рівні обертання турбіни протягом, щонайменше, одного року. Однак цей метод є дорогим і тривалим.

Альтернативним підходом є використання спеціального програмного забезпечення, що враховує орографію, характеристики земної поверхні та наявність перешкод, що дозволяє створювати комп'ютерні моделі швидкості вітру на великих територіях. Результати таких досліджень оформляються у вигляді Вітрового Атласу (Wind Atlas), де швидкість та щільність енергії вітру представлені контурними або градуйованими картами.

Проте карти не замінюють інструментальних вимірів – вони лише допомагають визначити регіон для детальніших досліджень та вибрати конкретне місце для встановлення вимірювальної апаратури.

З огляду на випадковий характер швидкості вітру, потужність ВЕУ розглядають як стохастичну величину, функціонально залежну від швидкості вітру. Так, швидкість вітру, що змінюється випадково, може бути представлена у вигляді годинних вимірів протягом року – як показано на рисунку 3.5, де здійснено 8784 виміри, по одному на кожну годину року.

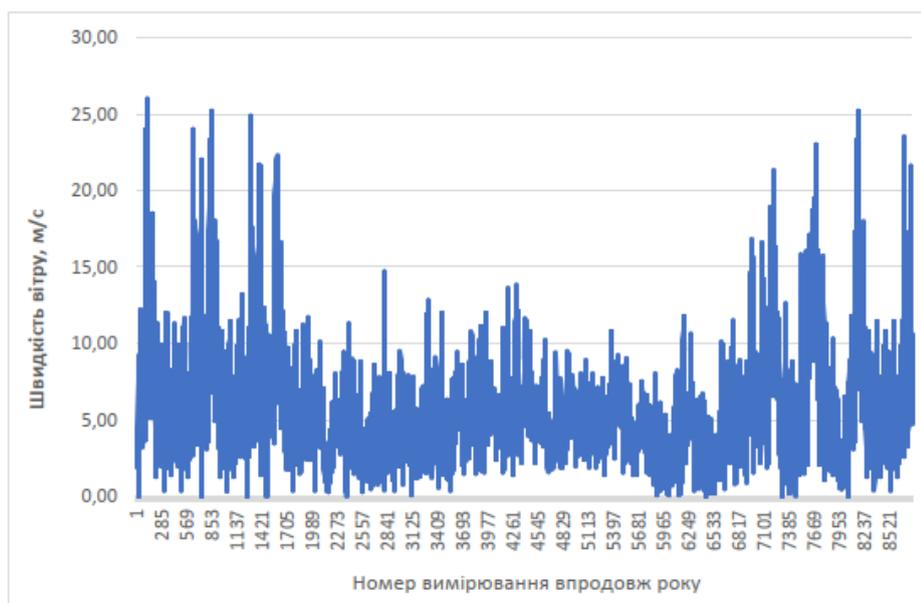


Рисунок 3.5 – Варіація швидкості вітру протягом року

Середня питома потужність вітроелектростанції (ВЕУ), або середня щільність потужності на одиницю площі, є ключовим показником для оцінки вітрового потенціалу місцевості. Вона визначається на основі середньої швидкості вітру та розраховується за формулою, наведеною в джерелі [43].

$$N = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n p_i V_i^3, \quad (3.15)$$

де n – кількість вимірів швидкості вітру, здійснених протягом аналізованого періоду часу;

p_i – густина повітря на момент i -го виміру ($\text{кг}/\text{м}^3$), $p=1.225 \text{ кг}/\text{м}^3$ за нормальних умов;

V_i – швидкість вітру на момент i -го виміру ($\text{м}/\text{с}$).

Особливістю цієї формули є те, що питома потужність пропорційна кубу швидкості вітру, тому навіть невелике збільшення швидкості вітру призводить до значного зростання потужності. Це зумовлює необхідність врахування повторюваності різних швидкостей вітру на рівні осі вітроколеса, а не просто середньої швидкості за певний період. Використання лише середнього значення швидкості для оцінки енергії ВЕУ може призвести до значних помилок, оскільки розподіл швидкостей вітру за часом нерівномірний.

Для більш точного визначення середньої питомої потужності застосовується

інтегральний підхід, який дозволяє врахувати частку часу, протягом якого швидкість вітру перебуває у певному інтервалі. Інтеграл оцінюється інтегральною сумою, де:

$$N = \frac{1}{2} \bar{p} \int_0^{\infty} f(v) \cdot v^3 dv, \quad (3.16)$$

де \bar{p} – середня густина повітря;

$f(v)$ – диференційна функція щільності розподілу швидкостей вітру.

Наведений інтеграл можна оцінити інтегральною сумою як:

$$N = \frac{1}{2} \bar{p} [p(v_1) \cdot v_1^3 + p(v_2) \cdot v_2^3 + \dots + p(v_n) \cdot v_n^3], \quad (3.17)$$

де $v_{1, 2, 3 \dots n}$ – значення швидкостей вітру для середини інтервалів;

$p(v_{1, 2, 3 \dots n})$ – повторюваність інтервалів.

Функція щільності ймовірності швидкості вітру визначає частку часу, коли швидкість вітру знаходиться в межах заданого інтервалу

Іншими словами, ця функція характеризує ймовірність того, що швидкість вітру перебуває між v_{\min} та v_{\max} , визначеними під час вимірювань. Для даного дослідження

Діапазон швидкостей розбивається на рівних інтервалів, зазвичай від 0,1 до 1 м/с. В нашому випадку обрано інтервал

Швидкість для кожного інтервалу береться як середнє значення меж інтервалу. Наприклад, для інтервалу від 2 до 3 м/с середня швидкість приймається рівною 2,5 м/с.

Далі проводиться аналіз усіх 8784 годинних вимірювань протягом року для визначення кількості випадків, що припадають на кожен інтервал. Результати такого аналізу зручно представляти у вигляді таблиці (наприклад, таблиця 3.1), що відображає частку часу для кожного інтервалу швидкостей вітру.

Такий підхід дозволяє не лише точніше оцінити потужність ВЕУ, а й визначити очікуваний обсяг виробленої електроенергії для конкретного місця установки вітротурбіни.

Таблиця 3.1 – Ймовірність швидкості вітру по інтервалах

Інтервали швидкості вітру, м/с	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
Кількість значень на даному інтервалі	160	447	928	1361	1373	1208	905	669	410	285	243	183	146
Повторюваність, %	1,82	5,09	10,56	15,49	15,63	13,75	10,3	7,61	4,67	3,24	2,77	2,0	1,66
Інтервали швидкості вітру, м/с	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26
Кількість значень на даному інтервалі	104	66	61	62	55	27	27	19	14	10	11	6	4
Повторюваність, %	1,18	0,75	0,69	0,71	0,63	0,31	0,31	0,22	0,16	0,11	0,12	0,07	0,045

Згідно таблиці реалізовано графік:

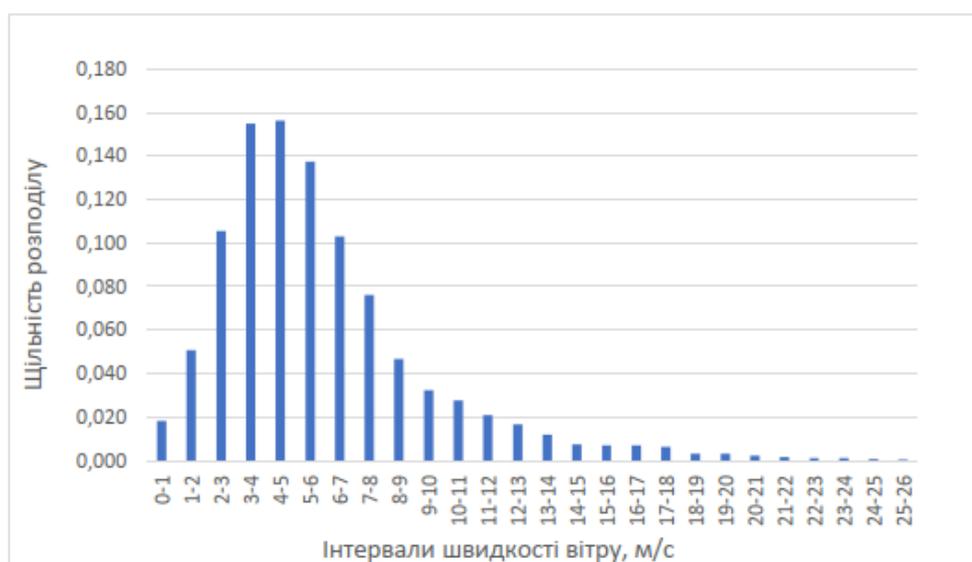


Рисунок 3.6 – Щільність розподілу швидкості вітру

Значення ймовірнісної щільності потужності, необхідні для підстановки у формулу (3.3), подані в таблиці 3.2 та проілюстровані на рисунку 3.7.

Таблиця 3.2 – Щільність ймовірності потужності по інтервалах

Інтервали швидкості вітру, м/с	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13
Середнє значення інтервалу, м/с	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50	8,50	9,50	10,50	11,50	12,50
Щільність ймовірності потужності	0,005	0,105	1,011	4,068	8,724	14,01	17,33	19,68	17,56	17,04	19,61	19,4	19,88
Інтервали швидкості вітру, м/с	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26
Середнє значення інтервалу, м/с	13,50	14,50	15,50	16,50	17,50	18,50	19,50	20,50	21,50	22,50	23,50	24,50	25,50
Щільність ймовірності потужності	17,84	14,03	15,84	19,42	20,55	11,92	13,96	11,41	9,7	7,94	9,95	6,15	4,62



Рисунок 3.7 – Щільність ймовірності потужності

Середня питома потужність, визначена на основі середньорічної швидкості вітру та розрахована за даними погодинних вимірювань швидкості протягом року (3.15), дорівнюватиме:

$$N = \frac{1}{2} \cdot 1,225_{\text{кг/м}^3} \cdot 5,86174^3_{\text{м/с}} = 123,36_{\text{Вт/м}^2}.$$

Питома потужність, розрахована через інтегральну суму (3.22):

$$N = \frac{1}{2} 1,225_{\text{кг/м}^3} \sum_{i=1}^{24} V_i^3 F(V_i) = 321,8_{\text{Вт/м}^2}$$

Отримане значення суттєво перевищує результат, визначений лише за середньою швидкістю вітру. Максимальні значення ймовірнісної щільності потужності спостерігаються в діапазоні швидкостей 6–18 м/с, тоді як найбільш ймовірна швидкість становить 3–7 м/с. Отже, моделювання може виконуватися як безпосередньо за швидкістю вітру, так і за виробленою потужністю ВЕУ, які описуються однією і тією самою функцією розподілу щільності.

Існує кілька способів подання залежності потужності вітроенергетичної установки; виробники зазвичай надають її у вигляді таблиць або графіків, що отримали назву кривої потужності ВЕУ.

Використовуючи дані вимірювань швидкості вітру, побудовано діаграму зміни швидкості протягом доби та різних сезонів (рисунок 3.8).

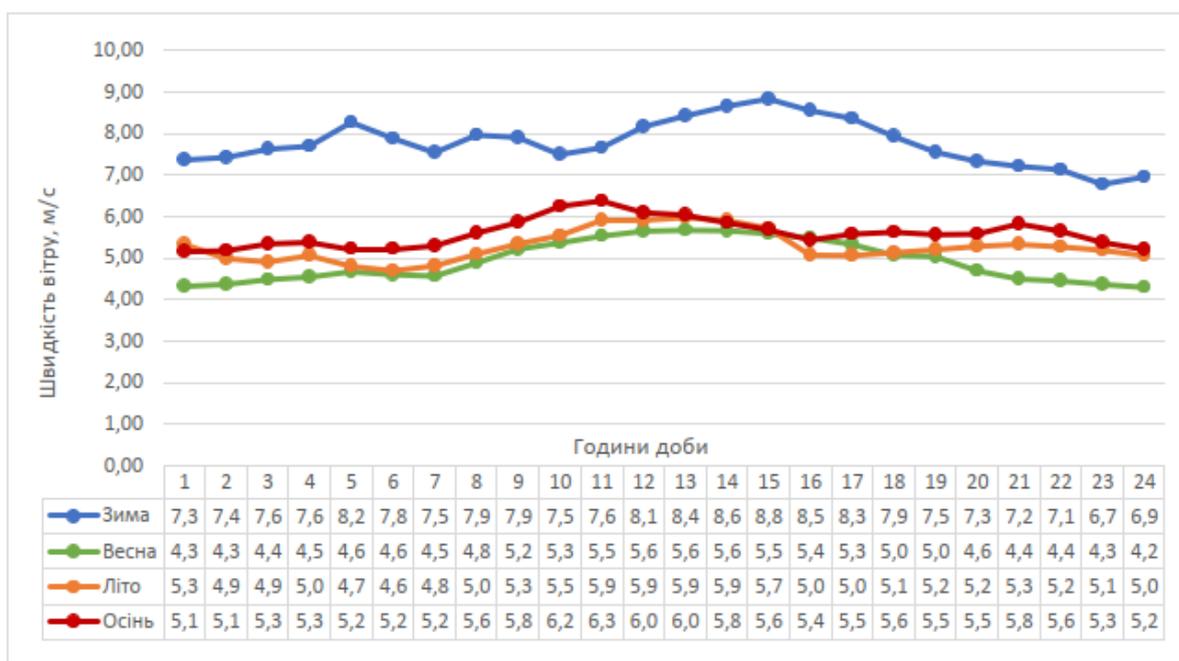


Рисунок 3.8 – Залежність швидкості вітру від часу доби

3.3 Розрахунок споживання електроенергії та вибір електричного обладнання для сільськогосподарського об'єкту

У якості об'єкта електропостачання розглянуто фермерське господарство Хмельницької області Кам'янець-Подільського району, що займається відгодівлею свиней.

На свинофермах електроенергія споживається для приготування кормів, у деяких випадках — для їх роздачі, а також для забезпечення водопостачання, опалення та освітлення приміщень.

Дані щодо встановленої потужності, тривалості використання обладнання та річного споживання електроенергії у фермерському свинарському господарстві зведено в таблицю 3.3.

P_e – встановлена потужність споживачів електроенергії;

$T_{вик}$ – кількість годин використання на рік;

$W_{рік}$ – річне споживання електроенергії.

Таблиця 3.3 – Показники встановленої потужності, кількості годин використання та річного споживання електроенергії

Процес, агрегат	P_e , кВт	$T_{вик}$, год	$W_{рік}$, кВт·год
1. Освітлення, інфрачервоне освітлення	0,8	5840	4672
2. Приготування кормів			
- мийка корнеклубнеплодів	1	1095	1095
- корморізка	1,4	1095	1533
- запарник-змішувач	2	1095	2190
- водонагрівач	1	1095	1095
3. Мікроклімат			
- вентиляція	0,9	8760	7884
- опалення	5	3600	18000
4. Водопостачання	0,5	1095	548
Разом	12,6		37016

Рівень споживаної потужності значною мірою визначається використанням

систем опалення, тому були побудовані графіки електричних навантажень для теплих і холодних днів року (рисунки 3.9 та 3.10 відповідно). Відповідні дані також наведено у табличній формі в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Споживана потужність в залежності від часу доби та сезону

Літній період		Зимовий період	
Години доби	Споживана потужність, кВт	Години доби	Споживана потужність, кВт
0-1	1,7	0-1	6,7
1-2	1,7	1-2	6,7
2-3	1,4	2-3	6,4
3-4	1,7	3-4	6,7
4-5	1,7	4-5	6,7
5-6	1,9	5-6	6,9
6-7	4,1	6-7	9,1
7-8	3,7	7-8	8,7
8-9	0,9	8-9	5,9
9-10	1,7	9-10	6,7
10-11	1,7	10-11	6,7
11-12	1,4	11-12	6,4
12-13	2,7	12-13	7,7
13-14	4,1	13-14	9,1
14-15	2,9	14-15	7,9
15-16	1,7	15-16	6,7
16-17	1,7	16-17	6,7
17-18	1,4	17-18	6,4
18-19	1,7	18-19	6,7
19-20	2,7	19-20	7,7
20-21	3,3	20-21	8,3
21-22	3,7	21-22	8,7
22-23	1,7	22-23	6,7
23-24	0,9	23-24	5,9



Рисунок 3.9 – Графік електричних навантажень для літнього періоду



Рисунок 3.10 – Графік електричних навантажень для зимового періоду

Графіки електричних навантажень демонструють три пікові періоди споживання електроенергії: ранковий — приблизно з 7 до 8 години, обідній — з 13 до 15 години та вечірній — з 20 до 22 години. У ці години разом із опалювальними приладами, освітленням і вентиляцією активно працює обладнання для приготування кормів.

На основі проведеного аналізу даних щодо:

- питомої потужності (3.17);
- швидкості вітру залежно від сезону та часу доби (рисунок 3.8);
- графіка електричних навантажень об'єкта електропостачання;

– технічних характеристик ВЕУ [44], для забезпечення електроенергією споживачів фермерського господарства було обрано дві вітроенергетичні установки моделі «EuroWind 10». Технічні параметри цієї моделі наведено в додатку Б [44].

Залежність потужності ВЕУ від швидкості вітру представлено на рисунку 3.11[44].

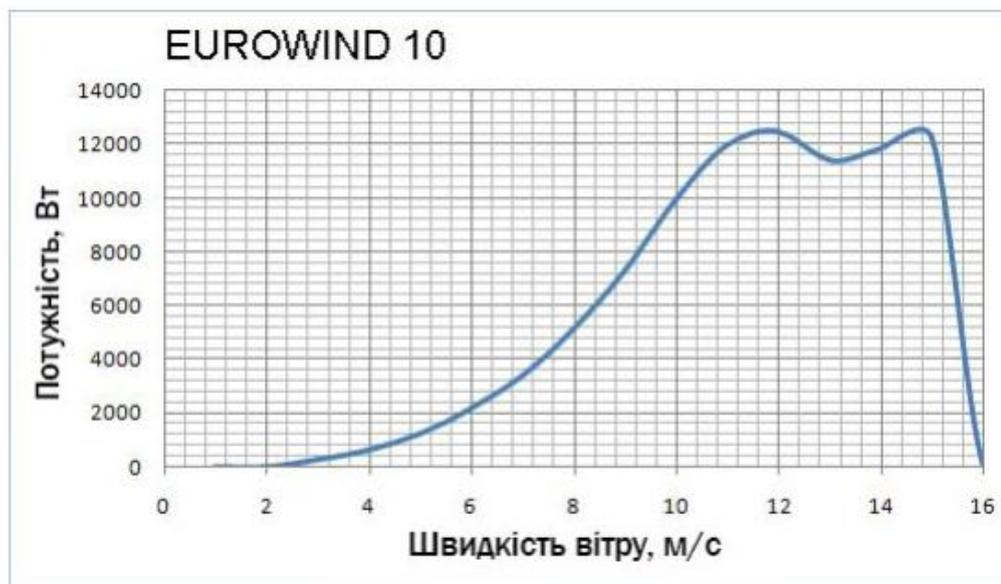


Рисунок 3.11 – Графік залежності потужності від швидкості вітру.

Висновки до 3 розділу

Проведені розрахунки, що ґрунтувалися на обробці емпіричних даних (вимірних значень швидкості вітру), однозначно підтвердили наявність достатнього вітропотенціалу у вибраному регіоні. Це створює надійну основу для економічно виправданого використання промислових вітротурбін (ВЕУ) з метою енергозабезпечення об'єкта.

Важливо, що розроблена методика визначення вітроенергетичного потенціалу є універсальною та масштабованою. Вона може бути успішно адаптована та застосована для попередньої оцінки доцільності встановлення ВЕУ в будь-яких інших географічних місцях планованого розміщення. Це забезпечує можливість тиражування досвіду та обґрунтованого вибору локації.

Незважаючи на підтверджений потенціал, ключовою інженерною проблемою залишається мінливість робочих характеристик ВЕУ у часі. Робота

вітротурбін залежить від природних умов, що призводить до періодів, коли швидкість вітру може бути нульовою або критично недостатньою для повного покриття енергетичних потреб споживачів.

Саме тому для гарантування безперервності та надійності електропостачання, необхідно комплексно враховувати ці періоди дефіциту генерації.

Ключовим рішенням для часткової, а іноді й повної компенсації впливу цієї стохастичної мінливості є інтеграція засобів акумулювання енергії.

Накопичувачі дозволяють:

- Накопичувати надлишкову енергію під час піків вітрової активності.
- Видавати накопичену енергію у періоди низької швидкості вітру (штилю).

Таким чином, використання акумулювальних систем перетворює стохастичне джерело енергії на надійний та прогнозований компонент загальної енергетичної системи об'єкта.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ГІДРОАКУМУЛЮВАННЯ

4.1 Вибір оптимальних параметрів комбінованої енергосистеми з ВДЕ

З огляду на особливості автономних електростанцій на основі технологій відновлюваної енергії (ТВЕ), основною проблемою є стохастичність надходження енергетичних потоків, зумовлена мінливістю швидкості вітру або інтенсивності сонячного випромінювання. Через це для забезпечення високого рівня надійності електропостачання автономні системи повинні мати резервні джерела енергії або використовувати акумулювання енергії.

Важливим аспектом є те, що параметри окремих складових автономних електростанцій – власне перетворювачі енергії ТВЕ, резервні паливні електростанції та акумулятори енергії – перебувають у певній суперечності. Зокрема, збільшення потужності одного елемента може зменшувати ефективність або економічну доцільність іншого. Це змушує шукати оптимальні параметри, які забезпечують максимальну ефективність та конкурентоспроможність системи, особливо для комбінованих електростанцій (КЕС) з використанням вітроустановок.

Загальні вимоги до автономних електростанцій включають:

- Необхідний рівень надійності енергозабезпечення, тобто ймовірність безперебійного забезпечення споживача електроенергією протягом заданого періоду.
- Мінімальна вартість одержуваної електроенергії при дотриманні першої умови.
- Максимальна економія викопного палива у разі використання ТВЕ з резервними генераторами.
- Зменшення негативного впливу на навколишнє середовище завдяки заміні або зменшенню використання традиційних джерел.
- Безпечна експлуатація автономних електростанцій.
- Максимальне використання потенційних можливостей регіону, таких як

вітровий або сонячний ресурс.

Серед цих вимог перші дві – рівень надійності та мінімальна вартість електроенергії – є ключовими, оскільки саме вони визначають можливість виконання всіх інших вимог. Їх реалізація безпосередньо залежить від основних параметрів автономної електростанції, а саме: робочої швидкості вітру; типу та розмірів вітроенергетичної установки; потужності резервної електростанції; ємності акумуляторів енергії.

Як критерій оптимальності системи КЕС пропонується використовувати питому вартість встановленої потужності, яка дозволяє врахувати співвідношення між капіталовкладеннями та виробленою енергією, при накладенні обмежень на рівень надійності електропостачання та доступність ресурсів.

$$P(E_e \geq E_{потр}) \geq A$$

де $P(E_e \geq E_{потр})$ – ймовірність того, що протягом заданого періоду автономна електростанція виробить електроенергії не менше, ніж потрібно споживачу;

E_e – електроенергія, що виробляється автономною електростанцією за аналізований період;

$E_{потр}$ – потреба в електроенергії за аналізований період;

A – заданий рівень ймовірності енергозабезпечення.

Оптимізація автономних систем електропостачання (АСЕП) на основі вітрових електростанцій (ВЕУ) з гідравлічним акумулюванням. Основна особливість таких систем полягає в некерованості енергетичних потоків, що обумовлює розбіжність між виробленою та споживаною енергією. Це може проявлятися у трьох ситуаціях:

Вироблена електроенергія перевищує потреби споживача.

Вироблена електроенергія відповідає споживанню.

Вироблена електроенергія не забезпечує повністю потреб споживача.

Щоб узгодити графіки надходження та споживання енергії, застосовують акумулювання енергії або резервування, зокрема перспективними є гідравлічні акумулятори енергії, які можуть частково або повністю замінювати

електрохімічні акумулятори.

При проектуванні системи необхідно здійснити вибір найбільш доцільного варіанта акумуляування, спираючись на детальний техніко-економічний аналіз. До технічних показників належать надійність системи, зручність експлуатації, частота і обсяг ремонтів, ступінь автоматизації. До економічних – капітальні вкладення та поточні експлуатаційні витрати.

Для оцінки економічності часто використовують метод терміну окупності, який співставляє капітальні та експлуатаційні витрати. При рівності вартості різних варіантів перевага надається тому, що має кращі технічні показники. Водночас, розрахунки повинні враховувати похибки, пов'язані з неточністю вихідних даних і застосуванням узагальнених показників.

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) рекомендує не обмежуватися лише традиційним показником вартості електроенергії, а оцінювати загальну ефективність технології на системному рівні. У даній роботі доцільно враховувати «загальносистемну цінність» (system value, SV) виробленої електроенергії, що включає:

зменшення негативного впливу на екологію (зокрема, за рахунок зниження використання електрохімічних батарей);

скорочення викидів CO₂ та інших забруднювачів;

зменшення навантаження на централізовану систему електропостачання.

Таким чином, критерій оптимальності АСЕП на основі ВЕУ з гідравлічним акумуляуванням повинен враховувати не лише вартісні показники виробленої електроенергії, а й її загальносистемну цінність, забезпечуючи екологічну та економічну ефективність системи для енергозабезпечення конкретного об'єкта, наприклад фермерського господарства.

4.2 Моделювання та розрахунок економічних показників індивідуальних енергетичних проектів

Приведена вартість енергії (Levelized Energy Cost, LEC або Levelized Cost of Energy, LCOE) є одним із найпоширеніших і водночас універсальних показників для оцінки загальної конкурентоспроможності різних технологій виробництва

електроенергії, що дозволяє інтегрувати у порівняльний аналіз як технічні, так і економічні аспекти функціонування енергетичних установок. Вона характеризує середню розрахункову собівартість виробництва електроенергії протягом усього життєвого циклу енергоустановки, включаючи всі капітальні та експлуатаційні витрати, а також можливі доходи чи фінансові надбавки. До складових витрат, що враховуються при розрахунку LEC, належать витрати на науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, проектування системи, будівництво, доставку обладнання та монтаж об'єкта, сплату відсотків за користування банківськими позиками, а також поточні витрати на технічне обслуговування, ремонт і модернізацію. Крім того, при визначенні приведеної вартості енергії враховується коефіцієнт використання встановленої потужності для кожного типу установки, що дає змогу оцінити реальну продуктивність системи, а також фактичний обсяг виробленої електроенергії за відповідний період експлуатації. Такий підхід дозволяє не лише порівнювати різні технології виробництва енергії за економічною ефективністю, але й здійснювати обґрунтоване планування інвестиційних проєктів, визначати доцільність впровадження відновлюваних джерел енергії, оцінювати термін окупності інвестицій та визначати оптимальні тарифи на електроенергію. Водночас LEC враховує комплексний вплив надійності, ресурсозбереження та довговічності обладнання, що робить його ефективним інструментом для аналізу економічної доцільності автономних електростанцій на основі вітроенергетичних установок із гідравлічним акумулюванням, де стохастичність енергетичних потоків потребує врахування додаткових резервів та акумуляторних систем для забезпечення стабільного енергопостачання. Таким чином, приведена вартість енергії виступає ключовим критерієм при прийнятті рішень щодо вибору технологій, планування інвестицій та оцінки загальної ефективності енергетичних систем(рисунок 4.1) [47].



Рисунок 4.1 – Компоненти LCOE

Особливо стрімко методологія моделювання на основі концепції LCOE розвивається протягом останніх років, що зумовлено трансформацією ринкових відносин, активним впровадженням принципів дерегуляції економічних процесів у сфері енергетики, а також високими темпами розвитку та поширення технологій вироблення електроенергії з відновлюваних джерел, зокрема вітрових електростанцій, у провідних країнах світу [48]. Конкретна форма моделі LCOE залежить від деталізації наявних даних та специфіки обраного енергетичного проекту, що зумовлює існування численних підходів до побудови модельних конструкцій для її розрахунку. Одним із ключових факторів, який суттєво впливає на коректність результатів техніко-економічних розрахунків, є достовірність вихідних припущень щодо поведінки фінансово-економічної системи на державному та світовому рівні, оскільки на нормовану вартість електроенергії безпосередньо впливають усі закладені розробником господарські операції та грошові потоки протягом усього життєвого циклу енергетичного об'єкта.

Перед виконанням моделювання життєвого циклу енергоустановки необхідно визначити правила та економічні умови, за яких будуть здійснюватися співставні техніко-економічні розрахунки [48]. Оскільки оцінка здійснюється у певних грошових одиницях, першим кроком є визначення номінальної валюти та фіксація її вартості на опорну дату або рік дослідження. Дослідники рекомендують застосовувати ринкові процедури для визначення усіх складових

вартості на всіх етапах проекту, починаючи з вибору та підготовки земельної ділянки, утилізації залишків існуючих конструкцій, умов землекористування, проектування, постачання обладнання, формування витрат на монтаж та супровід будівельних робіт, організацію роботи персоналу компанії-забудовника, до витрат на експлуатаційний супровід протягом гарантійного періоду та постгарантійного обслуговування, а також страхування різноманітних ризиків [49]. Повний перелік таких припущень є індивідуальним для кожного дослідження; в даній роботі детальний аналіз повноти таких умов не проводиться, проте врахування економічної специфіки України та особливостей її тривалого перехідного періоду до ринкових механізмів є ключовим для отримання вірогідних результатів.

Для забезпечення співставності результатів доцільно визначити єдині одиниці вимірювання та позначення, які включають: макроекономічні показники за компонентами потужності, населення, обсягу виробництва, цін – станом на базовий рік (наприклад, 2018); коефіцієнти перерахунку між енергетичними та фізичними величинами за даними МЕА; одиниці Міжнародної системи СІ; обсяги інвестицій у USD/кВт встановленої потужності; потужність GW_t для теплової та GWe для електричної; вартість енергії в USD₂₀₁₈/кВт·год; коефіцієнт використання встановленої потужності Cf; грошовий потік CF та кумулятивний дисконтований грошовий потік (CDCF); відсоткову дохідність капіталу – 5, 10, 12 та 15 % [48]. Завдяки встановленню єдиного набору показників можна провести співставний аналіз різних проектів чи технологій, приводячи фінансові витрати, понесені у різні моменти часу, до обраної опорної дати.

Особливу увагу слід приділити диференціації дійсних і номінальних величин грошей та цін. Дійсні величини відображають реальну купівельну спроможність грошових потоків у фіксованій валюті, тоді як номінальні величини враховують інфляційні зміни, не коригуючи їх на купівельну спроможність. У разі розрахунків у грошових одиницях з дійсною вартістю, відповідні відсоткові ставки капіталу повинні також бути очищені від інфляційних компонентів. Неврахування цього аспекту часто призводить до використання процентних ставок, отриманих безпосередньо з ринкових спостережень, огляду банківських ставок або ринкових дисконтувань. Коректний розрахунок дійсних грошових

потоків та відсоткових ставок здійснюється із застосуванням відповідного індексу інфляції на основі співвідношень, що дозволяють трансформувати номінальні величини у реальні з урахуванням фактичних економічних умов [48, 49].

$$(1+R)=(1+r)\times(1+i), \quad (4.1)$$

де R – номінальна ставка, %; r – дійсна чи фіксована ставка, %; i – темп інфляції, %.

Чиста приведена вартість (Net Present Value, NPV) є ключовим показником ефективності інвестиційного проекту, що відображає величину коштів, яку інвестор очікує отримати після досягнення рівня безбитковості. Цей рівень характеризується тим моментом, коли сумарні грошові потоки від надходжень починають покривати первинні інвестиційні витрати та забезпечують компенсацію всіх періодичних грошових відтоків, пов'язаних із експлуатацією проекту. Таким чином, чиста приведена вартість дозволяє оцінити, наскільки економічно вигідним є впровадження енергетичної установки або комплексу установок, враховуючи всі фінансові ризики та часову вартість грошей.

Для визначення рівноважної ціни на енергопродукти, що виробляються установками нового енергетичного об'єкта за інвестиційним проектом, застосовують спеціалізовану форму виразу для розрахунку чистої приведеної вартості [49]. Цей вираз дозволяє привести усі майбутні грошові потоки до теперішньої вартості, враховуючи дисконтовану вартість інвестиційних витрат, періодичних витрат на експлуатацію та обслуговування, а також прогнозовані доходи від реалізації енергії. Такий підхід забезпечує об'єктивну оцінку економічної доцільності проекту та дає можливість встановити ціну на енергопродукти, яка дозволяє не лише покрити витрати, але й отримати очікуваний рівень прибутковості інвестора в умовах конкретного фінансово-економічного середовища.

Найбільша складність при розробленні моделей за концепцією LCOE полягає у визначенні та максимально повному врахуванні всіх поточних витрат протягом життєвого циклу енергетичного об'єкта, що наочно ілюструється на графіках, представлених на рисунку 4.2. До таких витрат належать не лише

капітальні вкладення та витрати на монтаж і постачання обладнання, але й поточні експлуатаційні витрати, витрати на технічне обслуговування, страхування, а також витрати, пов'язані з управлінням проектом. З іншого боку, для енергетичних проектів на основі технологій відновлюваних джерел енергії (ТВДЕ) основні невизначеності прогнозованих даних пов'язані із стохастичним характером надходження енергетичних потоків. У випадку вітроенергетичних установок (ВЕС), особливо наземних, найбільші коливання відбуваються через випадкові зміни швидкості та напрямку вітру, тоді як для сонячних фотогальванічних енергетичних установок (СФЕУ) та сонячних електростанцій з концентраторами сонячного проміння (СЕС) основною невизначеністю є первинна сонячна інсоляція, що змінюється в залежності від сезонності, погодних умов та географічного розташування об'єкта.

Прогнозовані значення нормованої собівартості виробництва енергії (LCOE) для різних технологій та різних рівнів ставок дисконту наочно представлені на рисунку 4.3 [47]. Ці графіки дозволяють порівняти ефективність різних енергетичних технологій, оцінити чутливість проекту до фінансових параметрів і врахувати невизначеності, пов'язані з природними факторами, що є критично важливим для прийняття рішень щодо інвестиційної привабливості та оптимального планування автономних і комерційних енергетичних об'єктів.

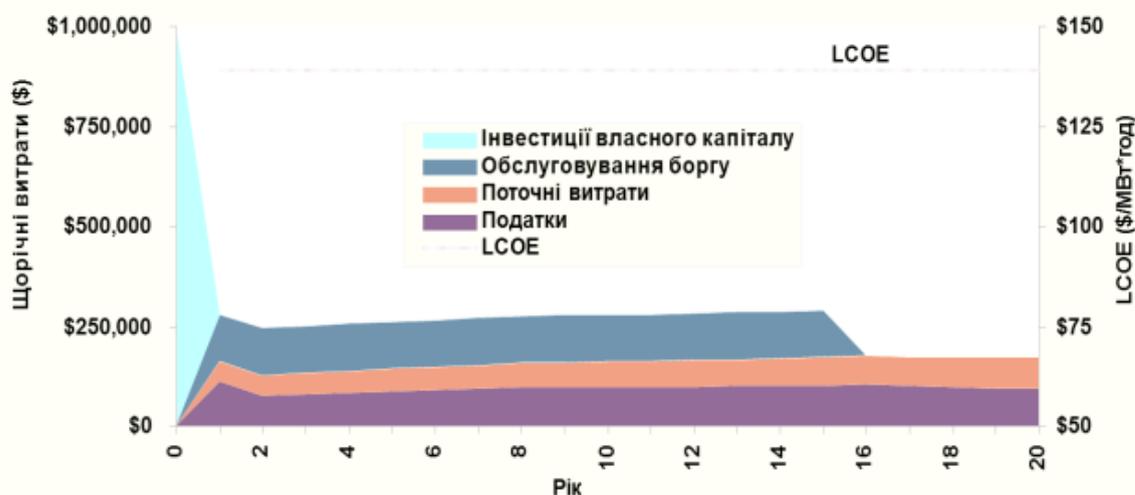


Рисунок 4.2 – Можлива динаміка приведених грошових витрат протягом терміну експлуатації

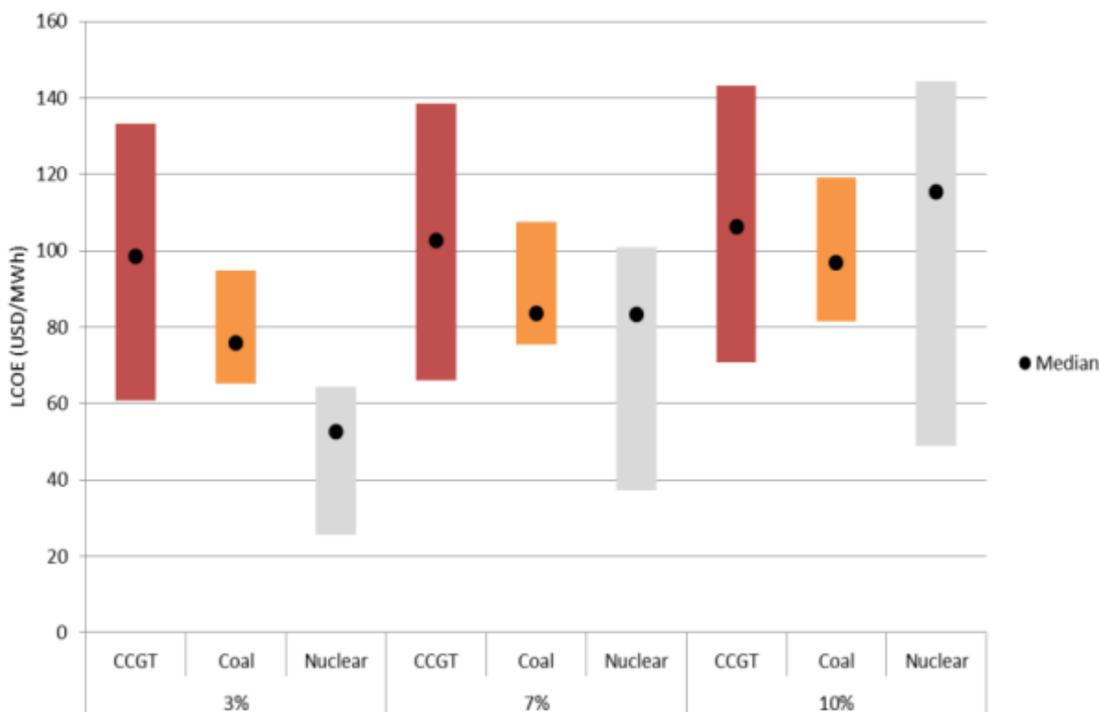


Рисунок 4.3 – Діапазони *LCOE* на генерування енергії газотурбінними, вугільними та атомними електростанціями за різних ставок дисконту

Вживані записи нормованої ціни виробництва енергопродуктів відображають центральну постановку задачі щодо розроблення розрахункової моделі *LCOE*, яка є придатною для всебічного аналізу прогнозних техніко-економічних показників енергетичного об'єкта. Основним завданням такої моделі є визначення значення кумулятивного доходу шляхом знаходження нормованої ціни енергопродукту

Л, при цьому дотримуються певні значення показників дохідності, зокрема внутрішнього коефіцієнту дохідності (*IRR*), відповідно до запису співвідношення (4.1). У контексті інвестиційних задач показник *IRR* також часто називають ставкою дохідності на дисконтований грошовий потік [50].

Повнота формулювання моделі значною мірою залежить від необхідності включення у розрахунок податкових пільг, відрахувань на амортизацію та інших фінансових механізмів, що безпосередньо впливають на економічну ефективність проекту. Такий підхід дозволяє враховувати всі можливі джерела доходу та витрат протягом життєвого циклу енергетичного об'єкта, забезпечуючи коректне порівняння різних варіантів реалізації проекту.

У практиці економіко-математичного моделювання найбільш широке застосування отримали три основні визначення нормованої ціни за схемою LCOE, які дозволяють комплексно оцінити ефективність інвестицій у різні технології виробництва енергії [49]. Такі підходи враховують варіабельність фінансових потоків, дисконтовану вартість капітальних та експлуатаційних витрат, а також можливості оптимізації структури доходів та витрат для підвищення економічної привабливості проекту. Ці визначення є основою для прийняття інвестиційних рішень, розрахунку тарифів на енергопродукти та стратегічного планування розвитку енергетичної інфраструктури.

1) Номінальна нормована ціна — застосовується у випадках, коли не враховується інфляція ($i = 0$). Формула для розрахунку нормованої ціни з урахуванням (4.5) записується у наступному вигляді:

$$L_{COE} = PV_{cost} / 8760 \cdot GW \cdot \sum_t^n \frac{C_{ft}}{(1+R)^t}. \quad (4.6)$$

2) дійсна нормована ціна за не нульової інфляції $i \neq 0$, визначають із врахуванням фактору інфляції протягом життєвого циклу об'єкта. Для цього номінальні прогностичні значення компонент $C_t^{O\&M}$ записують через їх дійсні прогностичні значення у t -му році експлуатації, застосували множник $(1+i)^t$:

$$PV_{cost} = C^{cap} + \sum_t^n \frac{C_t^{O\&M} (1+i)^t}{(1+R)^t} = C^{cap} + \sum_t^n \frac{C_t^{O\&M}}{(1+r)^t} \quad (4.7)$$

де r – дійсна ставка дисконту, %, визначається за співвідношенням (4.1); C^{cap} – загальна сума капітальних витрат на проектування будівництво й монтаж об'єкта, з урахуванням обслуговування заборгованості за користування банківською позикою. Нормовану ціну визначають за виразом (4.6) з урахуванням (4.7), причому в (4.6) слід прийняти $R = r$.

3) оцінка номінальної нормованої ціни, отриманої на основі фіксованої дійсної з урахуванням дії інфляційних чинників. Для її розрахунку поточні експлуатаційні витрати $C_t^{O\&M}$ враховують з показником річної інфляції $i \neq 0$ в термінах номінальної вартості грошей:

$$L_t = L_{COE} \cdot (1+i)^t \quad (4.8)$$

Враховуючи, що об'єктом дослідження є автономне господарство, не підключене до електричної мережі, а вибір віротехнічного обладнання здійснювався з урахуванням вітрового потенціалу місця розташування ВЕУ, у розрахункових формулах можна опустити показники встановленої потужності установки та коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП), використовуючи лише обсяг електроенергії, необхідний для забезпечення нормальної роботи всіх споживачів конкретного об'єкта:

$$LCOE = PV_{\text{cost}} / \sum_t^n \frac{Q_t}{(1+r)^t}, \quad (4.9)$$

У формулах (4.6)–(4.9) особливу увагу слід приділити визначенню показника C_{cap} — загальної суми капітальних витрат на проектування, будівництво та монтаж об'єкта з урахуванням обслуговування заборгованості (сплати відсотків за банківські позики). Саме ця складова витрат зазвичай демонструє найвищу чутливість у розрахунках. Проведення розрахункових експериментів з аналізу чутливості є ключовим етапом економіко-математичного моделювання енергетичної задачі. Результати такого аналізу дозволяють оцінити адекватність попередньо прийнятих припущень та підтвердити, що розроблена модель є достовірним та адаптованим інструментом для досліджень [49].

Для наочності відмінностей у базових визначеннях нормованої ціни виробництва на рисунку 4.4 наведено графічні залежності нормованих цін у розрізі по роках експлуатації.



Рисунок 4.4 – Базові визначення нормованої ціни на електроенергію

Орієнтовні дані наведено для ринкових умов країн Азійського регіону протягом 20 років, з використанням дисконту 10% та інфляції 2,5%. Розрахунки виконані у грошових одиницях КНР (юань, RMB2010).

Рівняння балансу грошових потоків (4.7) можна спростити для отримання розрахункових оцінок, розглядаючи його для будь-якого усередненого періоду t . При цьому передбачається, що потоки надходжень та витрат рівномірно розподіляються у часі (по роках), а технічні показники об'єкта залишаються незмінними та відповідають проектним значенням. Це дозволяє оперувати постійним значенням щорічного виробництва енергопродукту протягом усього життєвого циклу на рівні планового річного обсягу.

Для визначення вартості капітальних витрат за схемою LCOE сумарні капітальні витрати проекту розраховуються шляхом компаундування їх дійсної вартості (overnight cost) із зваженою середньою ставкою r_w відповідно до порядку фінансування — від початку будівництва до його завершення протягом терміну k років:

$$C^{cap} = \sum_t^n P_t \cdot \frac{C \cdot (1 + r_w)^k}{(1 + r_w)^{t-1}}, \quad (4.10)$$

де C – загальний обсяг фінансування будівництва визначений на початку фінансування; P_t – частка планових капітальних витрат в році t , %. Зважена середня ставка вартості капіталу r_w залежить від співвідношення між вартістю власного та позичкового капіталу, скерованого забудовником/власником на реалізацію проекту; часто позначають як WACC – Weighted Average Cost of Capital [50]. Найчастіше саме на цьому значенні ґрунтується вибір ставки дисконтування r у всіх записаних вище виразах, і вона є залежною від фінансових показників юридичної особи-власника проекту.

Для правильного врахування специфіки оподаткування дійсну вартість приведених капітальних витрат необхідно перевести у номінальні грошові одиниці. У цьому випадку рівняння (4.9) з урахуванням (4.1) приймає наступний вигляд:

$$C^{cap} = \sum_t^n P_t \cdot \frac{C \cdot (1+R)^k}{(1+R)^{t-1}}.$$

У разі, коли інвестиції розподіляються рівномірно протягом k років будівництва, на практиці для розрахунків застосовують поняття ефективних щорічних капітальних витрат (Equivalent Annual Cost – EAC).

$$EAC^{cap} = C/A_{n,r} = C \cdot CRF = C \cdot \left[\frac{r}{(1+r)^k - 1} + r \right] = C \frac{r(1+r)^k}{(1+r)^k - 1}, \quad (4.11)$$

де $1/A_{n,r}$ – коефіцієнт щорічної ренти або Capital Recovery Factor – CRF (також Fixed Charge Factor – FCF або annuity), причому (4.3) можна записати у вигляді:

$$PV_{cost} = \sum_t^n (EAC^{cap} + C_t^{O\&M}) / (1+r)^t, \quad (4.12)$$

нормована вартість енергопродукту L_t у періоді t визначається із (4.3) з урахуванням (4.5) і є незмінною протягом життєвого циклу:

$$L_t = EAC^{cap} + C_t^{O\&M} / Q_t = L_{COE}, \quad (4.13)$$

де Q_t – вироблена протягом одного періоду енергія з урахуванням припущення про незмінність у часі продуктивності енергоустановки.

Важливе значення має визначення структури капітальних витрат у контексті обраної моделі за схемою розрахунку нормованої ціни виробництва.

Для оцінки техніко-економічних показників застосовується модель життєвого циклу у вигляді дійсної номінальної нормованої ціни LCOE:

$$L_{COE} = \frac{C^{cap} + \sum_t^n \frac{C_t^{O\&M}}{(1+r)^t}}{\sum_t^n \frac{Q_t}{(1+r)^t}}. \quad (4.14)$$

Кумулятивний дисконтований грошовий потік (CDCFn) визначається як сукупність небалансу надходжень та витрат, накопичених по роках n , і виражається у доларах США:

$$CDDCF_n = \sum_{t=1}^n \left[\frac{Q_t}{(1+r)^t} \cdot L_t - \frac{C_t^{cap} + C_t^{O\&M}}{(1+r)^t} \right] \quad (4.15)$$

Дисконтування фінансових потоків полягає у приведенні вартості платежів, здійснених у різні моменти часу, до їхньої вартості на поточний момент. Кумулятивний дисконтований грошовий потік застосовується для економічної оцінки ефективності інвестицій або при використанні прибуткового підходу до оцінки вартості бізнесу.

Процес дисконтування відображає економічний принцип, згідно з яким наявна на сьогодні сума грошей має більшу реальну вартість порівняно з такою ж сумою через певний проміжок часу [51].

4.3 Техніко-економічне обґрунтування систем акумулювання енергії

Техніко-економічні розрахунки виконано на основі актуальних ринкових цінових пропозицій виробників та постачальників обладнання, що включають повний комплекс послуг із монтажу, налагодження та подальшого обслуговування установки. Значення вартісних показників обладнання та вихідні проектні дані щодо статей витрат, необхідні для розрахунків за моделлю життєвого циклу на основі визначення нормованої ціни виробництва електроенергії (LCOE), зведено у таблиці 4.1. У таблиці також наведено ключові фінансові макропоказники, такі як середньорічний рівень інфляції (ескалація) та річна дохідність капіталу (номінальний дисконт). Для проведення аналізу чутливості розрахункових показників до можливих негативних тенденцій, що спостерігаються на фінансових і господарських ринках, здійснено додаткові розрахунки з урахуванням очікуваного підвищення середнього рівня інфляції протягом життєвого циклу об'єкта (наступні 20 років) на рівні:

$$i=7\%$$

Річний обсяг виробленої енергії відповідає річному споживанню електроенергії та становить 37 000 кВт·год. Для визначення параметрів системи акумулювання енергії проведено аналіз графіків електричних навантажень та залежності потужності вітроелектричної установки від швидкості вітру. Виходячи

з отриманих даних, прийнято, що необхідна ємність акумуляторної системи має становити 50 кВт·год, а максимальна потужність – 10 кВт. Це забезпечує стабільне електропостачання споживачів у пікові години зимового періоду, коли навантаження на мережу максимальне, а генерація від ВЕУ може бути обмежена природними умовами. Такий підхід дозволяє поєднувати оптимізацію витрат, ефективність використання відновлюваних джерел енергії та надійність електропостачання в автономному режимі.

Техніко-економічні розрахунки системи електропостачання з використанням гідравлічного акумулювання

1. Потужність визначено наступною формулою:

$$N_r = 9,81 \cdot h \cdot Q \cdot \eta, \quad (4.16)$$

де h – висота напору, м;

Q – витрата води, м³/с;

η – ККД гідротурбіни та генератора;

Приймаємо висоту напору з урахуванням втрат 40 м. Було обрано гідротурбіну XJ13-L-15/4.5 із витратою води 0,032 м³/с та генератор SFW10-6/268 з такими характеристиками: максимальна потужність – 10 кВт, напруга – 400 В, струм – 18 А, частота обертання – 1000 об/хв [52].

2. Необхідний обсяг резервуара для акумулювання 50 кВт·год становить 574 м³, тому обираємо резервуар на 600 м³.

3. Довжина трубопроводів визначається кутом нахилу схилу та висотою його розташування. При куті 30° та висоті 40 м довжина трубопроводу складе 80 м.

4. Площа поверхні резервуара для теплоізоляції. Габаритні розміри резервуара: висота – 10,43 м, діаметр – 9,86 м. Площа зовнішньої поверхні без урахування дна дорівнює 400 м².

Схема системи електропостачання з гідравлічним акумулюванням представлена на рисунку 4.5.

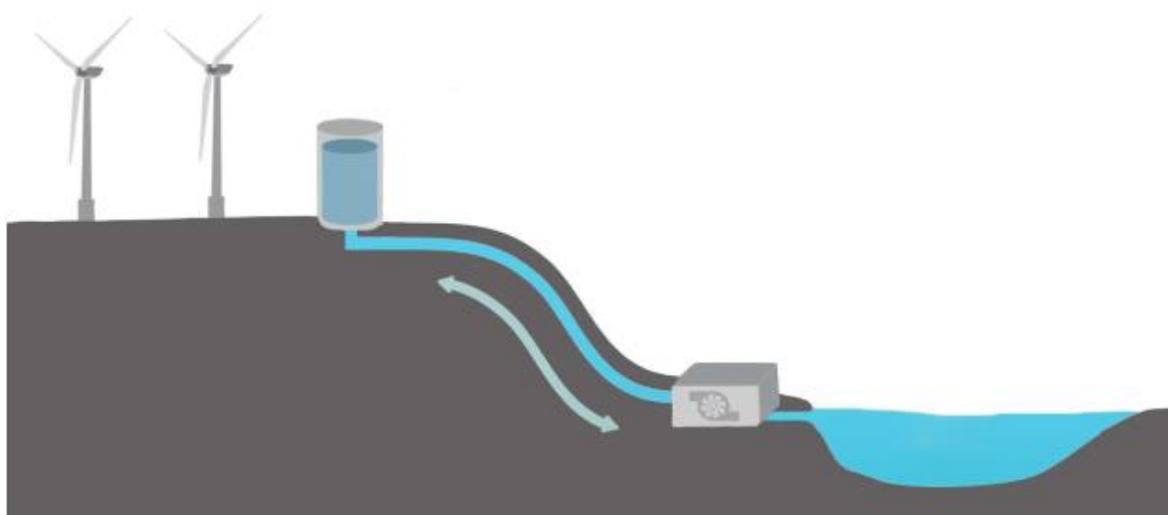


Рисунок 4.5 – Система електропостачання з гідравлічним акумулюванням

Таблиця 4.1 – Зведена таблиця даних для розрахунку нормованих цін виробництва електричної енергії та грошових потоків протягом життєвого циклу САЕП із засобами гідроакумулювання

	Найменування	Ціни в грн.	Розрахункові значення
I	Початкові інвестиції (затрати першого року, без поточних витрат на експлуатацію)	2399432	85694
1.1	ВЕУ EuroWind 10, 2 штуки	1003520	35840
1.2	Інвертори	56000	2000
1.3	Резервуар для води 600 м ³	604800	21600
	Гідротурбіна XJ13-L-15/4.5	64400	2300
	Генератор SFW10-6/268	42000	1500
	Трубопроводи	52416	1872
	Насоси	30240	1080
	Теплоізоляція резервуару та трубопроводів	80444	2873
1.4	Кабелі, комутаційна апаратура	98000	3500
1.5	Непередбачувані витрати	14 000	500
1.6	Монтажні роботи	336000	12000
II	Експлуатаційні показники та витрати		
2.1	Термін експлуатації, років		20
2.2	Розрахунковий річний обсяг виробітку електричної енергії, кВт год		37017
2.3	Капітальний ремонт ВЕУ	479864	17138
2.4	Вартість щорічного поточного обслуговування	70000	2500
III	Фінансові макропоказники		

Результати розрахунків кумулятивного грошового потоку та нормованої ціни виробництва електроенергії для автономної системи електропостачання на базі ВЕУ з гідроакумулюванням наведені на рисунках 4.6 та 4.7 відповідно.

Графічне представлення грошового потоку $CDCF_n$ у вигляді плавних

безперервних кривих дозволяє оцінити строки окупності проекту з урахуванням варіацій ключових економічних параметрів, таких як індекс інфляції та ставка дисконту, порівнюючи їх із вкладенням коштів у фінансові інструменти з гарантованою доходністю.

Таким чином, розрахунки показують, що термін окупності системи автономного електропостачання на основі вітроелектростанцій із засобами гідроакумулювання, виготовленої та змонтованої відповідно до наведених техніко-економічних розрахунків, варіюється залежно від обраного порядку обслуговування та рівня щорічних експлуатаційних витрат. Ураховуючи наведені умови, прогнозований період повернення інвестицій може становити від 6 до 10 календарних років, що забезпечує економічну доцільність впровадження автономної енергосистеми та підтверджує ефективність поєднання відновлюваних джерел енергії з гідроакумулюючими елементами для стабільного електропостачання споживачів.

Техніко-економічні розрахунки системи з електрохімічними акумуляторними батареями

Приведена собівартість електроенергії, виробленої автономною системою електропостачання (САЕП) з електрохімічними акумуляторами, визначається чистою приведеною вартістю всіх замін батарей протягом життєвого циклу.

Термін служби акумуляторної батареї залежить від щоденної глибини розряду (daily depth of discharge, DODd) та характеристик батареї, зазначених виробником. Зокрема, середній термін експлуатації NA (кількість циклів) визначається для певного значення DOD0 (зазвичай DOD0 = 0,8) та коефіцієнтом батареї V_c : для батарей з плоскими пластинами V_c знаходиться в межах 0,02–0,03, для трубчастих батарей – від 0,01 до 0,02 [53].

$$N_R = 0.5 N_A \exp(-Bc100(DOD_d - DOD_0)) \quad (4.17)$$

Кількість заміन АКБ розраховується наступним чином:

$$b_{rp} = INT \left(\frac{N}{N_R / 365} \right) \quad (4.18)$$

N – термін експлуатації системи, років;

N_R – термін експлуатації акумулятора за певної щоденної глибини розряду;

Дані щодо вартості обладнання та вихідні проектні значення статей витрат для розрахунків за моделлю життєвого циклу з визначенням нормованої ціни виробництва LCOE наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Зведена таблиця даних для розрахунку нормованих цін виробництва електричної енергії та грошових потоків протягом життєвого циклу САЕП із електрохімічними АКБ

	Найменування	Ціни в грн.	Розрахункові значення
I	Початкові інвестиції (затрати першого року, без поточних витрат на експлуатацію)	2172240	77580
1.1	ВЕУ EuroWind 10, 2 штуки	1003520	35840
1.2	Інвертори	56000	2000
1.3	Акумуляторні батареї Trojan IND29-4V, 11 штук	706000	28240
1.4	Кабелі, комутаційна апаратура	98000	3500
1.5	Непередбачувані витрати	14000	500
1.6	Монтажні роботи	196000	70000
II	Експлуатаційні показники та витрати		
2.1	Термін експлуатації, років		20
2.2	Розрахунковий річний обсяг виробітку електричної енергії, кВт·год		37017
2.3	Капітальний ремонт ВЕУ	479864	17138
2.4	Заміни АКБ	3162880	112960
2.5	Вартість щорічного поточного обслуговування	70000	2500
III	Фінансові макропоказники		
3.1	Індекс інфляції (ескалації), річна ставка, %		7
3.2	Річна дохідність капіталу при його розміщенні у альтернативні фінансові продукти (базове значення дисконту), %		15

Розрахункові результати кумулятивного грошового потоку та нормованої ціни виробництва електроенергії для автономної системи електропостачання на базі ВЕУ з електрохімічними акумуляторами представлені на рисунках 4.8 та 4.9 відповідно.

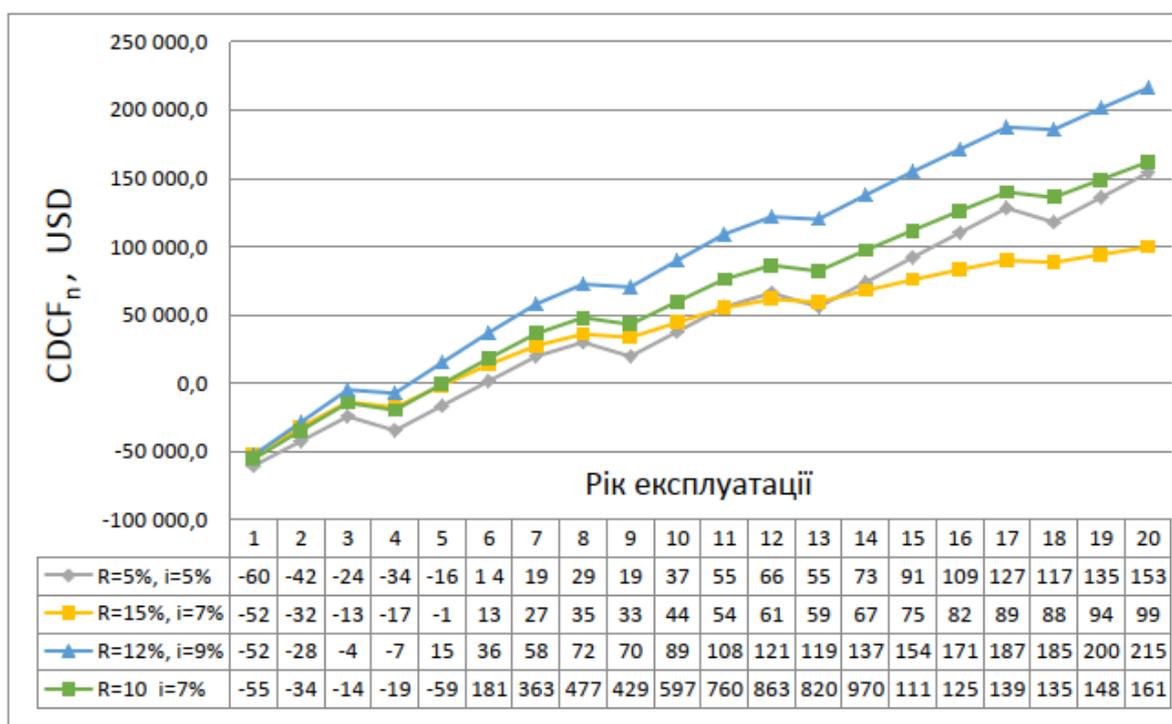


Рисунок 4.8 – Кумулятивний грошовий потік, що формується із надходжень від нормованої ціни виробництва електроенергії САЕП на основі ВЕУ з електрохімічними АКБ

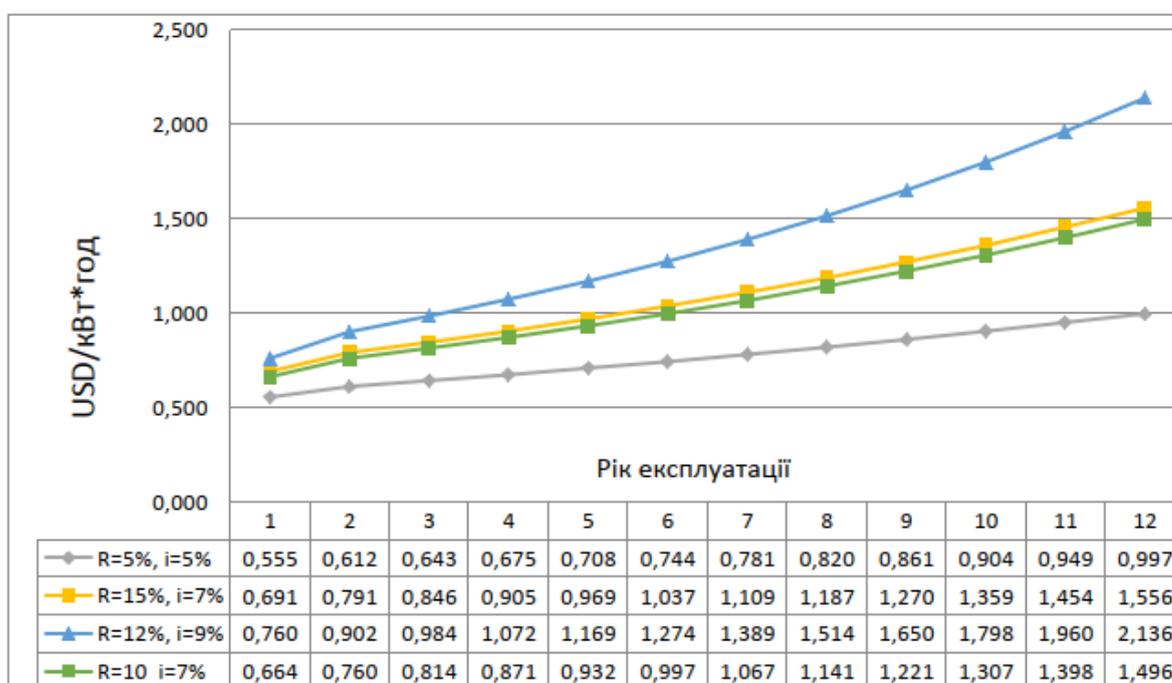


Рисунок 4.9 – Нормовані ціни на виробництво електроенергії САЕП на основі ВЕУ з електрохімічними АКБ

Висновки до 4 розділу

Порівняльний аналіз рівня нормованої вартості виробництва електроенергії (LCOE) для систем з різними типами акумуляційних рішень дозволяє оцінити економічну ефективність кожного варіанту та зробити висновки щодо оптимального вибору технології накопичення енергії.

Розрахункові оцінки техніко-економічних показників, отримані на основі моделі життєвого циклу при варіюванні фінансово-економічних параметрів системи, дозволяють комплексно оцінити ефект від запропонованих компонентних рішень. Аналіз результатів показує, що ефективність використання систем автономного електропостачання (САЕП) із засобами гідравлічного акумулювання значно перевищує аналогічні показники при застосуванні електрохімічних акумуляторних батарей, зокрема щодо зниження собівартості виробництва електричної енергії. За підсумками проведених розрахунків можна дійти висновку, що в умовах розглянутих економічних, технічних та географічних факторів заміна електрохімічних акумуляторів системою гідравлічного акумулювання є не лише економічно обґрунтованою, але й забезпечує додаткову суспільну користь, що враховується через показники «системної вартості» комплексного енергетичного рішення, включаючи скорочення негативного впливу на довкілля та підвищення загальної надійності автономного електропостачання.

РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З НАКОПИЧУВАЧАМИ

Сутність стартапу як форми інноваційного підприємництва

Стартап – це нещодавно створена компанія, що перебуває на початковому етапі свого розвитку та характеризується наявністю інноваційної ідеї, яка здатна забезпечити конкурентні переваги та вихід на ринок із новим продуктом або послугою. Основною метою створення стартапів є ведення інноваційного бізнесу та розробка нових продуктів із подальшою їх комерціалізацією. Великі корпорації зазвичай неохоче впроваджують на ринок невідомі й ризиковані продукти, оскільки пов'язані з цим ризики є високими, а можливі фінансові збитки можуть бути значними.

Успішність стартапу здебільшого визначається новаторською ідеєю, здатною залучити інвестиції та забезпечити комерційний успіх проекту. Стартап-проект, який демонструє ефективне функціонування та потенціал масштабування, часто коштує значних коштів, і багато корпорацій готові інвестувати або купувати такі ідеї.

До характерних особливостей стартапів належать:

Інноваційність – створення нового ринку або запуск продукту, що може мати глобальний або регіональний вплив;

Обмеженість початкових інвестицій – у більшості випадків стартовий капітал надають самі засновники проекту;

Швидкий розвиток – середній термін початкової фази становить 3–4 місяці, проте високотехнологічні проекти можуть запускатися до року;

Низькі шанси на успіх – велика частина стартапів не досягає очікуваного результату, що робить ризикованими інвестиції у цей сегмент бізнесу.

Стартапи відіграють важливу роль у стимулюванні інноваційної економіки, створенні нових робочих місць та впровадженні технологічних рішень, які здатні трансформувати ринкові процеси та впливати на соціально-економічний розвиток регіону чи країни.

В Україні спостерігається стрімке зростання частки відновлюваних джерел енергії. Протягом року загальна встановлена потужність об'єктів, побудованих із застосуванням технологій перетворення вітрової енергії (ТВЕ), збільшилася більш ніж на 10%, досягнувши позначки 1,5 ГВт. За даними Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у першому кварталі 2018 року введено в експлуатацію близько 159 МВт нових генерувальних потужностей на базі ТВЕ, що перевищує показники першого кварталу 2023 року в 2,4 рази [НКРЕКП].

Паралельно з цим спостерігається зростання кількості об'єктів з автономними системами електропостачання, що функціонують за рахунок енергії вітру та сонця, зокрема за допомогою вітроелектростанцій (ВЕС) та сонячних електростанцій (СЕС). Характерною особливістю таких систем є необхідність резервування енергії на випадок недостатньої сонячної інсоляції або низьких швидкостей вітру [49].

У автономних системах для забезпечення електропостачання малопотужних споживачів широке застосування отримали електрохімічні акумуляторні батареї. До переваг таких систем належать висока маневреність, модульність, надійність та безшумність роботи. Водночас обмежена кількість циклів заряду-розряду акумуляторів зумовлює потребу у їх регулярній заміні, що призводить до зростання експлуатаційних витрат та витрат на утилізацію відпрацьованих батарей [49].

У межах реалізації проекту пропонується розвиток стартапу, орієнтованого на впровадження систем накопичення енергії на основі гідравлічного акумулявання, а також використання технологій генерації електроенергії з кінетичної енергії води. Таке поєднання дозволяє підвищити ефективність автономних енергетичних систем та зменшити експлуатаційні витрати, водночас забезпечуючи стабільне електропостачання [49].

Більш детальна інформація про складові проекту наведена у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Зміст ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження систем енергопостачання на основі засобів гідроенергетики та систем акумулювання енергії із гідравлічними акумуляторами	Проектування систем для обраного об'єкта	Визначать необхідних параметрів системи електропостачання або акумулювання; отримання консультацій
	Підбір та закупівля необхідного обладнання	Вибір обладнання кваліфікованими спеціалістами
	Доставка та монтаж обладнання, введення системи в експлуатацію	Доставка та можливість монтажу системи «під ключ»
	Гарантійний супровід та технологічне обслуговування	Якісне технологічне обслуговування та ремонт системи

Оцінка інноваційного потенціалу роботи

Технологічний аудит є системним методом оцінювання технічного стану та потенціалу підприємства на основі встановлених критеріїв. Такий аудит дозволяє виявити як сильні, так і слабкі сторони виробничих і технологічних процесів, що у подальшому слугує підґрунтям для формування стратегії підвищення ефективності діяльності компанії та оптимізації використання ресурсів. У контексті оцінки технологічної здійсненності стартап-проекту проводиться детальний аналіз ключових складових, який дозволяє визначити можливість реалізації запропонованих інновацій та адаптацію існуючих рішень до потреб проекту. До основних компонентів такого аналізу належать [таблиця 5.2]:

- технологія виробництва продукту або надання послуги відповідно до концепції стартапу;
- наявність необхідних технологій, а також оцінка потреби у їх доопрацюванні чи розробленні з нуля;
- доступ до зазначених технологій, що включає правові, фінансові та організаційні аспекти використання технологічних рішень.

Такий підхід дозволяє комплексно оцінити перспективність стартап-проекту з точки зору технологічного потенціалу та визначити пріоритети для подальшого розвитку і впровадження інновацій.

Таблиця 5.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Проектування системи	Реалізується за допомогою техніко-економічних розрахунків	Для реалізації наявні технології комп'ютерного моделювання	Технології є доступними
2	Постачання обладнання	Реалізується за допомогою аналізу наявного на ринку обладнання	Для реалізації наявна інформація технічних та цінних параметрів обладнання різних виробників	Технології є доступними
3	Доставка та монтаж обладнання, введення системи в експлуатацію	Реалізується за допомогою логістичної інфраструктури	Технології наявні	Технології є доступними

Наступним кроком є ідентифікація основних груп потенційних споживачів, аналіз їхніх характеристик та поведінкових особливостей, а також формування орієнтовного переліку ключових вимог до товару чи послуги для кожної з цих груп. Такий підхід дозволяє більш точно адаптувати продукт під потреби ринку та забезпечити його конкурентоспроможність. Детальні дані щодо класифікації клієнтських груп та відповідних вимог наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Вимоги споживачів до товару
1	Проектування та впровадження систем генерації енергії на основі кінетичної енергії води	Споживачі, які мають можливість використовувати малі ГЕС для енергопостачання	Обладнання необхідної потужності, сертифіковане обладнання
2	Проектування та впровадження систем акумулювання енергії	Споживачі, що мають потребу в акумулюванні енергії, в основному – САЕП на основі ТВЕ	Обладнання необхідної потужності, сертифіковане обладнання

Дослідження зовнішнього середовища та ринкових факторів

Аналіз зовнішнього середовища є ключовим елементом стратегічного управління та планування діяльності компанії. Він дозволяє виявити загрози, що постають перед підприємством у процесі ведення бізнесу, а також можливості, які можуть бути використані для його розвитку. Зовнішнє середовище включає

різноманітні фактори, серед яких конкуренти, недобросовісні постачальники, зміни в податковому та регуляторному законодавстві, соціальні та політичні конфлікти, а також інші елементи, здатні впливати на ефективність бізнесу.

Завдяки систематичному аналізу зовнішніх факторів компанія може своєчасно виявляти загрози і визначати можливості для зростання та розвитку. Це, у свою чергу, дозволяє розробляти стратегічні рішення, що забезпечують адаптацію компанії до умов зовнішнього середовища в короткостроковій і довгостроковій перспективі, підтримуючи її конкурентоспроможність і здатність досягати визначених цілей.

Під час оцінювання зовнішнього середовища виділяють ряд ключових факторів, які можуть істотно впливати на потенціал розвитку компанії. Кожен з цих факторів підлягає детальному аналізу, що дозволяє визначити можливі труднощі, ризики та позитивні можливості, які можуть бути використані для стратегічного планування та прийняття управлінських рішень. Результати такого аналізу наочно представлені в таблицях 5.4 – 5.13.

Таблиця 5.4 – Фактори політико-правового середовища.

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Розвиток технологій відновлюваної енергетики	Інвестиції від держави для впровадження технологій		Пошук каналів зв'язку з державними установами з метою отримання інвестицій
Регулювання діяльності фірми законами та законодавчими актами	Підвищення якості товарів та послуг відповідно до сертифікатів та ліцензій		Дотримання захисту прав споживачів, забезпечення заробітної плати та безпеки праці
Просування українських товарів	Розширення ринків збуту товару		Дотримання європейських вимог та стандартів щодо характеристик

Таблиця 5.5 – Фактори економічного середовища.

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Економічна криза		Відсутність інвесторів; недостатність фінансування; зменшення кількості можливих місць для впровадження технологій	Пошук способів зменшення вартості товару без погіршення якості; пошук клієнтів за кордоном
Економічний потенціал України		Недостатня кількість клієнтів, що можуть дозволити собі послуги підприємства	Просування товару на зовнішні ринки

Таблиця 5.6 – Фактори науково-технічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Інтенсивний розвиток ринку	Компанії необхідно відповідати все більш зростаючим вимогам до технологій та обладнання для того, аби бути конкурентоспроможною		Впровадження інноваційних технологій
Поява нових технологій		Нові конкуренти	Орієнтація на постійних клієнтів, розвиток та вдосконалення продукції

Таблиця 5.7 – Фактори демографічного середовища.

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Демографічний стан України не впливає на розповсюдження та якість запропонованої продукції на ринку			

Таблиця 5.8 – Фактори соціокультурного середовища.

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Особливості українських клієнтів		Вибір перевірених технологій замість інноваційних	Демонстрація перспектив товару за рахунок його інноваційності на практиці

Таблиця 5.9 – Фактори природного середовища.

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Використання енергоефективних та екологічно безпечних технологій	Перевага над продукцією конкурентів за рахунок екологічної безпеки та енергоефективності		Пошук способів ознайомлення клієнтів з перевагами товару компанії над конкурентною продукцією

Таблиця 5.10 – Вплив споживачів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Здатність покупців торгуватися		Втрата потенційних клієнтів через високу вартість товарів та послуг	Співпраця з клієнтами на взаємовигідних умовах
Бажання клієнтів мати якісний продукт за мінімально можливою вартістю та витрату часу	Перевага над конкурентами за рахунок використання унікального дизайну	Втрата клієнтів через невідповідний зовнішній вигляд продукції	Покращення дизайну та ергономічності товару
Вплив на клієнтів статусу бренду		Втрата потенційно важливих клієнтів	Підтвердження якості товару, покращення іміджу компанії

Таблиця 5.11 – Вплив конкурентів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Поява нових конкурентів		Рівень інноваційності нових конкурентів перевищить рівень інноваційності компанії	Моніторинг ринку, спроби технологічно випереджати конкурентів
Наявність товарів-замінників		Поява інноваційного обладнання, що не потребує впровадження пропонуваного систем	Робота над адаптивністю систем для впровадження на різні типи об'єктів
Конкуренція між існуючими компаніями		Витіснення конкурентами з ринку	Порівняння, аналіз товару конкурентів, запозичення позитивних тенденцій та уникнення помилок конкурентів

Таблиця 5.12 – Вплив постачальників

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
Зменшення кількості постачальників в період кризи		Втрата постійних постачальників	Наявність зв'язків з різними постачальниками, що можуть бути взаємозамінні

Таблиця 5.13 – Вплив контактних аудиторій

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні способи реалізації можливості або вирішення проблеми
	Можливості	Загрози	
ЗМІ	Просування власного бренду	Просування конкурентів, публікація неправдивої інформації	Просування власного бренду за рахунок взаємодії з різними видами ЗМІ
Конференції, реклама, виставки	Здобування компанією «власного імені» у професійно-технічній спільноті		Співпраця з цими спільнотами, відвідування тематичних заходів, використання можливостей заявити про себе
Існуюча база контактів компанії	Підвищення продуктивності розробок за рахунок ефективної командної діяльності	Зниження продуктивності розробок за рахунок поганих відносин у колективі	Підвищення командного духу, проведення тимблдингів, корпоративів, пошук спільних інтересів

SWOT-аналіз є одним із найпоширеніших методів оцінки внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на розвиток компанії. Цей підхід дозволяє систематизувати сильні та слабкі сторони організації, а також визначити можливості та загрози, що надходять із зовнішнього середовища. При цьому елементи «S» (Strengths) та «W» (Weaknesses) відносяться до внутрішнього стану компанії, тоді як «O» (Opportunities) і «T» (Threats) відображають вплив зовнішнього оточення на діяльність організації.

Завдяки SWOT-аналізу можна оцінити, чи має компанія достатні ресурси та потенціал для реалізації наявних можливостей і одночасного протистояння зовнішнім загрозам. Для цього проводиться комплексний аналіз внутрішньої та зовнішньої ситуації компанії, що дає змогу виробити стратегічні рекомендації щодо розвитку та оптимізації діяльності. Результати проведеного SWOT-аналізу подані у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 – SWOT- аналіз впровадження проекту

S (сильні сторони)	W (слабкі сторони)
<ul style="list-style-type: none"> - Високий інтелектуальний потенціал компанії - Інноваційність технології - Використання найкращих технологічних рішень - Можливість виходу на закордонний ринок 	<ul style="list-style-type: none"> - Недостатня обізнаність про компанію на ринку - Низький рівень фінансування - Конкуренція на ринку - Зменшення кількості можливих постачальників в умовах кризи
O (можливості)	T (загрози)
<ul style="list-style-type: none"> - Перевага над конкурентним товаром за рахунок енергоефективності, екологічної безпеки - Підвищення продуктивності розробок за рахунок ефективної командної діяльності. - Подолання конкуренції за рахунок унікального дизайну систем - Співпраця з постачальниками на взаємовигідних умовах 	<ul style="list-style-type: none"> - Витіснення конкурентами компанії з ринку - відсутність інвесторів, недостатнє фінансування - Недостатня кількість клієнтів, що можуть дозволити собі запропоновані системи - Витіснення вітчизняного товару закордонним

На сучасному етапі управління компанією однією з ключових проблем є значний обсяг часу та ресурсів, необхідних для ефективного просування бренду та реклами продукції на ринку України. Це створює потребу у формуванні стратегій, спрямованих на залучення більшої кількості інвесторів та потенційних клієнтів, що сприятиме більш широкому поширенню інформації про продукт та підвищенню впізнаваності компанії. Для вирішення цієї управлінської проблеми та одночасної реалізації наявних можливостей були розроблені різні альтернативні підходи, які дозволяють оптимізувати процес маркетингового просування, підвищити ефективність комунікацій та стимулювати залучення ресурсів. Детальний опис запропонованих шляхів вирішення управлінської проблеми та реалізації управлінської можливості представлено у таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 – Слабкі та сильні сторони альтернативних шляхів

Альтернативи	Слабкі сторони	Сильні сторони
1. Пошуки каналів зв'язку з потрібними державними установами для отримання інвестицій	Складність пошуку таких каналів	Розширення клієнтської бази
2. Демонстрація на практиці переважання якості товару за рахунок його інноваційності	Стереотипи та недовіра клієнтів перед до новинок	Зміна ставлення до інновацій, розширення меж потенціальних клієнтів
3. Підтримання співпраці з постійними клієнтами	Недостатня кількість уваги новим клієнтам	Підтримання стабільної бази постійних клієнтів

Процес розроблення ринкової стратегії включає комплексне визначення підходів до охоплення цільового ринку, що передбачає не лише ідентифікацію потенційних споживачів, а й аналіз їхніх потреб, поведінкових характеристик та переваг у контексті продукту чи послуги компанії. У межах цього етапу здійснюється сегментація ринку, що дозволяє виділити ключові групи споживачів, на яких буде спрямована маркетингова та комерційна діяльність компанії. Детальні відомості щодо опису обраних цільових груп споживачів наведені у таблиці 5.16, що дозволяє систематизувати отримані дані та забезпечує основу для подальшого планування маркетингових заходів і вибору ефективних каналів просування.

Таблиця 5.16 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Цільові групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
Власники автономних об'єктів	Повна готовність	Високий	Значна	Складно
Власники малих ГЕС	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
Споживачі, що планують впровадження малих ГЕС	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто

За результатами аналізу ринкових умов та характеристик конкурентного середовища для реалізації проекту обрана стратегія диференціації, яка передбачає створення унікального продукту або послуги, здатного виділитися серед аналогічних пропозицій на ринку. Стратегія диференціації спрямована на формування конкурентних переваг за різними напрямками, серед яких товарні характеристики, якість послуг, імідж компанії, кваліфікація персоналу, ефективність рекламних кампаній, організація процесу продажу, технологічні особливості виробництва, науково-дослідні розробки та політика сервісного обслуговування.

Зокрема, диференціація товару може передбачати унікальні властивості, яких немає у конкурентів: більш вигідну ціну, додаткові функції, оновлення

марки, вдосконалений дизайн, кращі технічні та екологічні характеристики. Важливим елементом є підвищення кваліфікації персоналу для надання консультаційної допомоги на етапі прийняття рішення клієнтом, а також забезпечення супровідних послуг після продажу: сервісного обслуговування, гарантійного ремонту та технічної підтримки.

Переваги стратегії диференціації полягають у підвищенні рентабельності продукції завдяки можливості встановлення більш високої ціни, формуванню прихильності клієнтів, що зменшує тиск з боку покупців та перешкоджає появі нових конкурентів, підвищенні стійкості компанії до зростання витрат внаслідок дій постачальників, а також зниженні конкуренції товарів-замінників за рахунок унікальних характеристик продукції та сервісного супроводу.

Разом із тим, при впровадженні стратегії диференціації слід постійно відслідковувати зміни ринку, шукати можливості оптимізації виробництва та зниження витрат, оскільки перевищення ціни продукту над купівельним інтересом може призвести до зниження його конкурентоспроможності та рентабельності.

Висновки до 5 розділу

Проведений комплексний аналіз ринку та техніко-економічних умов переконливо підтверджує, що запропонований проєкт є актуальним і має високі перспективи для успішної реалізації в умовах енергетичного сектору України. Ця актуальність підкріплена загальносвітовим трендом на декарбонізацію та підвищення енергетичної стійкості.

Незважаючи на високу потенційну доцільність, існують суттєві бар'єри, які необхідно враховувати та мінімізувати:

1. Політична та економічна нестабільність: Непередбачуваність регуляторної політики, зміна тарифних механізмів та макроекономічні ризики ускладнюють довгострокове планування інвестицій.

2. Висока конкуренція: Посилення конкуренції серед компаній, які активно впроваджують системи акумулювання енергії (CAE) та займаються

монтажем відновлюваних джерел генерації (ВДЕ) (зокрема, сонячних та вітрових електростанцій).

Для успішного входження на конкурентний ринок та його подальшого розширення була обрана стратегія диференціації. Цей підхід дозволяє:

- Чітко ідентифікувати та сегментувати ринок: Виділити специфічні групи споживачів (наприклад, агропромисловий комплекс, приватні домогосподарства, малий бізнес).

- Розробити цільові та унікальні рішення: Створити продукти, які найкращим чином відповідають потребам кожного сегмента (наприклад, гібридні системи з гідроакумуляцією для агросектору, що вимагає високої надійності).

Таке фокусування забезпечує високу доцільність подальшої імплементації проєкту та гарантує його релевантність для цільової аудиторії.

Перспективи довгострокового розвитку та масштабування проєкту безпосередньо залежать від двох ключових зовнішніх факторів:

1. Зростання частки ВДЕ: Постійне підвищення частки відновлюваної енергетики у національному енергетичному балансі України.

2. Технологічні інновації: Швидке впровадження технологічних інновацій у сфері як генерації (підвищення ефективності ВЕУ та СЕС), так і, особливо, акумулювання енергії (зниження вартості та покращення характеристик САЕ).

Успішна реалізація проєкту забезпечить його стратегічну позицію як важливого гравця у процесі децентралізації та підвищення гнучкості енергосистеми України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота була сфокусована на розробці та обґрунтуванні автономної системи електропостачання для господарського об'єкта, що використовує вітроелектроустановку (ВЕУ). З метою підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат було проведено комплексний аналіз існуючих систем накопичення енергії.

Ключові етапи дослідження:

- Порівняльний аналіз САЕ: виконано аналіз різних типів електрохімічних акумуляторних батарей (ЕАБ) із визначенням ключових техніко-економічних параметрів для подальшого порівняння.
- Концептуальне рішення: запропоновано інноваційний проєкт системи, що базується на ВЕУ з інтегрованими засобами гідравлічного акумулявання (ГАЕ) електроенергії як основною заміною традиційним батареям.

Для забезпечення точного розрахунку потужності системи було проведено глибоке дослідження вітрового потенціалу обраної географічної локації:

- Модель вітрового потенціалу: розроблено та застосовано спеціалізовану модель для визначення вітрового потенціалу, що спирається на статистичні дані про швидкість вітру.
- Аналіз потужності ВЕУ: за допомогою моделі виконано розрахунок питомої потужності ВЕУ та побудовано функції щільності ймовірності потужності для різних діапазонів швидкості вітру у дослідній точці. Це дозволило оцінити прогнозовану генерацію.
- Графіки навантажень: побудовано графіки електричних навантажень об'єкта дослідження, які точно відображають характеристики та добові цикли типових споживачів енергії.

На основі інтегрованого аналізу електричних навантажень та оцінки вітрового потенціалу було виконано ключові інженерні розрахунки:

- Визначення оптимальних параметрів: ідентифіковано оптимальні характеристики віротехнічного обладнання (потужність турбіни) та необхідний обсяг засобів акумуляції енергії для забезпечення стабільного та повністю

автономного функціонування системи.

- Економіко-математична модель: проведено порівняльний аналіз технологій накопичення (ГАЕ проти ЕАБ) за допомогою економіко-математичної моделі життєвого циклу. Ця модель дозволила здійснити варіантні розрахунки техніко-економічних показників для обох сценаріїв.

Результати розрахунків і проведений техніко-економічний аналіз однозначно підтверджують, що за існуючих економічних, технічних та географічних умов, заміна традиційних електрохімічних акумуляторних батарей (ЕАБ) на систему гідравлічного акумулювання (ГАЕ) є економічно обґрунтованою.

Ця заміна забезпечує довгострокову суспільну користь, що кількісно підтверджується розрахунками показників «системної вартості» комплексного енергетичного рішення. Перехід до ГАЕ не лише підвищує надійність системи, а й знижує загальну вартість володіння (Total Cost of Ownership) завдяки меншим експлуатаційним витратам та збільшеному ресурсу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок : [арх. 15 березня 2020] / Міненерговугілля України. – Київ : [б. в.], 2017. – 617 с.
2. ДСТУ 3569-97. Енергозбереження. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії. Основні положення (ГОСТ 30514-97) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25862 – Назва з екрана.
3. Волох П.В., Цоколенко М.П., Ревенко Л.В., Грічаненко В.А. та ін. Довідникова книга з електроенергетики : навч. посіб. – К. : Аграрна освіта, 2014. – 506 с.
4. ДНАОП 0.00-1-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К. : Укрархбудінформ, 2001. – 117 с.
5. Проектування електропостачання та електрообладнання машин і установок геотехнічних виробництв : навч. посіб. для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад. І. С. Рябенко, О. В. Мейта. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 244 с.
6. Шкрабець Ф.П. Електропостачання : навч. посіб. / Ф.П. Шкрабець ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д. : НГУ, 2015. – 540 с.
7. Бурбело М.Й., Бірюков О.О., Мельничук Л.М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.
8. Мілих В.І., Павленко Т.П. Електропостачання промислових підприємств : підручник для студентів електромеханічних спеціальностей. – Харків : ФОП Панов А.М., 2016. – 272 с.
9. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. – Тернопіль : Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
10. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38–150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних втрат електроенергії (ГНД 34.09.104–2003). – К. : Міненерго України, 2004. – 115 с.

11. Бурбело М.Й., Мельничук Л.М. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах : монографія. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 110 с.
12. Сиворакша В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.Є. та ін. Теплові розрахунки геліосистем. – Дніпропетровськ : Вид-во ДГУ, 2003. – 132 с.
13. Драганов Б.Х., Іщенко В.В., Шеліманова О.В. Експлуатація теплоенергетичних установок і систем. – К. : Аграрна освіта, 2009. – 230 с.
14. Праховник А.В., Мельникова О.В., Конеченков А.Є., Іншеков Є.М., Дешко В.І. Енергозбереження : посібник для загальноосвітньої школи. – Львів : Політра Друку, 2003. – 92 с.
15. Жежеленко І.В., Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Саєнко Ю.Л. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : підручник. – Д. : Нац. гірн. ун-т, 2009. – 319 с.
16. Суходоля О.М. Новітні енергетичні технології та їх вплив на функціонування систем енергопостачання : аналіт. доп. – Київ : НІСД, 2022. – 36 с.
17. Вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://wikipedia.org>
18. Забезпечення стійкості енергосистем та їх об'єднань / за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України, 2018. – 320 с.
19. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kubg.edu.ua/images/stories/podii/2017/06_21_posylannia/dstu_8302.pdf – Назва з екрана.
20. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf – Назва з екрана.
21. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці : підручник. – Л. : Афіша, 2002. –

320 с.

22. Панченко С.В., Акімов О.І., Бабаєв М.М. та ін. Електробезпека : підручник. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. – 295 с.

23. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів : [затв. Наказ Міненерго України 25.07.2006 № 258] – Х. : Індустрія : Енергетичні рішення, 2012. – 318 с.

24. Панченко С.В., Акімов О.І., Бабаєв М.М. та ін. Основи безпечної експлуатації електроустановок : підручник. – Харків : УкрДУЗТ, 2021. – 149 с.

25. Остапчук О.В., Денисюк П.Л., Матеєнко Ю.П. Електрична частина станцій та підстанцій : курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посібник для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,62 МБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 183 с.

26. Потапський П.В., Михайлова Л.М., Гарасимчук І.Д., Дубік В.М., Козак О.В., Думанський О.В., Печенюк А.В., Панцир Ю.І. Методичні рекомендації щодо виконання та оформлення кваліфікаційної роботи магістра / за заг. ред. П.В. Потапського. – ЗВО «ПДУ», 2025. – 38 с.

27. Система дистанційного навчання Moodle 2.7 : [Електронний ресурс] – ЗВО «ПДУ». – Режим доступу: <http://pdatu.net.ua/> – Назва з екрана.

28. European Commission. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. – European Commission, Brussels, 2009.

29. UCTE. Final Report: System Disturbance on 4 November 2006. – Brussels : Union for the Coordination of Transmission of Electricity, 2007.

30. Chen H., Cong T.N., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y. Progress in electrical energy storage system: a critical review // Prog. Nat. Sci. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 291–312.

31. У Німеччині побудували найвищий вітрогенератор в світі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eenergy.com.ua/news/u-nimechchyni-pobuduvaly-najvyshhyj-vitrogenerator-v-sviti/>

32. Integrating wind and water for renewable energy [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.worldpumps.com/power-generation/features/integrating-wind-and-water-for-renewable-energy/>

33. Методичні вказівки щодо виконання та оформлення курсових робіт з навчальної дисципліни «Основи електропостачання» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня / М.В. Вусатий, І.Д. Гарасимчук, П.В. Потапський. – ПДАТУ, 2021. – 68 с.

34. Конспект лекцій з дисципліни «Основи електропостачання» (скорочений курс, частина 1) для здобувачів вищої освіти першого рівня / М. Вусатий, П. Потапський, І. Гарасимчук ; за заг. ред. П. Потапського. – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2023. – 127 с.

ДОДАТКИ