

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний аграрний університет  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Допущений до захисту:  
Т.в.о. завідувача кафедри ЕЕЕ  
к.т.н. доцент. Видмиш А.А.

\_\_\_\_\_  
(Підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

«Засоби акумулювання енергії та їх роль у перспективах розвитку  
відновлювальних джерел енергії»

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика,  
електротехніка і електромеханіка

Виконав: студент групи ЕІ-19-1 (маг.)

Ткачук Вадим Миколайович \_\_\_\_\_

Керівник: д.т.н., професор, каф. ЕЕЕ

Стаднік Микола Іванович \_\_\_\_\_

Вінницький національний аграрний університет  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Т.в.о. завідувача кафедри ЕЕЕ  
к.т.н. доцент. Видмиш А.А.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА  
Ткачука Вадима Миколайовича

**1. Тема роботи:** «Засоби акумулювання енергії та їх роль у перспективах розвитку відновлювальних джерел енергії»

Керівник роботи: Стаднік Микола Іванович, д.т.н., професор  
Затверджені наказом ВНАУ від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 року № \_\_\_\_\_.

**2. Строк подання студентом роботи:** \_\_\_\_\_

**3. Вхідні дані:** 1. Стаднік М. І., Рубаненко О. О., Бондаренко С. В. Аналіз ефективності генерації електроенергії на основі сонячної енергії в Вінницькій області. «Техніка, енергетика, транспорт АПК» С.104-114. - Вінниця, 2016. -№2(94) ,- 128с., 2. Стаднік М. І., Рубаненко О. О., Бондаренко С.В. Визначення рівня генерації електроенергії на сонячній електростанції відносно її встановленої потужності. «Техніка, енергетика, транспорт АПК» С.213-220. - Вінниця, 2016. - №3(95) ,- 249с., 3. Стаднік М. І., Рубаненко О.О., Бондаренко С. В. Вибір встановленої потужності сонячної електростанції та її елементів. «Техніка, енергетика, транспорт АПК» С.166-1175. - Вінниця, 2017. -№1(96) ,- 189с., 4. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О., Методичні вказівки по оформленню дипломних робіт магістра для студентів ОКР «Магістр» спеціальності 8.10010101 «Енергетика сільськогосподарського виробництва» та студентів ОС «Магістр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка». – Вінниця: ВНАУ, 2016. - 64 с.

**4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити):** Вступ, 1. Системи акумулювання енергії відновлюваних джерел, 2. Системи акумулювання теплової енергії, 3. Системи зберігання енергії: аспекти безпеки і оптимізації, 4. Математичне описання процесу зарядження акумуляторних батарей з використанням вітроелектричних установок, 5. Робота фотоелектричних установок в електричних мережах підприємства, 6. Економічна частина, 7. Охорона праці під час монтажу, експлуатації та обслуговування СЕС, Висновки, Список використаних джерел, Додатки.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи ( роботи )	Примітка
1	Вступ Зовнішня інформація для виконання дипломної роботи.		
2	Виконання розділу 1		
3	Виконання розділу 2		
4	Виконання розділу 3		
5	Виконання розділу 4		
6	Виконання розділу 5		
7	Виконання розділу 6		
8	Виконання розділу 7		
9.	Оформлення пояснювальної записки		
10.	Підготовка доповіді і презентаційного матеріалу		

Завдання прийняв до виконання студент \_\_\_\_\_ Ткачук В.М.  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Стаднік М.І.  
(підпис)

## ЗМІСТ

Анотація.....	6
Аннотация .....	7
Abstract.....	8
Вступ.....	9
1. Системи акумулювання енергії відновлюваних джерел .....	11
1.1. Огляд систем акумулювання енергії .....	11
1.2. Огляд систем акумулювання різноманітних видів енергії.....	14
1.3. Методи підвищення ефективності застосування відновлюваних джерел енергії .....	24
1.4 Системи акумулювання енергії відновлюваних джерел .....	26
1.4.1. Класифікація акумуляторів енергії .....	26
1.4.2 Системи акумулювання електричної енергії.....	28
1.4.3.Вимоги до систем акумулювання електричної енергії.....	29
1.4.4. Вибір електрохімічних акумуляторів.....	30
2. Системи акумулювання теплової енергії.....	32
2.1. Класифікація теплових акумуляторів проводиться за кількома головними ознаками.....	33
2.2 Акумулювання тепла з використанням фазового переходу .....	36
2.3. Акумулятори на основі водню .....	37
2.4 Застосування водню у відновлюваній енергетиці .....	40
3. Системи зберігання енергії: аспекти безпеки і оптимізації .....	42
3.1. Класифікація систем зберігання енергії.....	46
3.2. Дослідження та проектування системи накопичення енергії для ВДЕ.....	51

4. Математичне описання процесу зарядження акумуляторних батарей з використанням вітроелектричних установок .....	53
4.1 Підходи до математичного моделювання роботи вітроелектричних установок.....	53
<b>4.2.</b> Підходи до математичного описання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну фотоелектричними установками .	58
5. Робота фотоелектричних установок в електричних мережах підприємства .....	64
5.1. Визначення необхідної місткості акумуляторної батареї і їх кількості.....	66
5.2. Дослідження впливу генерування фотоелектричної станції на режими роботи розподільних електричних мереж.....	69
5.3. Прогнозування генерування фотоелектричних станцій на добу наперед .....	72
6. Економічна частина .....	75
7. Охорона праці під час монтажу, експлуатації та обслуговування СЕС.....	79
Висновки.....	91
Список використаних джерел.....	92
Додатки .....	100

## **Анотація**

Ткачук Вадим Миколайович. Засоби акумулювання енергії та їх роль у перспективах розвитку відновлювальних джерел енергії.

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуті питання акумулювання енергії та їх роль у перспективах розвитку відновлювальних джерел енергії щодо покращення роботи підприємства. Робота виконана на основі даних, отриманих під час проходження практики на підприємстві. В роботі розглянуті питання акумулювання енергії та розрахунку електропостачання підприємства в цілому та одного з його цехів, вибір кількості і потужності трансформаторних підстанцій, параметрів лінії живлення та внутрішніх кабельних ліній тощо. Науково-дослідна частина роботи присвячена питанням оптимізації режимів роботи підприємства з використанням фотоелектричних установок. Розраховано основні техніко-економічні показники СЕП підприємства. Розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: сонячні панелі, інвертори, контролери, лічильник активної енергії.

Робота складається з сторінок 110., табл. 7., рис. 27 ., бібліографія 65., додатки 10.

## **Аннотация**

Ткачук Вадим Николаевич. Средства аккумулирования энергии и их роль в перспективах развития возобновляемых источников энергии.

В магистерской квалификационной работе рассмотрены вопросы аккумулирования энергии и их роль в перспективах развития возобновляемых источников энергии по улучшению работы предприятия. Работа выполнена на основе данных, полученных во время прохождения практики на предприятии. В работе рассмотрены вопросы аккумулирования энергии и расчета электроснабжения предприятия в целом и одного из его цехов, выбор количества и мощности трансформаторных подстанций, параметров линии питания и внутренних кабельных линий и тому подобное. Научно-исследовательская часть работы посвящена вопросам оптимизации режимов работы предприятия с использованием фотоэлектрических установок. Рассчитаны основные технико-экономические показатели с\эп предприятия. Рассмотрены вопросы охраны труда и безопасности в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: солнечные панели, инверторы, контроллеры, счетчик активной энергии.

Работа состоит из страниц 110, табл. 7., рис. 27., библиография 65, приложения 10.

## **Abstract**

Tkachuk Vadim Nikolaevich. Means of energy storage and their role in the prospects of development of renewable energy sources.

In the master's qualification work the issues of energy accumulation and their role in the prospects of development of renewable energy sources to improve the operation of the enterprise are considered. The work is performed on the basis of data obtained during the internship at the enterprise. The issues of energy accumulation and calculation of power supply of the enterprise as a whole and one of its shops, the choice of the number and capacity of transformer substations, parameters of the power line and internal cable lines, etc. are considered in the work. The research part of the work is devoted to the optimization of the modes of operation of the enterprise with the use of photovoltaic installations. The main technical and economic indicators of EPS of the enterprise are calculated. The issues of labor protection and safety in emergency situations are considered.

Keywords: solar panels, inverters, controllers, active energy meter.

The work consists of pages 110., table. 7., fig. 27., Bibliography 65., appendices 10.



## **Вступ**

**Актуальність теми.** Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні з кожним роком стає більш вираженим та суттєвим фактом заміщення традиційних викопних енергоресурсів. При цьому базовим напрямком розвитку відновлюваної енергетики вважається будівництво мережових електричних станцій на основі відновлюваних джерел енергії з метою продажу виробленої електроенергії за «зеленим тарифом». Даний напрямок успішно розвивається за рахунок державного стимулювання, однак є обмеженим як з технічної точки зору (через обмеження об'єднаної енергосистеми України з підключення нестабільних джерел електроенергії), так і з часового обмеження, яке визначається законом до 2030 року, коли «зелений тариф» має зрівнятися зі звичайним тарифом на реалізацію електроенергії, що в свою чергу зменшить економічну привабливість об'єктів відновлюваної енергетики.

Впровадження комплексних систем енергопостачання на основі ВДЕ може сприяти прискореному вирішенню завдань по досягненню заданого рівня вироблення енергії на базі відновлюваних джерел певних енергетичною стратегією України.

В зв'язку з тим, що від системи акумулювання в значній мірі залежить робота енергосистеми, забезпечення ефективної роботи системи акумулювання за рахунок узгодження джерела енергії і акумулятора є однією з найважливіших задач при проектуванні автономних енергосистем.

Через велику вартість системи акумулювання (20 – 30% від вартості енергосистеми) визначення оптимальної ємності системи акумулювання, при якій стабільне забезпечення споживачів гарантується із заданою ймовірністю, є також важливою задачею. Таким чином, окреслені задачі є одними з пріоритетних, і роботи в цьому напрямку будуть вагомим внеском в розв'язання проблеми підвищення ефективності автономних енергосистем на основі ВДЕ.

**Мета і задачі дослідження.** Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження можливостей використання системи акумулювання

для оптимізації режимів електроспоживання за умови використання дахових фотоелектричних установок

**Основними задачами є:** Аналіз видів систем акумулювання енергії, Оцінка можливості впровадження системи акумулювання енергії в системах генерації електричної енергії з відновлювальними джерелами енергії.

Оптимізація шляхом вибору доцільних перерізів кабельних ліній, визначення електричних навантажень, дотримуючись вимог надійності системи електропостачання;

- оптимальний вибір числа і потужності трансформаторів;
- оптимальний вибір параметрів лінії живлення та внутрішніх кабельних ліній.
- визначення показників оптимальної роботи дахових фотоелектричних станцій на підприємстві.

**Об'єкт дослідження** – фотоелектричні установки товариства з обмеженою відповідальністю.

**Предмет дослідження** – техніко-економічні показники роботи дахової фотоелектричної станції в системі електропостачання.

**Методи досліджень.** У магістерській роботі використовуються загальноприйняті методи розрахунку.

**Наукова новизна.** Обґрунтовано ефективність використання фотоелектричних панелей з метою генерації надлишкових потужностей в енергосистемі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Проведені дослідження дозволяють запропонувати практичні рекомендації для реалізації фотоелектричних станцій на дахах своїх цехів.

**Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи.** Матеріали магістерської роботи доповідались на конференціях та семінарах кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету протягом навчання.

## **1. Системи акумулювання енергії відновлюваних джерел**

### **1.1. Огляд систем акумулювання енергії**

Під акумулюванням (накопиченням) енергії розуміється введення будь-якого виду енергії в пристрій, обладнання, установку або споруду – в акумулятор (накопичувач) енергії – для того, щоб цю енергію звідти потім у зручний для споживання час знову в тому ж або в перетвореному вигляді отримати назад.

Для зарядки акумулятора енергією іноді потрібна додаткова енергія, і в процесі зарядки можуть виникати втрати енергії. Після зарядки акумулятор може залишатися в стані готовності (в зарядженому стані), але і в цьому стані частина енергії може втрачатися через довільного розсіювання, витоку, саморозряду або інших подібних явищ. При віддачі енергії з акумулятора також можуть виникати її втрати; крім того, іноді неможливо отримати назад всю акумульовану енергію.

Деякі акумуляторні батареї влаштовані так, що в них і повинна залишатися деяка залишкова енергія. Стан акумулятора при споживанні енергії, під час готовності, при віддачі енергії і після віддачі схематично представлено на рис. 1.1.

На рис. 1.1. використані міжнародні стандартні індекси *in* (лат. *Inductio*, 'Введення'), *ex* (лат. *Excessus*, 'вихід'), *d* (лат. *Dissipatio*, 'розсіювання') і *res* (лат. *Residuum*, 'Залишок').

Акумулювання енергії зазвичай розуміється як цілеспрямована дія. Однак енергія може акумулюватися (накопичуватися) і незалежно від волі або дій людини – в результаті фізичних процесів, що відбуваються в природі або в штучних пристроях. Як приклад на рис. 1.2. представлені деякі процеси акумулювання енергії в природі. Крім них слід відзначити:

- дуже велику кількість тепла, що міститься в гарячих рідких внутрішніх шарах Землі;
- кінетичну енергію обертання Землі навколо Сонця і навколо своєї осі;

- кінетичну енергію вітру, водних потоків і рухомих предметів;
- хімічну енергію, накопичену в живих істотах.

Методи підвищення ефективності застосування відновлюваних джерел енергії. Системи акумулювання енергії відновлюваних джерел. Класифікація акумуляторів енергії. Електрохімічні, теплові, інерційні акумулятори та акумулятори на основі водню.

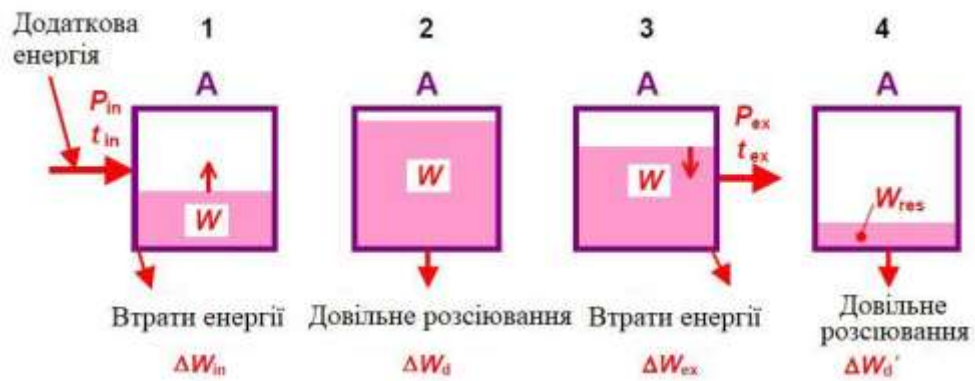


Рис. 1.1. Стан акумулятора енергії (А) (спрощено):

1 прийом енергії, 2 стан готовності, 3 віддача енергії, 4 розряджений стан;

$P_{in}$  споживана потужність,  $P_{ex}$  потужність, що віддається,  $t_{in}$  тривалість зарядки,  $t_{ex}$  тривалість віддачі енергії,  $W$  акумульована енергія,  $W_{res}$  залишкова енергія,  $\Delta W_{in}$  втрати при зарядці,  $\Delta W_{ex}$  втрати при віддачі енергії,  $\Delta W_d$  втрати енергії через довільного розсіювання.



Рис. 1.2. Приклади акумулювання енергії в природі

При штучному акумулюванні енергії можуть ставитися такі мети:

- створення запасу енергії (зазвичай у вигляді запасів палива) при переривчастому прибутті енергоносіїв, а також на випадки тимчасового припинення поставок енергії або виникненні кризових ситуацій і т. п.;
- отримання великої короткочасної потужності від джерел живлення обмеженої потужності, наприклад, для живлення ламп-спалахів або установок точкового зварювання (рис. 1.3);
- здійснення енергопостачання, незалежного від зовнішніх джерел енергії, наприклад, в засобах пересування, при використанні переносного і переміщуваного обладнання (рис. 1.4);
- вирівнювання змінного навантаження, наприклад, в поршневих механізмах, при використанні пневматичних інструментів, при надмірній нерівномірності добових графіків навантаження енергосистем (рис. 1.5) і в інших подібних випадках [1].

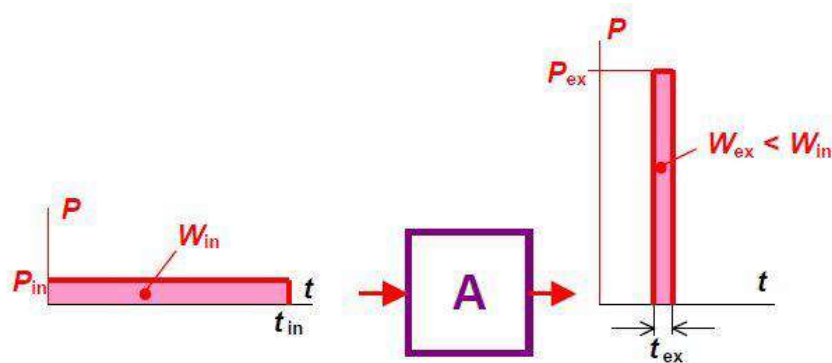
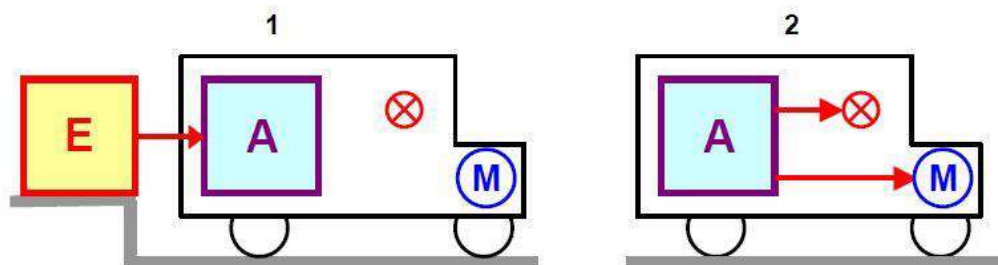


Рис. 1.3. Застосування акумулятора енергії (А) для отримання імпульсу енергії підвищеної потужності



1.4. Приклад застосування акумулятора енергії

в передвіжному енергоспоживачеві: 1 зарядка акумулятора від стаціонарного джерела електроенергії (Е), 2 використання акумульованої енергії

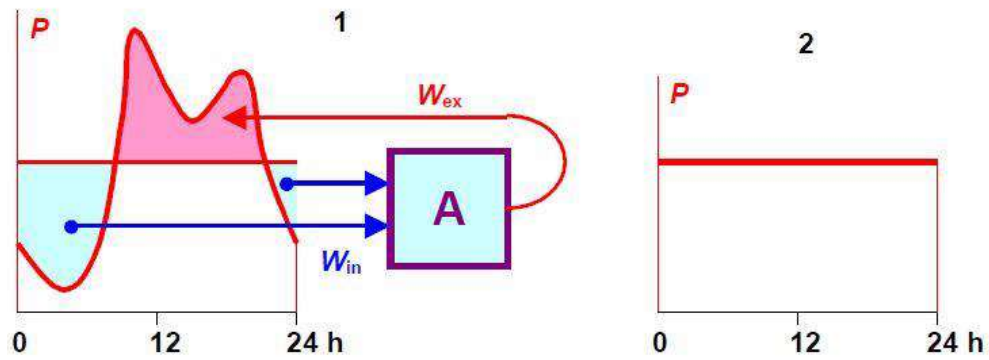


Рис. 1.5. 1 – вирівнювання добового графіка навантаження шляхом акумулювання енергії  $W_{in}$  під час нічного мінімуму навантаження і використання акумульованої енергії  $W_{ex}$  для покриття денних піків навантаження; 2 – одержуваний в ідеальному випадку рівномірний графік навантаження.

Акумулятори енергії зазвичай характеризуються:

- видом акумулюється енергії (електроенергія, тепло, механічна енергія, хімічна енергія та ін.);
- кількістю енергії, що акумулюється;
- споживаною і віддаваною потужністю;
- тривалістю зарядки і віддачі енергії;
- ккд акумуляції  $\eta = W_{ex} / W_{in}$ ,  $W_{ex}$  енергія, що віддається з акумулятора,  $W_{in}$  споживана акумулятором енергія;
- питомої акумулюючої здатності на одиницю маси або об'єму;
- абсолютною і питомою вартістю акумулятора;
- питомою вартістю одержуваної з акумулятора енергії.

## 1.2. Огляд систем акумулювання різноманітних видів енергії

Вельми просто акумулювати потенційну енергію в вантажних акумуляторах (рис. 1.6), що використовуються в різних ударних механізмах, заснованих на вільному падінні (наприклад, в копрах), і в вантажних

приводах (Наприклад, в маятникових настінних годиннику, порівняно недавно - і в приводах деяких вимикачів високої напруги).

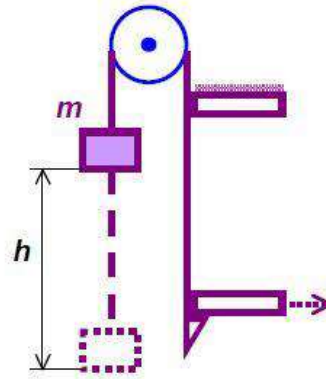


Рис. 1.6. Принцип пристрою вантажного акумулятора.

$$W = mgh, \quad (1.1)$$

де  $W$  – запасені енергія, Дж;  $m$  – маса вантажу, кг;  $g$  – прискорення тяжіння м/с<sup>2</sup> (на рівні землі  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>);  $h$  – висота підйому вантажу, м.

У пружині енергія акумулюється при пружної деформації і звільняється при поверненні пружини в первісний стан.

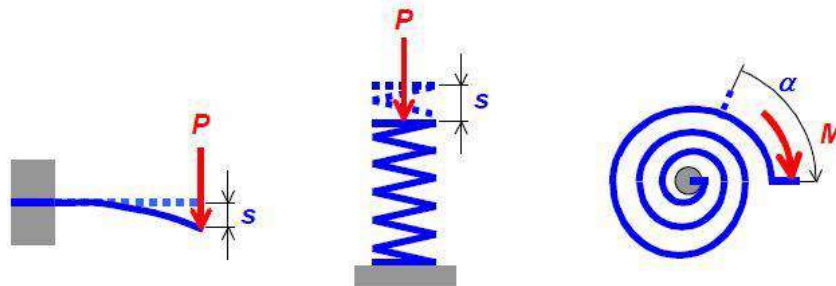


Рис. 1.7. Деякі види пружин.

зліва – пружина згину, в середині – кручена пружина стиснення, праворуч – спіральна пружина.  $P$  – діюча сила,  $M$  – діючий крутний момент,  $s$  – лінійна деформація,  $\alpha$  – кутова деформація.

Пружини широко застосовуються в ударних та інших швидкодіючих механізмах (в тому числі в механізмах швидкого відключення електричних апаратів), в амортизаторах ударів і вібрації, в коливальних механізмах і в пружинних приводах. Завдяки простоті, дешевизні і надійності вони іноді знаходять застосування і в якості приводу малопотужних електрогенераторів (наприклад, в апаратах зв'язку, передбачених для використання в польових умовах). ККД вантажних і пружинних акумуляторів енергії, в порівнянні з

іншими способами акумуляції, досить високий (майже 100%), але їх питома акумулюючі здатність відносно мала. Набагато більш ефективно енергія може акумулюватися в маховику (рис. 1.8).

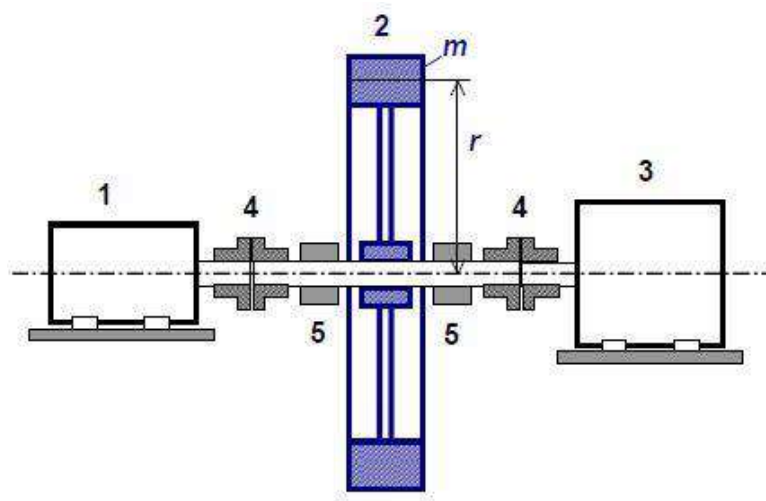


Рис. 1.8. Приклад принципу пристрою маховикового приводу. 1 – приводний двигун, 2 – маховик (в розрізі), 3 – робоча машина (Енергоприймач), 4– муфти (в розрізі, механізми зчеплення не показані), 5 – підшипники (опорні конструкції не показані).  $m$  – маса маховика, кг;  $r$  – радіус інерції, м Акумулювати механічну можливо енергію пневматичним способом, за допомогою стислого повітря, так як резервуар стислого повітря максимально (Рис. 1.9) простий і не вимагає практично ніякого догляду.

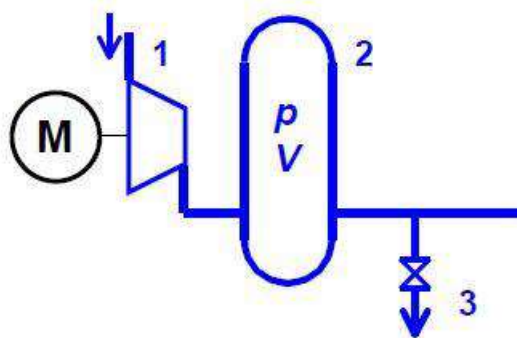


Рис. 1.9. Принцип пристрою пневматичного акумулятора:  
1 – компресор, 2 – резервуар стислого повітря, 3 – приєднання до приймачу стислого повітря.  $p$  – тиск,  $V$  – обсяг бака.

Тиск у резервуарі стислого повітря визначається приймачами стислого повітря і складає, наприклад, для живлення пневматичних (0,2 ... 0,5) Мпа інструментів, а для приводів вимикачів високої напруги – 2 МПа. Енергія, що



звільняється при розширенні стислого повітря, залежить від характеру зміни тиску під час розширення і не може однозначно визначатися обсягом бака  $V_0$  і тиском  $p$ .

Гідроенергія є, по суті, однією з різновидів механічної енергії, але відрізняється від інших різновидів тим, що її можна акумулювати у дуже великих кількостях і використовувати при такій потужності і у таких проміжках часу, які дозволяють істотно вирівнювати змінну навантаження енергосистем і забезпечити більш рівномірний режим роботи теплових (у тому числі атомних) електростанцій.

Для акумулювання і наступного використання гідроенергії споруджуються гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС), принцип пристрою яких представлений на рис. 1.10. До такої станції відносяться два водосховища (верхнє і нижнє), різниця рівнів яких при повністю заповненому верхньому сховищі зазвичай становить від 50 м до 500 м. В машинному залі є оборотні агрегати, які можуть працювати як двигуни-насосів, так і турбінами-генераторів; при високому напорі (приблизно 500 м або більше) використовуються окремі насосні і турбінні агрегати.

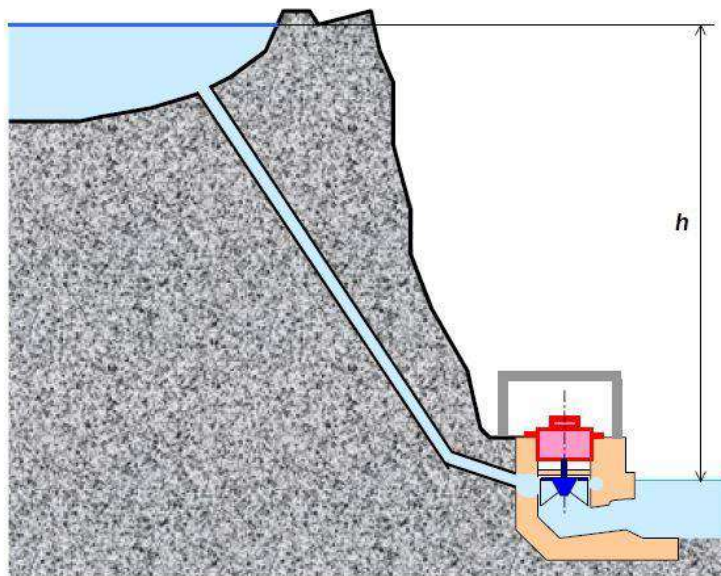


Рис. 1.10. Принцип пристрою гідроакумулюючої електростанції.

Під час, коли навантаження енергосистеми мінімальна (наприклад, вночі) ці агрегати заповнюють водою верхнє водосховище, а у час пікового навантаження системи перетворюють накопичену гідроенергію в електричну.

Незважаючи на те, що ККД такого акумулювання дорівнює (70 ... 85)% і що собівартість одержуваної таким способом електроенергії за багато (до декількох разів) вище, ніж на теплових електростанціях, вирівнювання графіка навантаження і можливість зменшення номінальної потужності теплових електростанцій знижують експлуатаційні витрати енергосистем і цілком виправдовують спорудження ГАЕС.

Як у випадку вантажних акумуляторів, так і у разі ГАЕС акумульована енергія може обчислюватися формулою:

$$W=mgh,$$

Питома акумулююча здатність також виражається аналогічно вантажним акумуляторів:

$$w=W/m=gh,$$

При напорі (50 ... 500) м отримуємо питомий енергозміст води  $w = (0,5 \text{ ... } 50) \text{ кДж/кг}$  або  $(0,14 \text{ ... } 14) \text{ кВтч/кг}$ . Водосховища великих ГАЕС дозволяють акумулювати енергію у кількості (1 ... 10) ГВтч. Особливо важливою вважається спільна робота ГАЕС з атомними електростанціями, щоб ті могли працювати якомога з більш рівномірним навантаженням.

Акумулювання тепла. Тепло можна акумулювати відносно просто – шляхом нагрівання твердих речовин або рідин. Відбір тепла з такого акумулятора може відбуватися природною або примусовою конвекцією, випромінюванням або за допомогою будь-якого теплоносія. Принцип пристрою найпростішого теплового акумулятора представлений на рис. 1.11.

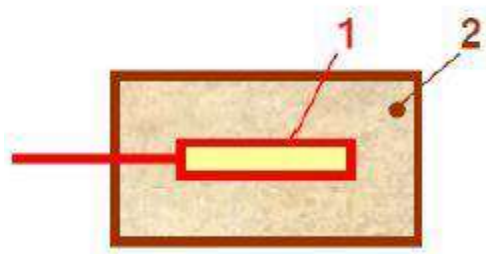


Рис. 1.11. Принцип пристрою теплового акумулятора:

1 – електричний або інший нагрівач, 2 – теплоакumuлююче речовина.

Однією з кращих теплоакumuлюючих речовин, завдяки своїй доступності, дешевизні, нешкідливості для навколишнього середовища і великої питомої теплоємності (4,2 кДж/(кг К)), є вода. Однак при атмосферному тиску воду можна нагріти без побоювання закипання тільки до температури 95 °С і, якщо вибрати температуру в кінці охолодження, наприклад, 45 0С, то отримуємо:  $w = 4,2 (95 - 45) \approx 200 \text{ кДж/кг} \approx 60 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$ .

Для акумулювання тепла можуть використовуватися і метали, природні та штучні кам'янисті породи, хімічні сполуки та ін. Їх питома теплоємність менше, ніж у води, і знаходиться зазвичай в межах від 0,5 кДж/(кг К) до 2 кДж/(кг К), але їх можна нагрівати до більш високої температури (наприклад, до 750 °С).

Питома акумулююча здатність таких матеріалів, в залежності від питомої теплоємності і допустимої температури нагріву, знаходиться зазвичай в межах від 50 Вт·год/кг до 400 Вт·год/кг. В електричних акумулюючих опалювальних приладах якості акумулюючої речовини часто використовують магнезит (кам'янисту породу, що складається головним чином з окису магнію), питома теплоємність якого дорівнює 1,3 кДж/(кг К), щільність – 3500 кг/м<sup>3</sup> і жароміцність – 2000 оС. Температура нагріву його, враховуючи теплостійкість і допустиму температуру інших матеріалів теплоаккумулятора, зазвичай не перевищує 800 0С, що, в разі кінцевої температури охолодження  $\theta_1 = 150 \text{ 0С}$ , дає питому акумулюючі здатність 230 Вт·год/кг. Водневе акумулювання енергії. Зазвичай водневе акумулювання енергії розглядається у вигляді ланцюжка, зв'язуючої первинне джерело енергії, виробництво водню, систему зберігання водню і водневу енергоустановку. Щодо застосування з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) цей ланцюжок зводиться як правило до отримання водню шляхом електролізу, зберігання водню в стислому або твердофазному пов'язаному вигляді і отримання електричної енергії з використанням електрохімічних генераторів (паливних елементів) або водородоспалюючих установок (включаючи двигуни внутрішнього згорання).

Подібна система розглядається в якості буфера між електричною мережею і ВДЕ і призначена не тільки для довготривалого зберігання енергії, а й для згладжування суттєвих пульсацій, пов'язаних зі змінним характером ВДЕ. Водень можна зберігати або в чистому вигляді, або у вигляді хімічних сполук з високим вмістом водню, з яких, при необхідності, він може бути легко одержаний безпосередньо на борту транспортного засобу в одному з наступних процесів:

Зміна параметрів або агрегатного стану водню:

- стиснення газу або комбінований процес стиснення і охолодження;
- зрідження водню. Водень, що володіє низькою критичною температурою, необхідно охолоджувати до температури нижче 20 К, щоб зберігати його в рідкому стані в посудинах без надлишкового тиску.

Акумуляція електричної енергії. Електроенергія може акумулюватися:

- в конденсаторах (у вигляді енергії електричного поля);
- в котушках індуктивності (у вигляді енергії магнітного поля);
- в первинних і вторинних гальванічних елементах (у вигляді хімічної енергії).

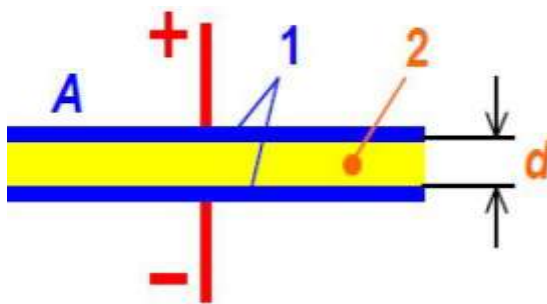


Рис. 1.12. Принцип пристрою плоского конденсатора:

1 обкладки, 2 діелектрик ємність такого конденсатора визначається за формулою:  $C = \epsilon (A/d)$ , де  $C$  – ємність конденсатора, Ф;  $A$  – площа обкладки, м<sup>2</sup>;  $d$  – товщина діелектрика, м;  $\epsilon$  – діелектрична проникність, Ф/м.

Енергія, запасена в конденсаторі, визначається формулою:

$$W = (CU^2)/2,$$

де  $W$  – запасена енергія, Дж;  $C$  – ємність конденсатора, Ф;  $U$  – напруга, прикладена до конденсатора, В.

Якщо використовувати обкладки з фольги і багатошаровий плівковий діелектрик, то можна виготовити конденсатори рулонного типу, у яких питома акумулююча здатність знаходиться приблизно в межах від 0,1 Дж/кг до 1 Дж/кг або від 0,03 мВт·год/кг до 0,3 мВт·год/кг. Через малу питому акумулюючу здатність конденсатори такого виду не підходять для тривалого збереження істотної кількості енергії, але вони широко застосовуються як джерела реактивної потужності в ланцюгах змінного струму і як ємнісні опори.

Значно ефективніше енергія може акумулюватися в електролітичних конденсаторах.

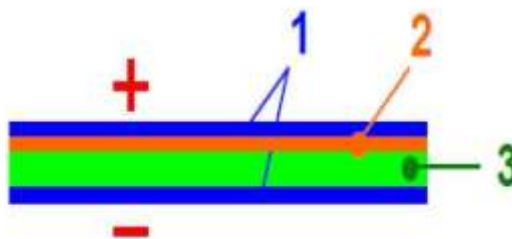


Рис. 1.13. Принцип пристрою електролітичного конденсатора. 1 металевий лист або фольга (алюміній, тантал або ін.), діелектрик з окису металу ( $Al_2O_3$ ,  $Ta_2O_5$  або ін.), 3 папір і т.п., просочена електролітом і гліцерином.

Так як товщина шару діелектрика в цьому випадку зазвичай залишається в межах 0,1 мкм, то ці конденсатори можуть виготовлятися з дуже великою ємністю (до 1 Ф), але на відносно малу напругу (зазвичай на декілька вольт). Ще більшу ємність можуть мати ультраконденсатори (суперконденсатори, іоністори), обкладинками яких служить подвійний електричний шар товщиною в декілька десятків часток нанометра на кордоні розділу електрода, виготовленого з мікропористого графіту, і електроліту. Ефективна площа обкладок таких конденсаторів досягає, завдяки пористості, до 10000 м<sup>2</sup> на кожен грам маси електродів, що дозволяє досягати дуже великої місткості при дуже малих розмірах конденсатора. На даний час

ультраконденсатори випускаються на напругу до 2,7 В і ємністю до 3 кФ. Їх питома акумулююча здатність знаходиться зазвичай в межах від 0,5 Вт·год/кг до 50 Вт·год/кг і є дослідні зразки з питомою акумулюючою здатністю до 300 Вт·год/кг.

Технологія виготовлення ультраконденсаторів вельми складна, і вартість за одиницю зберігаємої в них енергії тому набагато вище, ніж у інших конденсаторів, доходючи до 50000 €/кВт·год. Незважаючи на це, завдяки простоті конструкції, малим розмірам, надійності, високому ККД (95% і більше) і довговічності (кілька мільйонів циклів заряду-розряду), вони стали застосовуватися як в транспортних засобах, так і в промислових силових установках замість електрохімічних акумуляторів і інших засобів акумулювання енергії. Особливо вигідні вони тоді, коли енергія споживається у вигляді коротких імпульсів (наприклад, для живлення стартера двигунів внутрішнього згорання) або коли потрібна швидка (секундна) зарядка акумулюючого пристрою.

У котушці індуктивності енергія акумулюється у вигляді магнітного поля, коли через котушку протікає постійний струм. При підключенні до котушки ланцюгів споживання електроенергії і одночасному зниженні або припиненні струму збудження магнітного поля в цих ланцюгах виникає струм і виділяється енергія.

Енергія, акумульована в котушці індуктивності, виражається відомою формулою:

$$W=(LI^2)/2,$$

де  $W$  – акумульована енергія Дж,  $L$  – індуктивність котушки Гн,  $I$  – струм, що протікає в котушці А.

Питома акумулююча здатність котушок індуктивності зазвичай дуже мала – (0,1 ... 1) Дж/кг, або (0,03 ... 0,3) мВт/кг. Тільки в разі застосування надпровідних обмоток котушки індуктивності можна акумулювати енергію, достатню для використання, наприклад, в енергосистемах, схильних к швидким коливанням електричного навантаження.

Принцип дії первинних гальванічних елементів заснований на використанні електрорушійної сили (ЕРС), що виникає між електродами із різних речовин, що вступають в електрохімічну реакцію з електролітом, та знаходяться між ними.

Отримана при цьому електрична енергія визначається кількістю реагентів (використовуваної масою електродів і електроліту), і характеризується:

- початкової ЕРС, що знаходиться зазвичай, в залежності від типу елемента, в межах від 1 В до 3 В;
- зарядом, що віддається в електричний ланцюг при заданому способі розряду (наприклад, при деякому постійному струмі навантаження або при постійному опорі навантаження ланцюга); ця величина називається ємністю і виражається зазвичай в ампер-годинах (А·год).

Більш ефективними, ніж вугільно-цинкові, є лужні марганцево-цинкові первинні елементи, в якості електроліту в яких зазвичай застосовується гідроокис калію (КОН). Зовні такий елемент схожий на вугільно-цинковий, але його оболонка виконана з металу і з'єднана з позитивним полюсом; крім того, замість графітового стержня застосовується латунний. Початкова ЕРС також дорівнює 1,5

В, але питома енергоемність набагато більше – найчастіше від 120 до 130 Вт·год/кг.

Ще більш ефективно енергія може акумулюватися в літєвих первинних елементах, початкова ЕРС яких дорівнює 3 В, а питома здатність яка акумулюється знаходиться, в залежності від конкретного типу, в межах від 250 до 600 Вт·год/кг. У цих елементах знаходиться застосування близько 10 різних катодних матеріалів, і вони можуть виконуватися як циліндричними, як і дисковими. Мініатюрні дискові елементи знаходять застосування, зокрема, в наручних годинниках, в кишенькових калькуляторах, в відключаються ланцюгах відеокамер і в іншій мікроелектронній апаратурі. Вторинний гальванічний елемент або акумулятор після розряду може

повторно заряджатися від декількох десятків до декількох тисяч разів, в залежності від конкретного типу. Найбільш поширеним є свинцевий (кислотний) акумулятор.

Існує багато інших видів акумуляторів (всього близько 100). Наприклад, в системах електропостачання літаків, де маса обладнання повинна бути якомога менше, знаходять застосування срібно-цинкові акумулятори з питомою акумуляуючою здатністю, в середньому, 100 Вт·год/кг. Найвищу ЕРС (6,1 В) і найбільшу питомою акумуляуючі здатність (6270 Вт·год/кг) мають фторо-літієві акумулятори, серійного виробництва яких, однак, ще немає.

Первинні гальванічні елементи добре підходять для роботи в тривалому режимі, а акумулятори можуть використовувати як для тривалої роботи, так і для покриття короткочасних і штовхових навантажень. Конденсатори і котушки індуктивності Використовують, головним чином, для покриття імпульсних Н навантажень і для вирівнювання потужності при швидких змінах навантажень.

Для вирівнювання потужності, що віддається в енергосистему вітряними і сонячними електростанціями, можуть застосовуватися комбінації акумуляторів з ультраконденсаторами.

### **1.3. Методи підвищення ефективності застосування відновлюваних джерел енергії**

Однією з причин обмеженого використання відновлюваних джерел енергії є дискретність енергетичних потоків – періодичність надходження та змінність енергетичного потенціалу, що до останнього часу спричиняло значні ускладнення в багатьох випадках їх використання і не відповідало сучасним вимогам щодо енергопостачання споживачів. Крім того, в процесі широкомасштабного впровадження обладнання відновлюваної енергетики постає проблема створення регулюючих потужностей на основі традиційних енергосистем для забезпечення стабільного енергопостачання в періоди



відсутності енергії ВДЕ. Безумовно, в деяких випадках така необхідність є цілком виправданою, однак у даний час в рамках відновлюваної енергетики існує цілий ряд технічних засобів та методів вирішення проблеми, в тому числі за рахунок використання акумуляторів електричної та теплової енергії.

Високі техніко-економічні показники застосування відновлюваних джерел енергії, стабільні робочі параметри енергетичного обладнання та стабільне енергопостачання споживачів досягаються при комбінованому виробленні теплової та електричної енергії, комплексному її акумулюванні та при поєднанні ВДЕ як між собою, так і з технікою та технологіями традиційної енергетики. Створення ефективних комбінованих енергосистем з комплексним використанням різних акумуляторів енергії дозволяє підвищувати ефективність енерговикористання ВДЕ на 30-50%, поліпшує параметри виробленої енергії та забезпечує стабільність енергопостачання споживачів. Сучасні технології та обладнання, а також прийоми раціонального використання ВДЕ, ґрунтовані на комплексному використанні різних видів ВДЕ і акумуляторів енергії, фактично ліквідували перешкоди щодо їх широкомасштабного впровадження.

Основними завданнями при створенні комбінованих енергосистем на основі ВДЕ є забезпечення їх надійними акумуляторами енергії та створення ефективного допоміжного обладнання для зниження флуктуацій параметрів енергосистем і підтримання необхідних робочих параметрів, а також створення обладнання для автоматичного управління режимами їх роботи.

Оптимальне співвідношення окремих елементів у комбінованих енергетичних системах (КЕС) на основі ВДЕ визначається з урахуванням багатьох факторів, що впливають на роботу таких енергосистем.

Використання відновлюваних джерел енергії в конкретних КЕС на основі ВДЕ обумовлюється наступними факторами:

- рівнем забезпечення регіону (району, міста тощо) традиційними і відновлюваними джерелами енергії з урахуванням їх потенціалу;
- кліматометеорологічними умовами;
- структурою систем енергопостачання та енерговикористання;
- вимогами до якості електричної та теплової енергії;

- типом та параметрами навантаження;
- вимогами до погодинного графіка енергопостачання;
- економічними та екологічними факторами.

Комбіновані енергетичні системи для житлових та промислових об'єктів при компоновці, відповідній даній кліматичній зоні, та при врахуванні всіх вищенаведених факторів достатньо ефективні в експлуатації по всій території України. При визначенні оптимальних складових та потужності енергетичного обладнання, що входить до складу різних КЕС, встановлено, що в середній та північній географічних зонах України недоцільно прагнути їх повної автономності деяку частку енергопостачання (недостатню кількість енергії, виробленої енергоустановками на основі ВДЕ) більш доцільно компенсувати не збільшенням потужності енергетичного обладнання, а використанням традиційного палива. Для південних областей України, при застосуванні пасивного теплового акумулювання в літній час, можна досягти повної автономності таких об'єктів.

## **1.4 Системи акумулювання енергії відновлюваних джерел**

### **1.4.1. Класифікація акумуляторів енергії**

Електрохімічні, теплові, інерційні акумулятори Основними функціями акумуляторів енергії в енергосистемах на основі ВДЕ є:

- забезпечення безперебійного енергопостачання споживачів за рахунок накопичення надлишкової енергії та подальшого її використання в періоди відсутності енергії або недостатнього енергозабезпечення;
- забезпечення оптимального режиму роботи джерел енергії і споживачів за рахунок вирівнювання коливань в енергосистемі;
- підвищення потенціалу енергії до необхідної якості при накопиченні низькопотенціальної енергії;
- перетворення енергії одного виду в інший, залежно від потреб споживачів.

Існує багато різновидів накопичувачів енергії. За призначенням вони поділяються на автономні та стаціонарні, за улаштуванням та видом накопичуваної енергії на механічні, теплові, електричні та індуктивні. За своєю природою акумулятори енергії можна розділити на два основних класи: хімічні та фізичні. Перші накопичують енергію за рахунок хімічних реакцій, другі за рахунок фізичних явищ. Певною мірою до накопичувачів енергії можуть належати і природні енергоресурси, рослини та продукти харчування – усі вони є носіями енергії.

Акумулятори енергії за характером роботи поділяються на зворотні та незворотні. До зворотних або вторинних джерел належать накопичувачі, які здатні більше одного разу приймати і віддавати енергію. Якісні показники таких акумуляторів енергії визначаються кількістю можливих заряд-розрядних циклів. До незворотних (первинних) належать накопичувачі разового застосування, тобто вони здатні виконувати тільки один енергетичний цикл заряду-розряду.

При виборі накопичувачів енергії для конкретної енергетичної системи необхідно в однаковій мірі враховувати енергетичні та експлуатаційні показники як обладнання на основі відновлюваних джерел і споживачів енергії, так і накопичувачів енергії. До основних характеристик належать: питома потужність, питома енергія, питома вартість накопичувача енергії, термін заряду-розряду, термін служби, ККД, саморозряд, безпека, простота обслуговування, вид виробленої та споживаної енергії.

У таблиці 1.1 наведені характеристики накопичувачів енергії; найбільш реальним на даний час для вітрової та сонячної енергетики є застосування електрохімічних і теплових акумуляторів енергії, а також систем акумуляування на основі водню.

Механічні (інерційні) акумулятори енергії мають високі робочі характеристики, але їх застосування поки що обмежене рядом невирішених технічних проблем – підбір матеріалів, створення високоякісних підшипників, перетворення механічної енергії в інші види, висока вартість та інше.

Таблиця 1.1. Характеристики накопичувачів енергії

Акумулятори енергії	Питома енергія				Питома потужність, Вт/кг	КД.
	Теоретична		Реалізована			
	Вт·год/кг	Вт·год/л	Вт·год/кг	Вт·год/л		
Гідроакумулятори	0,27	0,27	0,2	0,2	0,5	65-75
Стиснене повітря (ступінь стиснення 66)	100	8	65-75	5-16	100	65-75
Маховики	10-570	160-1250	30-390	20-70	$7 \cdot 10^4$	70-85
Свинцеві акумулятори	70	740	26-50	30-70	100	50
Високотемпературні акумулятори	600-900	2000	100-220	70-180	220	70-80
Акумулятори з новими електролітами	480	2000	130	36-110	130	60-75
Акумуляуючі системи з ЕХГ	$3,7 \cdot 10^3$	$10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	100	100	45
Редокс-системи	836	$2 \cdot 10^3$	5-15	18-72	3	60-75
Ємнісні акумулятори	4	10	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$10^5-10^8$	30
Індуктивні акумулятори	4	0,1-0,4	0,1-0,4	2,8	$10^5$	25
Магнітні акумулятори	-	$2 \cdot 10^5$	-	-	$10^9$	25
Надпровідні акумулятори	20	50	$10^{-3}$	3-11	$5 \cdot 10^6$	80-95

Серед багатьох типів акумуляторів, що можуть бути використані в різних технічних системах, для застосування у відновлюваній енергетиці обираються такі, що за своїми властивостями та характеристиками найбільш придатні до роботи з обладнанням на основі ВДЕ.

#### 1.4.2 Системи акумуляування електричної енергії

Системи акумуляування електричної енергії призначені для накопичення і зберігання електричної енергії, отриманої на об'єктах відновлюваної енергетики, та позапікової енергії промислової електромережі на об'єктах традиційної енергетики з подальшим електроживленням споживачів.

У світі зараз ведуться активні наукові пошуки шляхів удосконалення вже відомих та розробки нових акумуляторів енергії. Науково-дослідні роботи щодо покращення характеристик електрохімічних лужних акумуляторів, що використовуються для акумуляування електричної енергії відновлюваних джерел, та оптимізації режимів їх експлуатації виконувались науковцями ІВЕ НАН України спільно зі спеціалістами технічного

університету м. Брно. В рамках цієї програми вирішувались наступні питання: вибір ефективних акумуляторів; оптимізація режимів заряду акумуляторів; розробка засобів та пристроїв для підтримки оптимальних режимів і умов експлуатації акумуляторів при роботі в енергосистемах з електрогенеруючим обладнанням на основі відновлюваних джерел енергії; розробка інструментів і методів експрес-аналізу стану окремих акумуляторів у ході тривалої експлуатації.

При роботі з електрогенеруючим обладнанням на основі ВДЕ системи акумулювання електричної енергії, працюючи в режимі постійного підзаряду, вирівнюють добові коливання, що виникають у процесі експлуатації, і забезпечують стабільне живлення споживачів електроенергії. При роботі з промисловою електромережею системи акумулювання електричної енергії накопичують позапікову електроенергію в нічний час і забезпечують електроживлення споживачів у періоди відключення від неї.

### **1.4.3. Вимоги до систем акумулювання електричної енергії**

Система акумулювання електричної енергії при застосуванні в комбінованих енергосистемах повинна відповідати таким вимогам:

- забезпечувати стабільне електроживлення споживачів електроенергії незалежно від періодичності роботи відновлюваних джерел енергії та в періоди відключення промислової електромережі;
- мати оптимальну енергоємність, що залежить від потреб енергосистеми в кожному конкретному випадку і забезпечується набором акумуляторів з послідовним або паралельним підключенням;
- забезпечувати необхідну робочу напругу та автоматичне регулювання режимами роботи.

#### **1.4.4. Вибір електрохімічних акумуляторів**

Вибір марки електрохімічних акумуляторів проводиться на основі аналізу їх технічних характеристик, які повинні забезпечувати ефективну роботу систем акумулювання з енергетичним обладнанням на основі відновлюваних джерел енергії. Найбільш прийнятними для роботи в таких енергосистемах у даний час є лужні нікель-кадмієві акумулятори вітчизняного виробництва – за якісними показниками і терміном служби вони мають значні переваги в порівнянні з кислотними акумуляторами, що компенсує їх вищу вартість.

Однак, у певних випадках цілком виправданим є застосування кислотних свинцевих, зокрема, герметичних акумуляторів в енергосистемах на основі відновлюваних джерел енергії.

При визначенні енергоємності акумуляторної батареї необхідно орієнтуватися на створення резервного запасу електроенергії для стабільного живлення споживачів; розрахунки проводяться або уточнюються в кожному окремому випадку. Необхідна енергоємність забезпечується набором певної кількості акумуляторів у певному їх підключенні – послідовному чи паралельному.

На даний час майже всі енергетичні системи на основі ВДЕ комплектуються свинцевими або лужними акумуляторними батареями, які випускаються промисловими підприємствами. Два варіанти стандартної системи акумулювання електричної енергії на основі кислотних та лужних акумуляторів, розробленої для резервного живлення споживачів електроенергії на об'єктах відновлюваної та традиційної енергетики представлено нижче:

акумуляторна батарея на основі лужних нікель-кадмієвих акумуляторів 5НК-80, що складається з п'яти послідовно з'єднаних елементів із напругою 1,2 В кожний. Блок із двох акумуляторних батарей забезпечує при розряді робочу напругу 12 В, номінальна ємність становить 80 А год.

Номінальна ємність  $C_{10}$  визначається при розряді струмом, що дорівнює  $0,1C_{10}$ ; енергоємність 960 Вт год; акумуляторна батарея на основі

кислотних свинцевих акумуляторів, що складається з шести послідовно з'єднаних елементів з напругою 2 В кожний; така батарея забезпечує при розряді робочу напругу 12 В, номінальна ємність становить 55 А год при 20-годинному режимі розряду, енергоємність 660 Вт год.

Для забезпечення необхідних параметрів електроенергії в схему системи акумуляування електричної енергії включається зарядний випрямляч. Визначено, що вказані вище акумуляторні батареї протягом 3-5 годин забезпечують нормальний робочий режим роботи споживачів електроенергії (телевізор, три електролампи, радіоприймач) із загальним набором потужності 200 Вт.

У результаті лабораторних досліджень електрохімічних акумуляторів визначено оптимальні режими роботи акумуляторних батарей із обладнанням відновлюваної енергетики та встановлено обмеження по верхній та нижній межі заряду та розряду акумуляторів при автоматизованому керуванні режимами роботи енергосистем.

Для забезпечення оптимальних режимів експлуатації системи акумуляування електричної енергії визначено величини граничних напруг, у межах яких необхідно проводити цикли заряду-розряду електрохімічних акумуляторів: для лужних акумуляторів верхня межа 16,5 В, нижня 12 В; для кислотних акумуляторів верхня межа 14,5 В, нижня 12 В.

## 2. Системи акумулювання теплової енергії

Однією з актуальних проблем відновлюваної енергетики є проблема акумулювання теплової енергії, в першу чергу, в сонячній теплоенергетиці; теплові акумулятори також ефективно використовуються в комплексі з вітроелектричними агрегатами, фотобатарейми та в традиційній енергетиці для зняття пікових навантажень.

Теплове акумулювання це фізичні або хімічні процеси, за допомогою яких відбувається накопичення тепла в тепловому акумуляторі енергії. Тепловими акумуляторами (ТА) називають пристрої, які забезпечують зворотні процеси накопичення, зберігання та віддачі теплової енергії відповідно до потреб споживача.

Акумулювання тепла в різних енергосистемах проводиться з метою забезпечення потреб опалення та гарячого водопостачання. Акумулювання тепла в будь-якій водонагрівальній системі дозволяє пристосовувати її до умов попиту на гарячу воду, що змінюється протягом доби. Застосування різних засобів для накопичення енергії при використанні сонячних енергетичних установок дозволяє також подолати проблему, пов'язану з нерівномірною інтенсивністю сонячної енергії протягом доби.

Навіть в умовах безхмарного неба необхідну кількість енергії при відповідній температурі рідини можна отримати тільки протягом кількох годин до і після полудня. Наприклад, сонячні енергетичні установки, що призначені для опалення приміщень, підтримують температуру теплоносія на рівні 60 °С лише близько трьох годин на добу. Оскільки в подібних системах періоди споживання і отримання енергії не співпадають, то очевидно, що накопичувати її необхідно в одні періоди доби, а використовувати в інші.

Практична реалізація різних типів теплових акумуляторів пов'язана в першу чергу з визначенням їх оптимальних робочих характеристик, з вибором недорогих і ефективних конструкційних матеріалів і теплоакумулюючих середовищ. Ефективність теплового акумулятора за



інших рівних умов визначається масою та об'ємом теплоакumuлюючого матеріалу (ТАМ), необхідного для забезпечення заданих параметрів процесу.

## **2.1. Класифікація теплових акумуляторів проводиться за кількома головними ознаками**

за природою акумулювання:

- теплоємнісні (ТЄА),
- акумулятори з фазовим переходом (АФП),
- термохімічні акумулятори (ТХА);

за рівнем робочих температур:

- низькотемпературні (до 100оС) ТА,
- середньотемпературні (від 100 до 400оС) ТА,
- високотемпературні (вище 400оС) ТА;

за тривалістю періоду заряду-розряду ТА:

- короткострокові (до 3-х діб),
- середньострокові (до 1 місяця),
- міжсезонні (до 1 півріччя).

Вибір та конструювання теплових акумуляторів проводиться з урахуванням потреб і параметрів енергосистеми та споживача теплової енергії.

Як правило, у відновлюваній енергетиці використовуються короткострокові або середньострокові низькотемпературні теплоємнісні акумулятори або акумулятори з фазовим переходом. Широкий спектр проблем при застосуванні акумуляторів тепла і велика різноманітність методів акумулювання приводять до використання різних технічних рішень, причому для кожного конкретного випадку впровадження ТА в енергетичну систему на основі відновлюваних джерел енергії необхідно проводити детальні дослідження і розрахунки.

Акумулявання тепла за рахунок теплоємності найменш ефективне; в даному випадку досить низька теплоємність багатьох теплоакумуючих матеріалів (ТАМ) повинна компенсуватися використанням їх значних об'ємів;

розряд акумуляторів характеризується змінною температурою. Ці акумулятори ще називаються теплоємнісні (ТЄА), тому що їх робота базується на використанні теплоємнісних характеристик різних твердих і рідких речовин.

Акумулятори, які використовують теплові ефекти зворотних фазових переходів (АФП), характеризуються більш високою густиною тепла при малому об'ємі теплоакумуючих матеріалів і практично постійною температурою розряду. Метод характеризується наступними недоліками: поперше, вартість ТАМів із фазовим переходом вище вартості традиційних теплоємнісних матеріалів (каміння, вода, гравій); по-друге, теплообмін в АФП потребує наявності розвиненої поверхні теплопередачі, що значно збільшує їх вартість. Тому при виборі ТАМів повинна враховуватися не тільки їх вартість, але й вартість пристрою АФП із урахуванням доступності хімікатів та конструкційних матеріалів.

Густина енергії в акумуляторах, які використовують зворотні хімічні реакції (так звані термохімічні акумулятори ТХА), вища за густину енергії в АФП і значно вища, ніж в ТЄА. Принцип роботи ТХА оснований на акумуляванні енергії, що поглинається і звільняється при розриві та створенні молекулярних зв'язків у повністю зворотніх хімічних реакціях. При створенні ТХА є значні труднощі, обумовлені невеликим числом дешевих хімічних сполук і виділенням у процесі хімічних реакцій газів.

Таким чином, на практиці широко використовуються теплоємнісні акумулятори та акумулятори з фазовим переходом. Їх можна рекомендувати для будь-яких процесів, як для промисловості з використанням значних об'ємів, так і в індивідуальних господарствах і технологічних процесах.

Акумулятори ТХА можуть бути рекомендовані лише в певних випадках із використанням безпечних технологій.

Для створення ефективних теплових акумуляторів необхідне вирішення таких першочергових завдань:

- розроблення тепло-акумулюючих матеріалів з високими питомими енергетичними характеристиками, великим ресурсом роботи і широким діапазоном робочих температур;
- вибір конструкційних матеріалів з високими теплотехнічними і корозійностійкими характеристиками;
- створення оптимальних конструкцій ТА залежно від функціонального призначення, джерела енергії та потреб споживачів.

При виборі робочих речовин для теплових акумуляторів необхідно враховувати енергетичні та експлуатаційні характеристики як джерела енергії, так і самого акумулятора. Основними робочими характеристиками ТАМів є:

питома енергія, робочий діапазон температур, стабільність і безпека в роботі, низька корозійна агресивність, недефіцитність і невисока вартість. При використанні гідратів звертають увагу на їх здатність приєднувати і втрачати молекулу води при нагріванні та охолодженні.

Всі варіанти практичного застосування ТА можна розбити на наступні основні групи:

- пасивне акумулювання, тобто пряме акумулювання теплової енергії безпосередньо конструкціями будівель;
- активне акумулювання – це акумулювання теплової енергії за допомогою спеціальних пристроїв, які накопичують, зберігають і віддають енергію;
- комбіноване активне та пасивне акумулювання. Пасивне акумулювання знаходить застосування в основному в сонячній енергетиці та деяких технологічних процесах, активне акумулювання – в різних енергосистемах традиційної та відновлюваної енергетики. Найбільш

ефективними при відповідній розробці можуть бути комбіновані системи акумулювання теплової енергії.

## **2.2 Акумулювання тепла з використанням фазового переходу**

Під акумулюванням на основі теплоти фазового переходу в більшості випадків розуміють акумулювання теплоти плавлення. Часто в доповнення до теплоти фазового переходу пропонують використовувати теплоту нагріву (внутрішню енергію) рідини або твердої фази. Це збільшує ємність акумулятора, але позбавляє можливості використовувати переваги теплопостачання при постійній температурі.

Системи акумулювання теплової енергії, основані на використанні теплоти фазового переходу, активно досліджуються, але багато з них у даний час знаходяться ще на стадії розробки та впровадження. Їх головними перевагами є висока теплоємність, постійна робоча температура та низький тиск; недоліками досить низька стабільність більшості ТАМів з фазовим переходом та ускладнення конструкції теплового акумулятора, необхідність вирішення проблеми теплообміну з акумулюючим середовищем.

В останній час у тепловому акумулюванні в інтервалі температур до 100 °С для теплоакумулюючих матеріалів з фазовим переходом зазвичай пропонують використання кристалогідратів. Однак кристалогідрати мають у своєму складі воду, внаслідок чого є недостатньо стабільними – максимальним для кристалогідратів є 50 робочих циклів заряду-розряду. При подальшій експлуатації змінюються їх фізико-хімічні та теплофізичні характеристики, що призводить до виходу з ладу теплового акумулятора, в якому вони застосовуються.

### 2.3. Акумулятори на основі водню

Важливим напрямом розвитку відновлюваної енергетики є воднева енергетика, яка займається вирішенням проблем, пов'язаних із застосуванням водню як енергоносія і акумулюючого середовища. Для комбінованих енергосистем на основі НВДЕ водень як енергоносіє дає можливість створювати довготривалі міжсезонні запаси енергії.

Поняття "воднева енергетика" або "воднева технологія", що застосовується для позначення нової області техніки і природних наук, яка виникла на стику хімії, хімічної технології, фізики, енергетики і машинобудування, з'явилося у середині 70-х років нашого століття. Воднева енергетика розглядає цілий комплекс питань, пов'язаних з отриманням, зберіганням і використанням водню для цілей енергетики. Воднева енергетика також розглядає застосування водню в абсолютно новій області – в якості енергоносія у системах з автономним енергозабезпеченням. Передбачається, що в майбутньому такі системи, основані на використанні енергії відновлюваних джерел (сонця, вітру і т.п.), відіграватимуть помітну роль загалом в енергетичному балансі країни. Основним видам відновлюваних джерел енергії властиві періодичність у роботі та зміна величини потенціалу енергії залежно від часу доби і року. Ця непостійність знижує енергетичну ефективність джерел, тому при використанні енергії відновлюваних джерел необхідний енергоносіє, зручний для зберігання, транспортування і використання. Розвиток водневої енергетики передбачає побудову ефективної та економічної інфраструктури постачання споживачів воднем, що використовується в якості енергоносія. Виробництво водню з метою акумуляції і транспортування енергії представляється ефективним рішенням проблеми стабільного енергопостачання від відновлюваних джерел.

Як показують прогнози, очікується рівновага між вартістю водню, одержаного за рахунок, наприклад, енергії Сонця, та сучасними

закупівельними цінами на водень, що отримувався із вуглеводневої сировини. Відповідно до прогнозів, економічна вартість переходу на водень вже на початку 21 століття не буде надзвичайно високою, якщо враховувати екологічні фактори. Сучасні дослідження показують, що водень може покрити до 85% всіх енергетичних потреб в секторі індустрії і 92% потреб побутового сектора і сектора індивідуальних споживачів. Він може замінити природний газ для побутових потреб, бензин у двигунах внутрішнього згоряння, спеціальні види пального в ракетній техніці, ацетилен у процесах зварювання металів, кокс у металургійних процесах, метан у паливних елементах.

Відомо, що водень легко горить або окислюється: при взаємодії його з киснем або фтором на одиницю ваги виділяється в 3,5 рази більше тепла, ніж при згорянні органічних речовин, наприклад, вугілля або вуглеводнів, нафти, природного газу. Раніше питання використання вільного молекулярного водню як палива не розглядалося, в першу чергу, тому, що водень не є первинним джерелом енергії у природі він зустрічається в різних сполуках, домінуючою серед яких є вода.

З енергетичної точки зору водень єдина альтернатива нафті та природному газу. Це пояснюється такими факторами:

- запаси водню у вигляді води на нашій планеті практично невичерпні;
- водень має високу теплоту згоряння, в кілька разів вищу, ніж у природних газів;
- водень, як паливо, може бути використаний для одержання теплової та електричної енергії, а також у будь-якому типі двигунів;
- водень екологічно чисте паливо, основним продуктом його згоряння є водяна пара, яка зволожує атмосферу.

В даний час усе ширше розглядається можливість використання водню як енергоносія майбутнього для вирішення важливих енергетичних і екологічних проблем і зменшення ризику, пов'язаного із збагаченням атмосфери вуглекислим газом.

Методи одержання, зберігання, транспортування, розподілу та використання водню достатньо широко вивчені і використовуються в промисловості; основною задачею в даний час є підвищення їх економічності, тобто зниження вартості при використанні різних видів водневих систем у промисловому масштабі.

Таким чином, водень у даний час є найбільш перспективною альтернативою природному паливу. Однак, для того щоб замінити природне паливо водневим, треба навчитися одержувати його не з вуглеводнів нафти і природного газу, а з води єдиного принципово невичерпного джерела водню із застосуванням у якості первинних відновлюваних джерел енергії. Для комбінованих енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії водень, як енергоносіє, дає можливість створювати довготривалі міжсезонні запаси енергії.

Проте недостатньо мати дешеве і економічне джерело водню, повинна бути вирішена проблема його зберігання і транспортування. Необхідно створити нові або, в крайньому випадку, пристосувати наявні енергетичні схеми та установки до водню, який значно відрізняється за теплофізичними параметрами від традиційних видів пального.

Останнім часом проблема застосування водню набула нових практичних контурів. Кризові явища в енергетиці, проблема захисту навколишнього середовища, повітряного басейну і світового океану від безперервного і загрозливого зростання забруднень нафтою та продуктами неповного згорання органічних палив, у першу чергу, рідкого вуглеводневого пального в двигунах внутрішнього згорання і дизельних двигунах автомобілів, стимулюють різке зростання інтересу до можливостей розширення виробництва водню і застосування його в якості палива в різних галузях господарювання та транспорту. Основні сфери заміщення традиційних енергоносіїв водневим паливом показані в таблиці 2.1.

**Таблиця 2.1. Основні сфери використання водневого палива**

	Галузь застосування	Заміна енергетичних продуктів
<b>Водень</b>	Побутові потреби	Природний газ
	Автотранспорт	Бензин
	Металургійна промисловість	Кокс
	Зварювальна техніка	Ацетилен
	Паливні елементи	Метан
	Ракетна техніка	Спеціальні види пального

#### **2.4 Застосування водню у відновлюваній енергетиці**

На основі аналізу науково-технічної інформації та практичних напрацювань у галузі водневої енергетики створено ряд моделей екологічно чистих систем виробництва, зберігання і використання водню різної енергетичної ємності в залежності від потужності енергоустановок, визначено їх енергетичні параметри, економічні показники, технічне і технологічне забезпечення і створено технічні проекти на системи акумулювання водню такої установленної потужності: 24 кВт, 84 кВт, 290 кВт, 410 кВт. Системи акумулювання універсальні, можуть бути застосовані в енергосистемах на відновлюваних джерелах енергії (вітрова, сонячна та гідросилова енергія), при цьому енергія первинних джерел енергії використовується для одержання водню на електролізних установках.

Основою роботи систем є перетворення електричної енергії, виробленої відновлюваними джерелами, в хімічну енергію водню з наступним використанням її споживачами у вигляді електричної і теплової енергії залежно від потреб споживачів.

Основним елементом міжсезонної системи акумулювання на основі водню, на який орієнтовано розрахунок всіх її елементів, є установка для одержання водню. В свою чергу, вибір установки пов'язаний з енергетичною потужністю відновлюваних джерел енергії і знаходиться у прямій залежності від потужності електрогенеруючого обладнання. В даний час створено ряд електролізних установок, більш ефективних для застосування у відновлюваній енергетиці.



В процесі електролізу основними продуктами є водень і кисень, у промисловості кисень часто не використовується в повній мірі. В енергокомплексі на відновлюваних джерелах кисень буде використано для одержання електричної енергії в паливних водень-кисневих елементах. Вибір системи зберігання водню залежить, в основному, від потужності енергосистеми, характеристик та вимог споживача.

У випадку використання електролізних установок невеликої потужності застосування рідкої форми зберігання недоцільне з економічної точки зору, зберігання в формі гідридів металів у великих кількостях є неможливим при сучасній технології виготовлення гідридів металів вітчизняною промисловістю.

Оскільки питомі вагові характеристики систем з гідридною формою зберігання водню дуже низькі, їх можна використовувати тільки в стаціонарних установках.

Основною формою зберігання в енергосистемах невеликої потужності є стиснений водень, залежно від потреб від 10 до 150 атм. Використання водню в комбінованій вітроенергетичній системі здійснюється в таких варіантах:

- спалювання з одержанням теплової енергії;
- перетворення в електричну енергію (мотор-генератор, паливні елементи);
- використання в автотранспорті.

Досліджені різні варіанти використання водню в теплових установках, проведені розрахунки з урахуванням ККД установок. В умовах енергокомплексу на основі ВДЕ середньої потужності буде здійснюватися спалювання водню в пальниках побутового і промислового призначення.

При використанні водню для побутових потреб використовуються плити, оснащені водневими пальниками, наприклад, уніфіковані газові плити з деякими змінами в конструкції пальників.

Для забезпечення гарячого водопостачання і опалення будинків водень спалюється із застосуванням промислових пальників. Особливий інтерес для одержання електроенергії представляють воденькисневі паливні елементи, при цьому також вирішується проблема використання кисню, одержаного в процесі електролізу води.

### **3. Системи зберігання енергії: аспекти безпеки і оптимізації**

З розвитком і розповсюдженням ВДЕ (відновлюваних джерел енергії) в загальному обсязі генеруючих потужностей, а також поступовим переходом від централізованої системи енергопостачання до розподіленої посилюється увага до надійності, безпеки та стійкості електричних систем. Однією із загроз стабільної роботи електромережі може бути надмірне колювання потужності та існування автономного джерела живлення, пов'язаного з використанням великої кількості змінних ВДЕ. З іншого боку, оскільки споживання електро- і теплоенергії зростає, то пропорційно зростає і потреба в її додаткових запасах, яка може бути непередбаченою. Як наслідок, зміна напруги та неможливість збалансувати колювання пропозиції і попиту енергії можуть спричинити зрив у постачанні енергії, призвести до неефективного використання енергії та генераторів, нездатності використовувати ВДЕ та зменшити залежність від викопного палива, неможливість ефективного планування виробництва енергії тощо. Одним із варіантів розв'язання таких ситуацій є системи зберігання (накопичення, акумулювання) енергії – технології для перетворення електричної енергії в інші її форми, придатні для зберігання, в періоди відносно високого виробництва та низького попиту з подальшим її перетворенням знову у форму електричної енергії і віддачею в електромережу для подальшого використання в періоди низького виробництва або більш високого попиту [5].

Історично СЗЕ відігравали такі три основні ролі: зменшення витрат на енергію шляхом її зберігання протягом непікових періодів, коли її ціна нижча, для використання в пікові години замість купівлі за більш високими цінами; для підтримки споживачів енергії у разі несправностей в енергетичній мережі (наприклад, через стихійні лиха або війни); для підтримки та поліпшення якості, частоти і напруги живлення [12].

Для України, окрім згаданого вище, роль СЗЕ є важливою з огляду на велику частку атомної генерації (60 %) та потребу енергосистеми України у збільшенні регулюючих потужностей.

Отже, Україна повинна мати достатню генеруючу потужність для того, щоб задовольняти середній попит на електроенергію, а не пікові потреби. Україна є експортером електроенергії до європейських країн, тому впровадження таких проектів забезпечить рівномірність електропостачання. Оскільки система енергопостачання належить до критичної інфраструктури (КІ) [2; 23], Україна повинна мати розуміння європейських практик її захисту та надійності, як-от СЗЕ, тому що загроза її функціонуванню є загрозою національній безпеці.

У роботі здійснено огляд СЗЕ з акцентом на можливі збої, які можуть бути характерними для різних технологій зберігання енергії, а також способи оптимізації їхньої роботи.

Оскільки зацікавленість у розширеному застосуванні різних систем СЗЕ (не беручи до уваги ГАЕС) з'явилася лише наприкінці першого десятиліття ХХІ ст. (в результаті тиску, викликаного дерегуляцією економіки та екологічними питаннями [10]), питання їх безпеки та оптимізації роботи висвітлено в літературі дуже стисло. Велика кількість літератури зосереджена здебільшого на перевагах, а не на недоліках використання СЗЕ, акцентуючи увагу на здатності систем зменшувати коливання ВДЕ [7], їхніх економічних та технічних характеристиках [17]. Багатокритеріальний аналіз оцінки та порівняння ФЕ (фотоелектричних) СЗЕ вказує на те, що літій-іонні (Li-ion) акумулятори (батареї) є найкращим рішенням для зберігання сонячної енергії, оскільки вони здатні не тільки стримувати швидкі зміни напруги, але й пом'якшувати зміни напруги в мережі, викликані підключенням СЕС (сонячних електростанцій) [19]. Основні недоліки СЗЕ, про які йдеться в літературі, – це неможливість керування надмірним зарядом та розрядом, можливість випадкової втрати накопиченої енергії, висока

вартість технологій тощо (наприклад, CAES, свинцево-кислотні (LeadAcid) акумулятори) [16; 22].

Останні дослідження з оптимізації СЗЕ пов'язані з такими питаннями, як визначення оптимальної потужності технологій СЗЕ, методи прогнозування попиту на електроенергію з боку житлових домогосподарств для планування графіка навантажень, ефективність графіка навантажень відповідно до різних схем ціноутворення та ін. [1; 3; 4].

Питання оптимізації функціонування систем СЗЕ розкрито в контексті контрольних схем, коли можна належним чином регулювати рівні заряду (SOC) під час зміни потужності [14; 21]. Евристична оптимізація та нечіткі схеми згладжування є дуже популярними типами моделювання для таких завдань. Інший напрям літератури досліджує багатоцільову конфігурацію оптимізації гібридної системи накопичення енергії (HESS), щоб максимізувати стійкість згенерованої енергії вітру за мінімізованого інвестування в HESS. Для вирішення проблеми застосовано комбінацію методів багато- та монооб'єктної оптимізації [11].

Лінійне програмування було використано під час вивчення питання оптимальної потужності та кількості встановлених одиниць СЗЕ [6].

Цю роботу присвячено порівняльному аналізу СЗЕ з погляду агрегації їх типів і висвітлення аспектів безпеки їхньої роботи, можливостей оптимізації їх функціонування та перспектив застосування в Україні. Результати дослідження можуть бути корисними енергогенеруючим компаніям під час ухвалення рішень щодо планування виробництва електро- чи теплоенергії, урядам країн під час розроблення енергетичних та екологічних стратегій.

Класифікація СЗЕ. Найпростіша класифікація СЗЕ порівнює системи за двома критеріями:

функція та форма [10]. З погляду функції СЗЕ поділяють на такі, основне призначення яких полягає в забезпеченні безперебійного енергопостачання (здебільшого на рівні домогосподарств), та такі, що

призначені для так званого енергоменеджменту (переважно в промисловості), що дозволяє клієнтам «відкладати» попит на енергію з одного дня на інший для зниження витрат.

Класифікація СЗЕ за формою зберігання енергії є найпопулярнішою. Виокремлюють хімічні, електричні, магнітні та механічні системи. Хімічні системи покривають акумулятори та зберігаючі елементи на основі водню. Електромагнітні системи включають надконденсатори та надпровідники. Механічні системи можна розділити на накопичувачі кінетичної енергії, включаючи флюїди, та накопичувачі потенційної гідроенергії та стиснутого повітря (САЕС).

Зберігання теплової енергії (ЗТЕ) передбачає зберігання низькотемпературної енергії (накопичення холодної енергії, сховища криогенної енергії (CES)) та зберігання високотемпературної енергії (чутливі теплові системи (пари або акумулятори з гарячою водою), графіт, гарячі породи та бетон, системи латентного тепла (матеріали фазової зміни)) [5; 6; 12]. Температурна класифікація ЗТЕ залежить від того, чи робоча температура матеріалу зберігання енергії є вищою за температуру приміщення: з огляду на це ТЕС можна розділити на промислові охолодження (нижче ніж 18 °С), охолодження будівлі (за температури від 0 до 12 °С), опалення будівлі (за 25–50 °С) та промислове зберігання тепла (вище за 175 °С) [10].

Інша класифікація [19] розрізняє СЗЕ за масштабом/виходом енергії: великомасштабні електричні (гідроакумуляуючі станції, САЕС, маховики), великогабаритні теплові (підземні сховища теплової енергії (UTES), розплавлені солі), малогабаритні електричні (акумулятори) і малогабаритні теплові (зберігання льоду, резервуари для гарячої та холодної води).

Що стосується типів електростанцій, то ГАЕС (гідроакумуляуюча станція), найбільш розповсюджена великомасштабна СЗЕ, пов'язана з гідроелектростанціями та вітровими електростанціями (ВЕС). САЕС, ще одна єдина комерційно доступна технологія (крім ГАЕС), що здатна забезпечити

надзвичайно велике зберігання і постачання енергії, працює на базі звичайних газових турбін та ВЕС. Енергетичні установки на ВЕС (вітер, сонячна енергія, енергія хвилі) можуть бути доповнені СЗЕ типу акумулятора NaS (натрієво-сірчана батарея) та паливними елементами (fuel cells). Зберігання енергії маховиками (Flywheel energy storage) розглядається як підтримка ВЕС у поєднанні з іншими СЗЕ, а не як автономна установка. ВЕС також придатні для застосування надпровідних сховищ магнітної енергії (SMES) (єдина відома на сьогодні технологія для зберігання електричної енергії безпосередньо в електричному струмі) та надконденсаторів (SC).

### **3.1. Класифікація систем зберігання енергії**

Класифікація СЗЕ відповідно до рейтингу потужності та часу розряду є такою [10]:

- ГАЕС, CAES та CES застосовуються для пристроїв генерації енергії потужністю понад 100 МВт із погодинною та щоденною вихідною тривалістю. Вони можуть бути використані у великомасштабній генерації для вирівнювання навантаження та обертового резерву.

- Батареї, акумуляторні батареї, паливні елементи та елементи «Metal-Air» мають відносно швидку реакцію ( $\ll 1$  с), відносно довгий час розряду (в годинах) і, отже, є більш прийнятними для так званого перекриття енергії. Типове значення потужності для цих установок становить близько 100 кВт•10 МВт.

- Маховики, акумулятори, SMES, конденсатори та надконденсатори є прийнятними переважно для установок потужністю нижче ніж 1 МВт. Ці СЗЕ мають швидку відповідь (мілісекунди) і тому можуть бути використані для підвищення якості згенерованої енергії, тобто в разі миттєвого падіння напруги, мерехтіння і короткочасного UPS (джерела безперебійного живлення).

I, зрештою, СЗЕ можна також класифікувати за тривалістю зберігання енергії, ефективністю циклу, щільністю енергії та потужності, життєвим циклом, вартістю системи, впливом на навколишнє природне середовище тощо.

Аспекти безпеки і захисту СЗЕ. З огляду на те, що СЗЕ перебувають у фокусі уваги відносно короткий час, інформація про можливі випадки несправностей, що притаманні тим чи тим технологіям зберігання енергії, є неповною. Нижче узагальнено відомі недоліки, які можуть вплинути на безпечну експлуатацію виробничих потужностей, оснащених СЗЕ (див. табл.3.1).

**Таблиця 3.1: Основні недоліки та можливі ризики СЗЕ**

<b>Тип СЗЕ</b>	<b>Основні відомі недоліки</b>	<b>Можливі ризики</b>
ГАЕС	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Дефіцит наявного рельєфу для резервуарів і дамб</li> <li>• Споживання великої кількості енергії для запуску системи</li> <li>• Тривалий час підготовки проектів (зазвичай 10 років)</li> <li>• Висока вартість будівництва (зазвичай від 100 до 1000 дол. США)</li> <li>• Екологічні проблеми (необхідність видалення дерев та рослин з великої земельної ділянки перед затопленням водосховища)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Переповнення резервуара</li> </ul>
САЕС	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Залежність від рельєфу (бажана близькість шахт, соляних печер, водоносних горизонтів або виснажених газових родовищ)</li> <li>• Нижча ефективність у порівнянні з ГАЕС (42 %)</li> <li>• Негативний екологічний вплив</li> </ul>	Немає інформації

Тип СЗЕ	Основні відомі недоліки	Можливі ризики
Акумулятори (батареї)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низька щільність енергії</li> <li>• Низька потужність</li> <li>• Високі витрати на технічне обслуговування</li> <li>• Короткий цикл життя</li> <li>• Обмежена здатність до розряду</li> <li>• Екологічний вплив (більшість батарей містять токсичні матеріали)</li> </ul>	Немає інформації
Свинцево-кислотні (LA) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Короткий цикл життя (500–1000 циклів)</li> <li>• Низька щільність енергії (30–50 Вт/кг) внаслідок високої щільності свинцю</li> <li>• Недостатня низькотемпературна продуктивність, що потребує наявності системи термічного управління</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Перезарядка призводить до викидів H<sub>2</sub></li> <li>• Сульфатація в разі тривалого зберігання</li> </ul>
Нікель-кадмієві (NiCd) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Порівняно висока вартість (1000 дол. США/кВт•год), пов'язана з виробничим процесом</li> <li>• Залежність від глибини життєвого циклу, який може знизити тривалість життя системи</li> <li>• Притаманний «ефект пам'яті», коли батареї мають здатність повного заряду лише після серії повних розрядів</li> <li>• Екологічний вплив (кадмій є токсично важким металом)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Можливість термічних вибоїв</li> </ul>
Натрієво-сірчані (NaS) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Необхідність роботи за високої температури (300–350 °C), для чого потрібне джерело тепла, яке використовує власну енергію заряду акумулятора, частково знижуючи його продуктивність</li> <li>• Висока початкова вартість капіталу (2000 дол. США/кВт та 350 дол. США/кВт•год)</li> <li>• Низька щільність енергії (120 Вт/кг) і потужності (150 Вт/кг)</li> <li>• Кількість виробників цих акумуляторів надзвичайно обмежена</li> </ul>	Немає інформації



Тип СЗЕ	Основні відомі недоліки	Можливі ризики
Літій-іонні (Li-ion) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Необхідність роботи за високої температури</li> <li>• Різна теплова енергія, характерна для різних хімічних сполук</li> <li>• Висока вартість (&gt; 600 дол. США/кВт•год) завдяки спеціальній упаковці та внутрішнім схемам захисту від перезарядки</li> <li>• Нетривалий час збереження енергії (4–5 годин)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Експлуатація понад типове робоче вікно температури (0–50 °С) може призвести до розкладання органічного електроліту та горючого газу</li> <li>• Перезарядка може призвести до появи літію на аноді, що є загрозою замикання</li> </ul>
Потокові (проточні) акумулятори	<p>Акумулятори з окислювальним ванадієм (VRB) та з бромистим цинком (ZBR):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• сильна залежність від навколишньої температури;</li> <li>• невисокі значення питомої енергії (30–50 Вт•год/ кг);</li> <li>• висока вартість технології;</li> <li>• є більш складними системами в порівнянні зі звичайними акумуляторами.</li> </ul>	Немає інформації
Паливні елементи	<p>Паливні елементи з розплавленого карбонату (MCFCs):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• висока температура: клітини забирають багато часу, щоб досягти робочої температури;</li> <li>• через високу температуру і корозійний характер електроліту є небезпечними для виробництва електроенергії на дому.</li> </ul> <p>Твердокристалічні паливні елементи (ТОФ):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• висока вартість будівельних матеріалів.</li> </ul>	Немає інформації
Маховики для зберігання енергії (FES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Коротка тривалість роботи</li> <li>• Висока втрата саморозряду</li> <li>• Низька щільність енергії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Можливість несправності ротора</li> </ul>

<b>Тип СЗЕ</b>	<b>Основні відомі недоліки</b>	<b>Можливі ризики</b>
Надпровідні сховища магнітної енергії (SMES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Надпровідна котушка чутлива до змін температури</li> <li>• Надійність роботи залежить від системи охолодження</li> <li>• Лише невелика кількість SMES з невеликою місткістю є комерційно доступними</li> <li>• Висока вартість</li> <li>• Екологічні проблеми, пов'язані з сильним магнітним полем</li> </ul>	Немає інформації
Суперконденсатор (SC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Коротка тривалість роботи</li> <li>• Високі втрати енергії внаслідок втрати саморозряду</li> </ul>	Немає інформації
Сховища криогенної енергії (CES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Відносно низька ефективність (40–50 %) залежно від поточного споживання енергії для зрідження повітря</li> <li>• Технологія перебуває в стадії розробки</li> </ul>	Немає інформації

Відносно коротка тривалість накопичувальної здатності енергії, висока втрата фракції та низька щільність енергії є одними з головних недоліків, що стримують застосування у великій енергетиці таких СЗЕ, як маховикові системи, акумулятори, SMES та паливні елементи.

Як відносно новий та динамічний процес розробка та впровадження технологій зберігання енергії пов'язана з низкою проблем безпеки. Отже, відкритими є питання щодо географічного розташування енергетичних об'єктів, де потрібно встановити СЗЕ, та щодо способу, у який ними оперують. Належні системи вентиляції та протипожежного захисту, термічне управління, взаємозв'язок з іншими системами (комунікації, системи контролю тощо) є одними з основних заходів забезпечення безпеки експлуатації СЗЕ.

Питання безпеки охоплюють не лише технічні питання, але й економічні та політичні аспекти. Наприклад, такі ситуації, коли енергопостачання не покриває потреби в енергії, становлять серйозну загрозу безпеці енергопостачання.

### 3.2. Дослідження та проектування системи накопичення енергії для ВДЕ

Оптимальне планування системи СЗЕ має включати вибір типу СЗЕ, а також визначення бажаної потужності і розташування системи [24]. Зазвичай як цільова функція приймається мінімальне споживання енергії і мінімальний діапазон зміни потужності акумулятора або максимізація прибутку (NPV – чистої приведеної вартості) станцій, що працюють на ВДЕ із застосуванням СЗЕ [8].

Вибір типу СЗЕ залежить від технічних характеристик СЗЕ, зокрема тривалості заряду та розряду, діапазонів потужності та щільності, а також від ресурсів компанії, її схильності до прийняття ризиків, пов'язаних із запровадженням того чи того типу СЗЕ.

Найпоширенішим моделюванням є техніко-економічна модель СЗЕ, що складається з трьох основних модулів: модуль розрахунку самоспоживання енергії, модуль розрахунку NPV та, як результат попередніх модулів, модуль оптимізації потужностей зберігання та системи генерації енергії [9; 13].

Коефіцієнт самоспоживання (SC) – це співвідношення власного споживання енергії до загальної кількості енергії, яку згенеровано. Що нижчий SC, то більше згенерованої енергії відпускається до енергетичної мережі. SC отримують за формулою:

$$SC = E_c / E_p * 100$$

де  $E_c$  – спожита енергія за рік (кВт•год), яка, своєю чергою, дорівнює різниці між обсягом згенерованої енергії (кВт•год) за рік та обсягом енергії, що відпускається в мережу (кВт•год);

$E_p$  – обсяг згенерованої енергії за рік (кВт•год).

NPV при даному інвестиційному році  $t$  розраховується як сума дисконтованих грошових надходжень та витрат протягом  $n$  років експлуатації

акумуляторної системи. При цьому грошові витоки включають зазвичай інвестиційні витрати для генератора енергії і акумулятора, витрати на експлуатацію та технічне обслуговування. Грошові надходження складаються з: 1) електроенергії, що споживається самостійно (тобто продукт електроенергії, виробленої протягом кожного року експлуатації системи і самоспожитої),

помноженої на роздрібну ціну на електроенергію, та 2) проданої електроенергії (тобто продукту електроенергії, виробленої протягом кожного року роботи системи та  $1-SC$ ), помножене на оптову ціну на електроенергію.

Для знаходження оптимального розміру СЗЕ та генератора енергії для кожного інвестиційного року та кожного зі сценаріїв ціни на електро-енергію обчислюють NPV для різних комбінацій системи генерації енергії та потужності СЗЕ.

З огляду на результати обчислень визначають таку комбінацію потужностей системи генерації енергії і її зберігання, що максимізує NPV загальної системи зберігання.

Оскільки оптимізація СЗЕ залежить від щорічного виробництва енергії, воно має бути детермінантою необхідної потужності системи генерації для визначення вартості інвестицій.

Отже, потужність СЗЕ можна визначити також за формулою [18]:

$$ES_s = E_p / E_{pa}$$

де  $ES_s$  – потужність СЗЕ;  $E_{pa}$  – річне виробництво енергії на кВт встановленої потужності.

Що стосується розташування СЗЕ, то вісно ВЕС СЗЕ може бути розташована як у точці спільного з'єднання (PCC), так і обладнана вітровими генераторами (WTG). Кожна вітрова турбіна має бути обладнана надконденсатором, підключеним до постійного струму конвертера.

Здійснений огляд свідчить про важливість розгляду СЗЕ з метою забезпечення безпечної та надійної генерації електроенергії. Класифікація різних СЗЕ дає змогу виявляти її критичні ознаки, як-от функція, форма, вихід, масштабність та ін.

Розвиток енергетичних інновацій залежить не тільки від їхніх особливостей, але й від їхнього зв'язку з енергетичною інфраструктурою. Отже, важливо враховувати не лише проблеми безпеки та недоліки СЗЕ, але й те, як їх вирішення залежить від різних навколишніх умов (наприклад,

від країни, географічного місця розташування, топографічних особливостей місцевості). Навіть тоді, коли беруться до уваги всі відомі ризики, можуть з'явитися нові. Проектування оптимізації СЗЕ має охоплювати вибір типу СЗЕ, її оптимального розміру та розміщення.

## **4. Математичне описання процесу зарядження акумуляторних батарей з використанням вітроелектричних установок**

### **4.1 Підходи до математичного моделювання роботи вітроелектричних установок**

Складність моделювання виробництва електричної енергії вітроелектричною установкою  $E_{BEY(t)}$  обумовлюється випадковим характером вітрового потоку (який виступає в ролі енергетичного ресурсу), та нелінійним алгоритмом перетворення енергії вітру в електричну, що вносить додаткову невизначеність через особливості роботи вітроелектричних установок в різних кліматичних умовах та різних рельєфних ландшафтах.

Енергія вітрового потоку як випадкова величина має не симетричний розподіл, відповідно виробництво електроенергії вітростанціями (як автономними так і мережевими), також має непостійний характер. Розподіл швидкості вітру найчастіше описують функцією Вейбула [38]. Однак за наявності певної специфіки у поведінці вітру пропонуються також інші види представлення функції щільності розподілу швидкості вітру по градаціях: розподіл Релея (найпростіша форма), експоненційний розподіл за методом максимуму ентропії, комбінування кількох розподілів (в тому числі нормального, поліномів Чебишева тощо).

Потужність ВЕУ обмежена певною величиною, яка дорівнює номінальній (установленій) потужності  $P_n$  незалежно від сили вітру. Графічний приклад типової кривої потужності приведено на рис. 4.1.

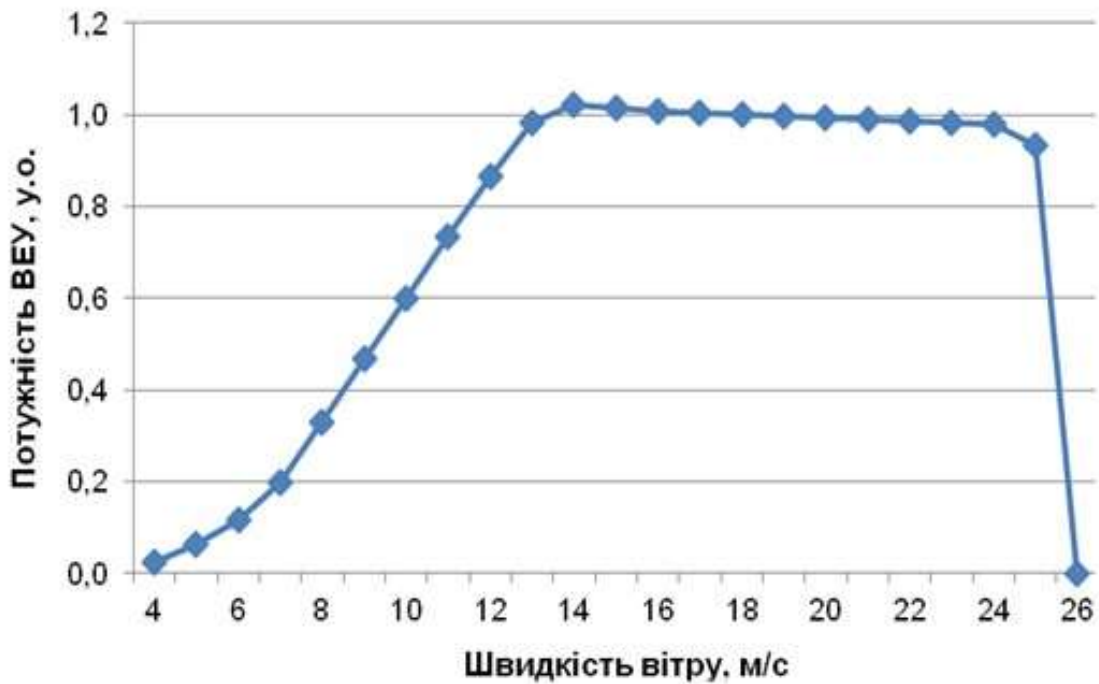


Рис. 4.1. Типова крива потужності ВЕУ.

Згідно [90] потужність при заданій швидкості вітру визначають за виразом:

$$P_{BEU}(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F \cdot \eta(v) \cdot \eta_m \cdot \eta_{ec} \quad (4.1)$$

де:  $P_{BEU}$  – потужність вітроелектричної установки при заданій швидкості вітру, кВт;

$\rho$  – густина вітрового потоку,  $\text{кг/м}^3$ , при атмосферному тиску 760 мм.рт.ст., та температурі 15 °С становить 1,225  $\text{кг/м}^3$ ;

$v$  – поточна величина швидкості вітрового потоку, м/с;

$\eta(v)$  – коефіцієнт використання вітрової потужності;

$F$  – площа обмаху ротора,  $\text{м}^2$ , зазвичай визначається як площа кола, тобто:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (4.2)$$

де:  $d$  – діаметр ротора, м.

Поточна (миттєва) величина потужності ВЕУ має певний змінний

характер. Для більш повної оцінки ефективності роботи зарядної станції на базі ВЕУ більш наочним є графік виробітку електричної енергії протягом певного періоду (декади, місяця, кварталу чи року), що буде накопичена в буферному акумуляторі, а потім надана акумуляторній батареї ЕМ. При високому коефіцієнті надійності роботи кількість ВЕУ в складі однієї зарядної станції практично не впливає на характер (динаміку) виробітку електричної енергії, що підтверджується реальними даними роботи Краснодонської ВЕС, до складу якої входить 10 ВЕУ типу FL 2500 (рис. 4.2) [91].

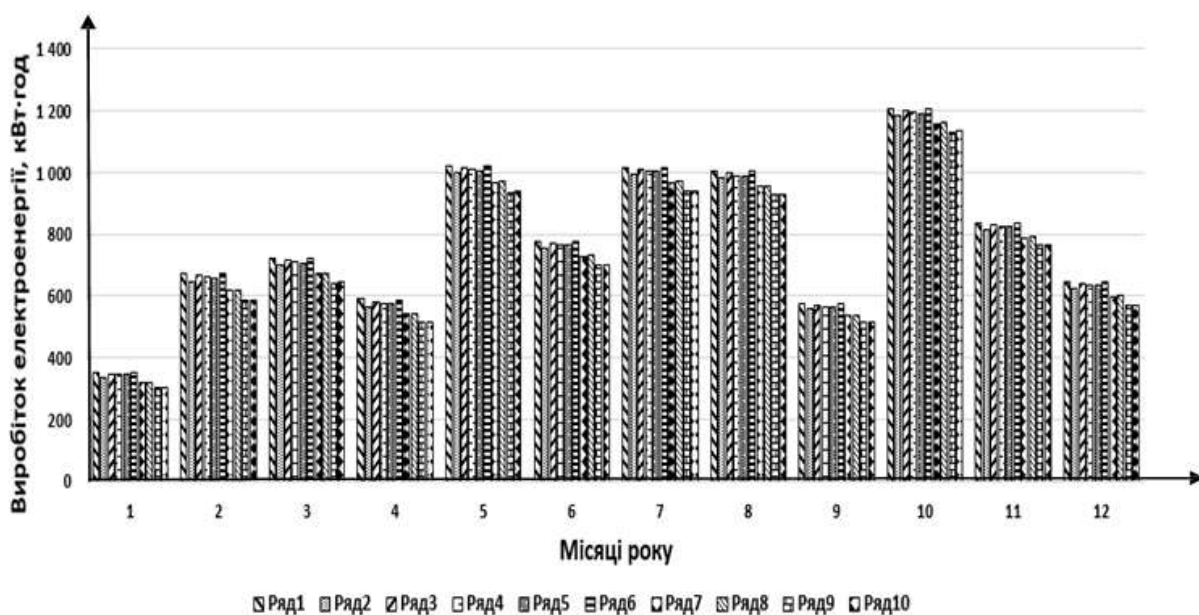


Рис. 4.2. Діаграма виробітку електричної енергії десяти ВЕУ що входять до складу Краснодонської ВЕС протягом року [3]:

Ряд 1 – ВЕУ 1 (FL-801); Ряд 2 – ВЕУ 2 (FL-802);

Ряд 3 – ВЕУ 3 (FL-803); Ряд 4 – ВЕУ 4 (FL-804);

Ряд 5 – ВЕУ 5 (FL-805); Ряд 6 – ВЕУ 6 (FL-806);

Ряд 7 – ВЕУ 7 (FL-807); Ряд 8 – ВЕУ 8 (FL-808);

Ряд 9 – ВЕУ 9 (FL-809); Ряд 10 – ВЕУ 10 (FL-810).

В роботі [32] модель вітроустановки задається кривою потужності  $P(v)$ , при цьому швидкість вітру  $v$  (м/с) перераховується на висоту осі ротора. В загальному випадку описання потужності здійснюється залежністю наступного вигляду:

$$P_n(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_0, v \geq v_{\max} \\ f(v), & v_0 < v < v_p \\ P_m, & v_p \leq v < v_{\max} \end{cases} \quad (4.3)$$

Як приклад, в роботі [93] запропоновано логістичну модель характеристики потужності, що має наступний вигляд:

$$P(v) = \frac{a}{1 + be^{-cv}}, \quad (4.4)$$

де:  $a, b, c$  — параметри моделі, що визначаються за методом найменших квадратів. Для оцінювання параметрів даної моделі на базі паспортних даних ВЕУ в роботі розроблено спеціальний ітераційний метод, що є комбінацією методу найменших квадратів, методу спуску по групах змінних і методу лінеаризації. Метод полягає у наступному. Значення параметра  $a$  є асимптотою функції, тому в якості його початкового наближення приймається максимальна потужність ВЕУ. Для відомого значення  $a$ ,  $a_0$  параметри  $b$  і  $c$  можна оцінити, комбінуючи метод найменших квадратів з методом лінеаризації. Використовуючи отримані оцінки  $b$  і  $c$ , параметр  $a$  уточнюється за формулою лінійного методу найменших квадратів.

Згідно роботи [94] електроенергія, що виробляється ВЕУ, визначається як інтеграл Рімана-Стільтєса стосовно інтегральної функції розподілу  $F(v)$ , або звичайного інтеграла Рімана при наявності неперервної диференційної функції розподілу  $\varphi(v)$ :

$$E_{BEV}(T) = T \int_0^{\infty} P(v) dF(v) = T \int_0^{\infty} P(v) \varphi(v) dv, \quad (4.5)$$

де:  $P(v)$  – характеристика залежності потужності вітроустановки від швидкості вітру;

$T$  – часовий проміжок, стосовно якого визначено функцію розподілу.

У роботі [25] для моделювання стохастичного процесу виробітку вітрової електроенергії пропонується логарифмічно-нормальний розподіл:



$$E(t) \sim e^{\omega(t)+U(t)} \quad (4.6)$$

де:  $\omega(t)$  – алгебраїчна функція, що представляє середнє значення логарифму від величини виробленої ВЕС енергії;

$U(t)$  – є стохастичним процесом Орнштейна-Уленбека.

Таке представлення дозволяє описувати випадковий процес в термінах розподілу Гауса (нормального розподілу).

Отже, є можливість переходу до оцінки режиму виробітку будь-якої реальної вітроелектричної установки (ВЕУ) за наступною нелінійною функцією, яка на відміну від (3) розділяє робочу зону кривої потужності на дономінальний режим та виробіток при режимній швидкості вітру [26]. Такий підхід дозволяє враховувати технічні можливості сучасних зарядних пристроїв з однієї сторони та особливості роботи електрохімічних акумуляторних батарей як буферних так і тягових, що встановлені в електромобілях з іншої.

$$E(v) = \begin{cases} 0 & \text{при } v < v_0, \\ E_{MN}, & \text{при } v_0 < v \leq v_n, \\ E_n, & \text{при } v_n \leq v < v_{кр}, \\ 0 & \text{при } v > v_{кр}, \end{cases} \quad (4.7)$$

де:  $v_0$  – початкова швидкість вітру роботи ВЕУ, м/с;

$v_n$  – номінальна швидкість вітру м/с;

$v_{кр}$  – критична швидкість вітру, при якій припиняється робота ВЕУ м/с;

$E_{MN}$  – енергія, що може бути вироблена при швидкості вітру менше номінальної, кВт· год;

$E_n$  – енергія, що може бути вироблена при режимній швидкості вітру кВт/год.

Дана модель показує необхідність застосування нових методів зарядження акумуляторних батарей різних типів (буферних тягових чи інших) при малій вихідній енергії відновлюваного джерела (ВЕУ), що в свою чергу дозволяє підвищити ефективність використання

низькопотенційної енергії відновлюваного джерела. Для роботи системи ЗСЕМ з використанням ВЕУ як первинного генератора електричної енергії частка малих вітрів не є визначальною в загальній ефективності роботи системи, тому в подальшому для описання даних систем будемо застосовувати модель, що описується рівнянням (4.5).

### **4.3. Підходи до математичного описання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну фотоелектричними установками**

Складність моделювання виробництва електричної енергії фотоелектричною батареєю  $E_{ФЕБ}$  обумовлюється випадковим характером інтенсивності сонячного випромінювання (яке виступає в ролі енергетичного ресурсу), та нелінійним алгоритмом перетворення енергії Сонця в електричну, що вносить додаткову невизначеність через особливості роботи фотоелектричних установок в різних кліматичних умовах та різних рельєфних ландшафтах.

Зважаючи на це актуальною науковою задачею є розроблення математичного опису системи зарядної станції електромобілів ЗСЕМ з використанням фотоелектричних установок (ФЕУ) та буферних акумуляторів енергії для вирівнювання виробітку та споживання електричної енергії.

Для вирішення даної задачі необхідно провести аналіз існуючих підходів до моделювання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію шляхом застосування фотоелектричних установок. При цьому необхідно враховувати специфіку роботи акумуляторних батарей. На основі проведеного аналізу необхідно запропонувати модель роботи зарядної станції електромобілів (ЗСЕМ) на основі ФЕБ.

Інтенсивність сонячного випромінювання, що визначає енергію, яка потрапляє на одиницю площі поверхні за одиницю часу, так само як і

енергія вітрового потоку, є випадковою величиною, відповідно виробництво електроенергії фотоелектростанціями має змінний характер.

Описання надходження сонячного випромінювання проводять бета, гама, експоненційним, геометричним та логнормальним розподілами.

Потужність ФЕБ обмежена певною величиною, яка дорівнює номінальній (установленій) потужності  $P_{ФЕБ}$  незалежно від величини інтенсивності сонячного випромінювання.

Графічний приклад типової кривої потужності приведено на рис. 4.3. З однієї сторони, аналіз сімейства вольт-амперних характеристик показує прямо пропорційну залежність струму ФЕБ від інтенсивності сонячної радіації ( $G$ , Вт/м<sup>2</sup>). З іншої сторони, приведені ВАХ показують нелінійність залежностей  $I_{ФЕБ} = f(U)$ , які змінюються залежно від інтенсивності випромінювання і температури. Це в кінцевому результаті визначатиме і нелінійну залежність  $P_{ФЕБ} = f(U)$ , оскільки потужність ФЕБ  $P_{ФЕБ}$ , як джерела електричної енергії, в найпростішому випадку виглядає як добуток:

$$P_{ФЕБ} = U_{ФЕБ} * I_{ФЕБ}$$

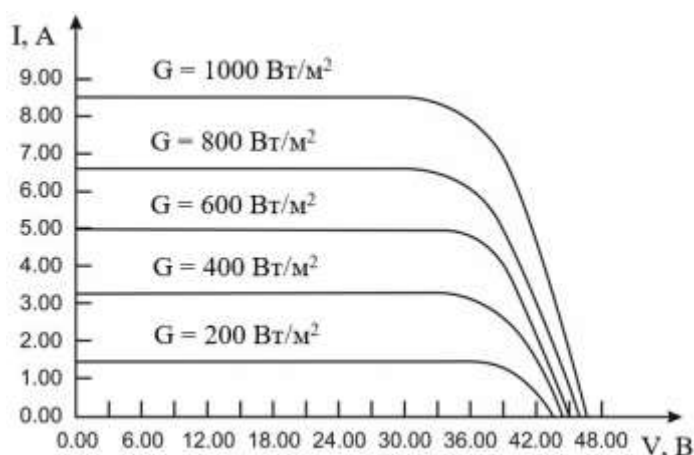


Рис. 4.3. Сімейство типових вольт-амперних характеристик фотомодуля в залежності від інтенсивності сонячного випромінювання.

Згідно [18] модель потужності фотобатарей виражається наступним рівнянням:

$$P_{ФЕБ} = \eta_{ФЕБ} \cdot F_{ФЕБ} \cdot G_t = \eta_r \cdot \eta_{pc} \cdot \left(1 - \beta(T_c - T_{ref})\right) \cdot A_{ФЕБ} \cdot G_t, \quad (4.8.)$$

де:  $F_{\text{ФЕБ}}$  – площа фотобатареї, м<sup>2</sup>;

$G$  – відносна інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;

$\eta_{\text{ФЕБ}} = \eta_r \cdot \eta_{\text{psc}} \cdot [1 - \beta(T_c - T_{\text{ref}})]$  – коефіцієнт ефективності;

$\eta_r$  – паспортна ефективність фотомодуля;

$\eta_{\text{psc}}$  – ефективність використання потужності, рівна 1 при досягненні точки максимальної потужності МРРТ (Maximum Perfect Power Tracker);

$\beta$  – температурний коефіцієнт ефективності, вважається постійним для конкретного виду напівпровідника (наприклад для кремнієвих фотоелементів  $0,004 \div 0,006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$T_{\text{ref}}$  – паспортна температура фотоелементів,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_c$  – поточна температура фотоелементів,  $^\circ\text{C}$ , яка розраховується

наступним чином:

$$T_c = T_a + \left[ \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) \right] \cdot G_t \quad (4.9)$$

де:  $T_a$  – температура навколишнього середовища,  $^\circ\text{C}$ ;

$NOCT$  – номінальна температура роботи фотоелементів,  $^\circ\text{C}$ .

Оскільки параметри  $\eta_{\text{psc}}$ ,  $\beta$ ,  $NOCT$  та  $F_{\text{ФЕБ}}$  залежать від типу фотомодуля та задаються виробником, то незалежними випадковими величинами виступають температура та інтенсивність сонячного випромінювання. Аналіз рівняння (4.1) показує лінійний характер залежності вихідної потужності від інтенсивності сонячного випромінювання.

Згідно роботи [22], визначення вихідної потужності фотоелектричної батареї проводиться наступним чином:

$$P_{\text{ФЕБ}}(t) = P_{\text{ФЕБном}} \cdot k_{\text{зе}} \cdot \frac{\overline{I_{\beta}(t)}}{I_{\text{cy}}} \left[ 1 + \alpha_p (v_{\text{ФЕБ}}(t) - v_{\text{cy}}) \right] \quad (4.10)$$

де:  $P_{\text{ФЕБ}}(t)$  – вихідна потужність ФЕБ, кВт;

$P_{\text{ФЕБном}}$  – номінальна потужність ФЕБ при стандартних умовах, кВт;

$k_{\text{зе}}$  – коефіцієнт зниження ефективності ФЕБ;

$I_{\beta}(t)$  середнє значення густини потоку сонячного випромінювання, яке

потрапляє на поверхню ФЕБ за годинний інтервал, Вт/м<sup>2</sup>;

$I_{cy}$  – густина потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ при стандартних умовах, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha_p$  – температурний коефіцієнт потужності ФЕБ, °С<sup>-1</sup> (як правило величина  $\alpha_p$  від’ємна, що означає зменшення ефективності ФЕБ з підвищенням температури);

$\square_{ФЕБ}(t)$  – поточна температура ФЕБ, °С;

$\square_{cy}$  – температура ФЕБ при стандартних умовах, °С.

Під стандартними умовами мається на увазі: густина сонячного випромінювання рівна 1000 Вт/м<sup>2</sup>, температура поверхні ФЕБ рівна  $\square_{ФЕБ} = 25$  °С.

До переваг використання моделей (4.8) та (4.10) відносять врахування впливу температури навколишнього середовища, впливу температури фотомодуля, можливість підвищення точності імітаційного моделювання енергоустановок на основі ФЕБ та врахування впливу струму навантаження, хоча, яким чином здійснюється врахування останнього не зрозуміло.

Аналіз літературних джерел [23-24], де вивчалось питання моделювання роботи ФЕБ показав, що найбільш поширеною та простою в реалізації вважається однодіодна схема заміщення фотоелементів (рис. 4.4). Еквівалентна схема моделі фотоелемента складається з джерела фотоструму ( $I_{\phi C}$ ), діода ( $D$ ), резистора ( $R_{ш}$ ), встановленого паралельно до джерела струму і резистора ( $R_{пю}$ ), що описує внутрішній опір комірки, а залежність  $I_{ФЕБ} = f(U)$  описується наступним рівнянням:

$$I_{ФЕБ} = I_{\phi C} - I_D \left( \exp \left[ \frac{q(U + IR_{пю})}{k \cdot T \cdot A} \right] - 1 \right) - \frac{(U + IR_{пю})}{R_{ш}} \quad (4.11)$$

де:  $I_{\phi C}$  – фотострум, А;

$$I_{\phi C} = G \cdot (I_{КЗ} + K_I (T - T_{СТ})) \quad (4.12)$$

$I_{KЗ}$  – струм короткого замикання фотоелемента, А;  
 $K_I$  – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;  
 $T_{СТ}$  – стандартна (еталонна) температура фотоелемента, К;  
 $I_D$  - зворотній струм насичення діоду, А;  
 $R_{Ш}$  - шунтуючий опір, Ом;  
 $R_{ПО}$  – послідовний опір, Ом;  
 $q$  – заряд електрона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  
 $k$  – стала Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  
 $T$  – робоча температура фотоелемента, К;  
 $A$  – фактор ідеальності фотоелемента, що залежить від технології виготовлення;  
 $U$  – напруга на виході фотоелемента, В.

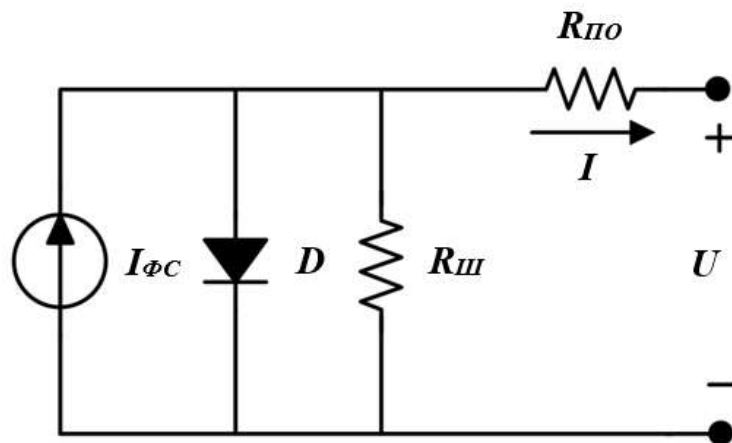


Рис. 4.4. Еквівалентна схема одніодиодної моделі фотоелемента

На практиці більшого застосування отримала спрощена модель ідеального фотоелемента (в якій послідовний опір  $R_{ПО} = 0$ , а шунтуючий опір  $R_{Ш} = \infty$ ). Зважаючи на прийняті умови, математичний опис вихідної потужності фотобатарей можна представити наступним чином:

$$P_{ФЕБ} = U_{ФЕБ} \cdot \left( G[I_{KЗ} + K_I(T - T_{СТ})] - I_D \left( \exp \frac{qU_{ФЕБ}}{k \cdot T \cdot A} \right) - 1 \right) \quad (4.13)$$

де:  $U_{ФЕБ}$  – напруга фотобатарей, В.

Представлене рівняння (4.13) дозволяє враховувати вплив

температури навколишнього середовища ( $T$ ) та інтенсивності сонячного випромінювання ( $G$ ) на вихідну потужність фотоелемента, однак дану модель необхідно також прив'язати до навантаження з метою оцінки його впливу на роботу системи  $Z_{\text{СЕМ}}$  в цілому, а це в свою чергу дасть можливість оцінити ефективність використання виробленої енергії та дати оцінку якості забезпечення.

Ефективність використання ФЕУ в автономних енерговузлах визначається кліматометеорологічними умовами місцевості. При виборі ФЕУ для автономного енергозабезпечення проводиться попередня енергетична оцінка потенціалу сонячної енергії, за якою визначають придатність конкретної території до використання фотоелектричних установок.

Виробіток електроенергії, яку можна отримати за рахунок фотоелектричного перетворення ( $W_{\text{ФЕУ}}$ , кВт/год) з урахуванням (4.13), можна визначити як:

$$\begin{aligned} W_{\text{ФЕУ}}(G, T) &= \tau_{\text{ФЕУ}} \cdot P_{\text{ФЕУ}}(G, T) = \tau_{\text{ФЕУ}} \cdot U_{\text{ФЕУ}} \cdot I_{\text{ФЕУ}}(G, T) = \\ &= \tau_{\text{ФЕУ}} \cdot U_{\text{ФЕУ}} \cdot \left( G(I_{\text{КЗ}} + K_I(T - T_{\text{СТ}})) - I_D \cdot \left( e^{\frac{qU_{\text{ФЕУ}}}{AkT}} - 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

де:  $\tau_{\text{ФЕУ}}$  – час роботи фотоелектричної установки, год.

Рівняння (4.14) можна вважати математичним описом виробітку електроенергії фотоелектричної батареї (або елемента) при конкретних умовах інтенсивності сонячного випромінювання ( $G$ ), температурі фотоелемента ( $T$ ), та часу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію ( $\tau_{\text{ФЕУ}}$ ).

## 5. Робота фотоелектричних установок в електричних мережах підприємства

На підприємстві прийнято проектне рішення застосовувати сонячні панелі потужністю 365 Вт які між собою приєднані послівно-паралельно з розмірами 1.6x0.992x35м, які планується розмістити на даху підприємства довжиною 90 м, шириною 20м. Для нашого регіону переважає середня хмарність тому вибираєм коефіцієнт хмарності-1.

Дах підприємства ТОВ Сармат поділений на 2 частини тому розташування сонячних панелей теж поділений на 2 однакові частини (умов.1 та 2)з'єднання 2 частин відбувається в збірному ящику №1 сумарний від 1 та 2 частини.

Схема електричних з'єднань фото-електричних панелей кожних частин однакові. Тому розглядаємо з'єднання 1 частини.

Одна секція на фазу А містить 18 панелей. Потужність однієї сонячної панелі:  $P = 365$  Вт.

Потужність на 1 секцію фази А:

$$P_{cA} = 0,365 * 18 = 6,57 \text{ кВт.}$$

Кількість секцій панелей фази А на 1 ряд – 7. Кількість рядів секцій панелей фази А – 3. Кількість секцій панелей фази А всього: 24. Загальна потужність усіх секцій панелей фази А:

$$P_{cA} = 24 * 6,57 = 157,68 \text{ кВт.}$$

Орієнтація батарей на південь, кут  $25^{\circ}$ . Що стосується схеми станції і її елементів, то кількість кабелів до інвертора (до РП) – 7. Параметри кабелю: 2x4 (Ідоп = 38 А). Навантаження кожного кабелю:  $18 * 0,365 = 6,57$  кВт. Після збірного ящика – 1 кабель 2 провідний ВВГ 2x70. І доп = 200 А. Захисний апарат: ЕТІВБРЕАК ЕВ2, 250 А. Кількість збірних ящиків на фазу – 1.

Для подачі змінного струму споживачу використовуємо інвертор PROTECT PV 250.

На рисунку 1.3 наведено фото сонячної панелі, яку проаонується



використовувати на підприємстві.



Рисунок 5.1 – Сонячна панель

Таблиця 5.1 – Характеристика сонячної панелі

Характеристики Risen	
Тип панелі	монокристал
Макс.потужність, Вт	365
ККД %	18.9
Розміри, мм	1.6*0.992
Вага,кг	19
Країна виробник	Китай

На рисунку 5.2 наведено план розташування панелей на даху.

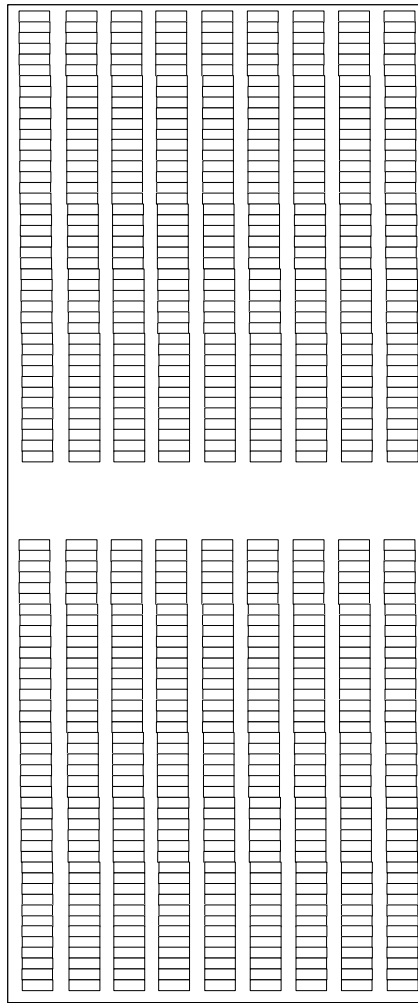


Рисунок 5.2. – План розташування сонячних панелей

Шість панелей з'єднано послідовно а інші дванадцять паралельно з послідовними в сумі виходить ланка з вісімнадцяти панелей які з'єднанні між собою: напруга  $U=234V$ , струм  $I=27.75 A$ . Потужність за 1 год  $6493.5 \text{ кВт}$ . Всього ланок 7 на фазі А, також і на фазі В та С.

### 5.2. Визначення необхідної місткості акумуляторної батареї і їх кількості

Орієнтуючись на режим експлуатації ФЕС визначити максимальне число послідовних «днів без сонця»  $N_{BC}$  з табл. 5.2. (тобто коли сонячної енергії недостатньо для заряду акумуляторної батареї і відповідно для роботи навантаження через негоду або хмарність). При цілорічній

експлуатації фотоелектричної системи з дублером, у тому числі при роботі із загальною енергомережею, для зменшення витрат можна обрати мінімально можливу кількість днів без сонця - 1. Це обумовлюється заряджанням від резервного джерела у будь-який час. Також можливо прийняти за цей параметр вибрану кількість днів, впродовж яких акумуляторні батареї живитиме навантаження самостійно без заряджання.

Таблиця 5.2. Кількість днів без сонця, обумовлена погодними умовами.

Широта місцевості	Період		
	Літні місяці	Осінні і весняні місяці	Зимові місяці
30	2-4	3-4	4-6
40	2-4	4-6	6-10
50	2-4	6-8	10-15
60	3-5	8-12	15-25
70	3-5	12-14	20-35

Якщо система застосовується для заміського будинку, що відвідується тільки у вихідні дні, потрібна велика місткість батарей, тому що вони можуть заряджатися впродовж усього тижня, а віддавати енергію тільки у вихідні дні.

Сумарна місткість акумуляторів, що враховує кількість днів без сонця  $N_{bc}$  :

$$Q_N = Q_{доб} \cdot N_{bc}$$

Задати величину глибини допустимого розряду акумуляторної батареї. При цьому необхідно врахувати, що чим більше глибина розряду, тим швидше батареї вийдуть з ладу. Рекомендується значення глибини розряду 20% - 50%, відповідно коефіцієнт використання  $\gamma$  складе від 0,2 до 0,5. Ні за яких обставин розряд батареї не повинен перевищувати 80%.

Заряд акумуляторної батареї з урахуванням глибини розряду:

$$q_{\gamma} = \frac{q_N}{\gamma}.$$

Вибираємо температурний коефіцієнт  $\alpha$  з табл. 5.3., який враховує зменшення місткості акумуляторної батареї при зниженні температури в приміщенні, де вона встановлена. Звичайно це середня температура в зимовий час.

Таблиця 5.3. Температурний коефіцієнт для акумуляторної батареї.

Температура в градусах		Коефіцієнт
$^{\circ}\text{C}$	F	
26,7	80	1,00
21,2	70	1,04
15,6	60	1,11
10,0	50	1,19
4,4	40	1,30
-1,1	30	1,40
-6,7	20	1,59

Загальна необхідна місткість акумуляторних батарей :

$$Q_{\text{АКБ}} = q_{\gamma} \cdot \alpha.$$

Вибираємо тип акумуляторної батареї для ФЕС (краще свинцево-кислотні акумулятори). Виписати для нього номінальну місткість  $q_{\text{НОМ}}$  номінальну напругу  $U_{\text{НОМ}}$ .

Кількість батарей з'єднаних паралельно (рис.5.3.), визначають із залежності:

$$N_{\text{ПАР}}^{\text{АКБ}} = \frac{Q_{\text{АКБ}}}{q_{\text{НОМ}}}.$$

Отримане значення округлюють до більшого цілого.

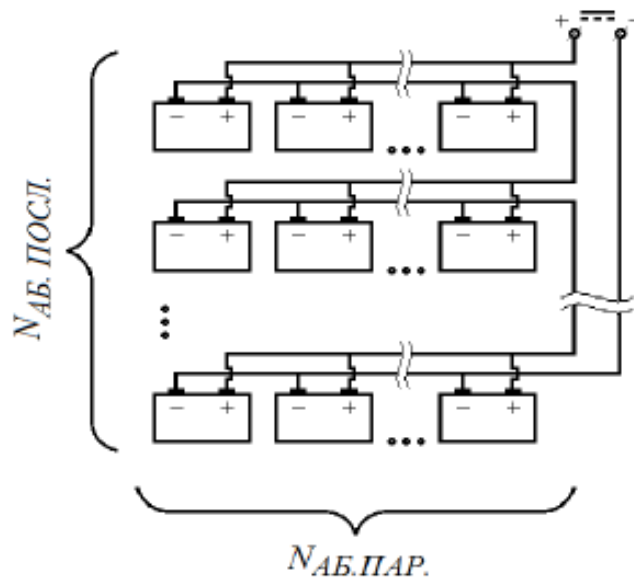


Рисунок 5.3. Схема з'єднання акумуляторних батарей

Кількість послідовно сполучених батарей визначають із залежності та округлюють до більшого цілого:

$$N_{\text{ПОС}}^{\text{АКБ}} = \frac{U_{\text{ІНВ}}}{U_{\text{НОМ}}}$$

Загальна кількість акумуляторних батарей складе:

$$N^{\text{АКБ}} = N_{\text{ПАР}}^{\text{АКБ}} \cdot N_{\text{ПОСЛ}}^{\text{АКБ}}$$

## 5.2. Дослідження впливу генерування фотоелектричної станції на режими роботи розподільних електричних мереж

Встановлення джерела живлення на основі відновлювальної енергії в РЕМ неподалік від навантаження може змінювати напрямки перетоків потужності. Відповідно виникають проблеми, що пов'язані з появою реверсивних потоків. Однією з таких проблем є збільшення втрат активної потужності в електричних мережах.

Результати дослідження Аналіз втрат потужності в електричних мережах з ВДЕ, здійснювався з урахуванням місця приєднання та відношення значення потужності генерування до потужності навантаження вузлів:

1. У випадку коли встановлена у вузлі схеми потужність ВДЕ менша за навантаження, то таке під'єднання забезпечить зменшення втрат у мережі.

2. В електричній мережі існує хоча б один вузол, де вихідна потужність ВДЕ більша ніж власне навантаження цього вузла, але сумарна потужність відновлювальних джерел енергії, що встановлені в мережі, менша ніж її сумарне навантаження.

3. В електричній мережі існує щонайменше один вузол, де вихідна потужність ВДЕ більша, ніж власне навантаження цього вузла, але сумарна потужність ВДЕ даної мережі в цілому більше ніж її сумарне навантаження.

Раніше вказані випадки розглядалися, коли ставилась задача оптимізації конкретного режиму. Тоді можна було б визначити потужність генерування ВДЕ, оптимальну за критерієм мінімуму втрат активної потужності, як це запропоновано в :

$$P_{ВДЕ} = \frac{|U_i| \cdot |U_i|}{R_{i,j}} \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^n \left( (P_j \cos(\delta_i - \delta_j) + jQ_j \sin(\delta_i - \delta_j)) \cdot \frac{R_{i,j}}{|U_i| \cdot |U_j|} \right), \quad (5.1.)$$

де  $U_i$  – модуль напруги у вузлі,  $n$  – кількість вузлів в схемі,  $R_{i,j}$  –  $i$  та  $j$  елемент матриці вузлових опорів схеми,  $\delta$  – кут зсуву фази в  $i$ -тому вузлі,  $P_j$ ,  $Q_j$  – активна та реактивна потужність навантаження в  $j$ -тому вузлі відповідно. Проте добовий графік електричних навантажень нерівномірний, і потужність генерування ВДЕ залежить від погодних умов, тривалості світлового дня, тому також змінюється протягом доби. Щоб врахувати вказані зміни, доцільно перейти до оцінювання втрат електроенергії. На рис. 1 та 2, як приклад, наведено залежності втрат активної потужності для тестової 14-ти вузлової схеми IEEE, від потужності генерування ВДЕ, встановлених в різних вузлах

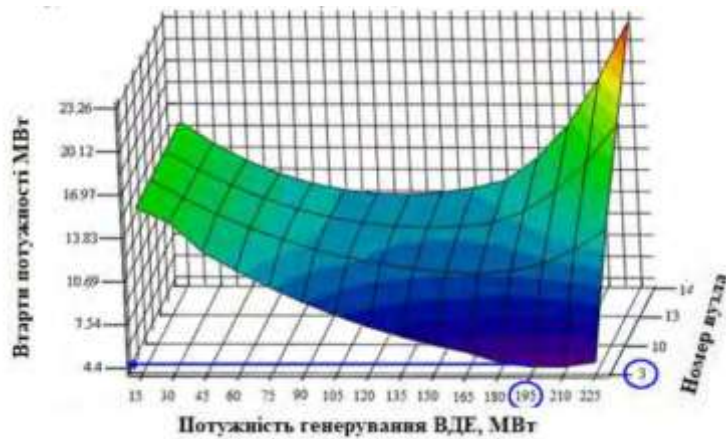


Рисунок 5.4. – Залежність зміни втрат активної потужності в ЕМ з врахуванням нестабільності генерування ВДЕ

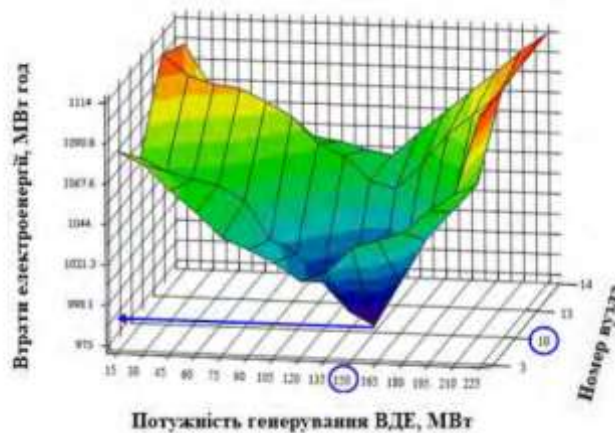


Рисунок 5.5. – Графічна залежність зміни втрат електроенергії в ЕМ з врахуванням змін добового графіка електричних навантажень

Проаналізувавши залежності (рис. 5.4.) та (рис. 5.5.), можна зробити висновок, що вузол під'єднання та встановлена потужність ВДЕ, яка забезпечує мінімум втрат активної потужності для поточного режиму, може змінюватись внаслідок врахування природної нестабільності генерування джерела та змін добового графіка електричних навантажень (рис. 5.5.). Виходячи з цього, для визначення потужності ВДЕ, оптимальної за критерієм мінімуму втрат електроенергії, потрібно проаналізувати зміну потужності ВДЕ протягом доби та оцінювати нерівномірність добового графіка навантаження.

### **5.3. Прогнозування генерування фотоелектричних станцій на добу наперед**

Відповідно до положень закону [14], для виробників, які виробляють електричну енергію на об'єктах електроенергетики, що використовують енергію вітру і сонячного випромінювання, для яких встановлено «зелений тариф», плата за небаланс (різниця між прогнозованим і фактичним погодинним генеруванням) встановлюється наступним чином: до 31 грудня 2020 року - 0 %; з 1 січня 2021 року - 10 %; з 1 січня 2022 року - 20 %; з 1 січня 2023 року - 30 %; з 1 січня 2024 року - 40 %; з 1 січня 2025 року - 50 %; з 1 січня 2026 року - 60 %; з 1 січня 2027 року - 70 %; з 1 січня 2028 року - 80 %; з 1 січня 2029 року - 90 %; з 1 січня 2030 року - 100 %.

Метою підпункту роботи є розроблення методів та засобів прогнозування графіків генерування фотоелектричних станцій, для забезпечення балансу генерування та споживання електроенергії в електричних мережах. Результати дослідження Оскільки для генерування ФЕС залежить від зміни метеопараметрів, було визначено які з них в найбільшій мірі впливають виробіток електроенергії ФЕС.

Запропоновані метеорологічні параметри [22] використовуються, як вхідні дані для нейронної мережі.

Оскільки нейронні мережі повинні адаптуватися до геолокації і мати можливість повторно навчатися для інших станцій, використовуємо алгоритм зворотного поширення помилки. Основна ідея цього методу полягає в поширенні сигналів помилок з мережевих виходів на його входи, у зворотному напрямку до прямого поширення сигналів в нормальному режимі роботи. Щоб мати можливість застосувати метод зворотного поширення помилки, передатна функція нейронів повинна бути диференційованою. Даний метод є модифікацією класичного методу градієнтного спуску. Нейронна мережа матиме наступний вигляд див. рис.1.



Отже, маємо вектор вхідних величин  $X$  упр Емпіричним шляхом встановлено, що оптимальна кількість нейронів для точного прогнозу – 25,  $i = 1..25$ , що мають гіпертангенсову функцію їх активації:

$$f(e) = th \frac{s}{\alpha} = \frac{e^{\frac{s}{\alpha}} - e^{-\frac{s}{\alpha}}}{e^{\frac{s}{\alpha}} + e^{-\frac{s}{\alpha}}}, \quad (5.2.)$$

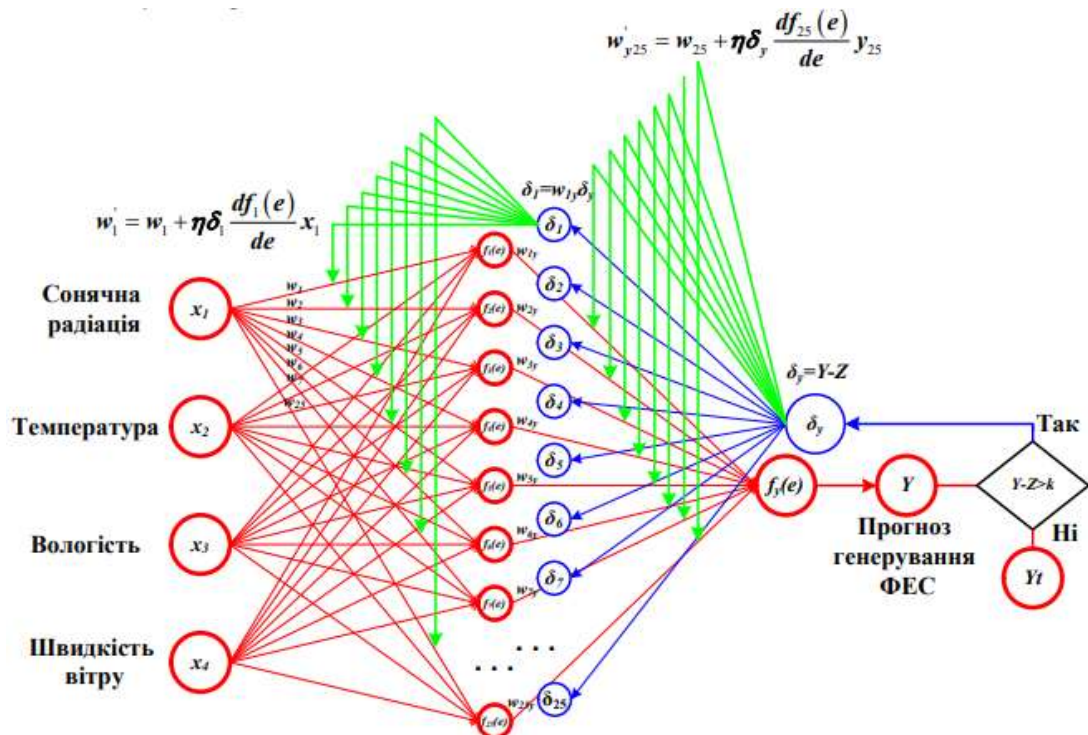


Рисунок 5.6. – Нейронна мережа для прогнозування генерування ФЕС на наступну добу Таким чином, результат активації першого нейрона буде мати значення  $y_1$ , що дорівнює:

$$y_1 = f_1 \left( w_{(x_1)} \cdot x_1 + w_{(x_2)} \cdot x_2 + w_{(x_3)} \cdot x_3 + w_{(x_4)} \cdot x_4 \right) \quad (5.3.)$$

Аналогічно, вона може бути записана для інших нейронів. А для з'єднання прихованого шару з початковим значенням (передбачена генеруюча потужність)  $Y$ . Використовуємо відповідні вагові коефіцієнти для прикладу першого отриманого нейрона і початкове значення розвитку нейрона:

$$y = f_y \left( y_1 \cdot w_{1y} + y_2 \cdot w_{2y} + y_3 \cdot w_{3y} + \dots + y_{25} \cdot w_{25y} \right) \quad (5.6.)$$

Оскільки за першу ітерацію практично неможливо досягнути бажану точність, використовується алгоритм зворотнього поширення похибки. В основу якого покладено метод корекції вагових коефіцієнтів нейронів. Обчислюється похибка і на її основі робимо зворотній хід, який полягає в послідовній зміні ваги нейронів мережі, починаючи з ваг вихідних нейронів. Значення ваг будуть змінюватися в напрямку, який дасть нам найкращий результат. У розрахунку ми використовуємо метод знаходження дельта  $\delta_y = Y - Z$ ,  $Z$  - бажане значення, оскільки це найпростіший і найбільш зрозумілий спосіб. Також використовується стохастичний метод оновлення вагових коефіцієнтів. Вирішуючи зворотній хід, визначимо вагу для першого прихованого нейрона:

$$w'_{1y} = w_{1y} + \eta \delta_y \frac{df_y(e)}{de} y_1 \quad (5.7.)$$

де  $\delta_y = Y - Z$  - зміщення виходу,  $\eta$  - константа. Аналогічним чином визначається зміщення ваги нейронів, які з'єднують вхідні параметри з прихованим шаром:

$$w'_1 = w_1 + \eta \delta_1 \frac{df_1(e)}{de} x_1 \quad (5.8.)$$

де  $\delta_1 = w_{1y} - y$  - зміщення виходу,  $\eta$  - константа. Для кожної ітерації алгоритму зворотнього поширення похибки зважені коефіцієнти нейронної мережі змінюються для зменшення помилки моделі. Таким чином на кожній ітерації вирішується одна критеріальна задача [33]. Висновки На основі визначених метеопараметрів, запропоновано метод погодинного прогнозу генерування фотоелектричних станцій на добу наперед. Такий метод, забезпечує точність погодинного прогнозу генерування ФЕС на рівні 80%.

## 6. Економічна частина

Найважливішою господарсько-політичною задачею сучасного етапу ринкової економіки, принциповою основою економічного розвитку країни є інтенсифікація та модернізація підприємницьких структур. Одним з джерел модернізації є використання більш дешевих джерел енергії, застосування більш ефективних технологічних процесів і обладнання, форм організації праці і управління відповідно до досягнень НТП.

В даній роботі в якості конкретного об'єкта дослідження обрані сонячні батареї. Витрати, пов'язані з реалізацією більшості інноваційно-інвестиційних проектів, поділяються на капітальні та поточні.

Капіталовкладення для встановлення сонячних батарей визначимо за формулою 6.1:

$$\text{ВКАП СБ} = N \times \text{Ins}_{\text{ст.у.}} \times \text{Ц}_{\text{м}2} \text{Ins}_{\text{ф.}} \times N_{\text{м}2} + \text{В}_{\text{тр}} + \text{В}_{\text{мр}}, \quad (6.1)$$

де:  $N$  - необхідна потужність сонячних батарей, Вт;

$\text{Ins}_{\text{ф}}$  - інсоляція для досліджуваного регіону, Вт / м<sup>2</sup>;

$\text{Ins}_{\text{ст.у.}}$  - інсоляція для стандартних умов, Вт / м<sup>2</sup>;

$N_{\text{м}2}$  - потужність сонячних батарей з 1 м<sup>2</sup>, Вт / м<sup>2</sup>;

$\text{Ц}_{\text{м}2}$  - ціна 1 м<sup>2</sup> сонячних батарей, грн.;

$\text{В}_{\text{тр}}$  - витрати на транспортування, грн.;

$\text{В}_{\text{мр}}$  - вартість монтажних робіт, грн.

Можливості сонячних батарей для генерації електрики стали відомі більш, ніж століття назад. Значною мірою вони були реалізовані лише в останні десятиліття. У їх розвитку ключову роль відіграють нові технології, які впливають на збільшення коефіцієнта корисної дії. Функція заснована на дослідженні ККД інноваційних сонячних батарей від року їх впровадження в масове виробництво виведена в наступну функціональну залежність:

$$\text{ККД СБ (Т)} = 107 - 20e^{0,0243 \cdot T} \quad (6.2)$$

Нові технології у виробництві сонячних батарей можуть значно збільшити їх ККД, відповідно, знизити вартість енергетичного ресурсу.

Майбутнє збільшення ККД сонячних батарей можливо за рахунок вдосконалення матеріалів і процесів перетворення енергії, а також підвищення терміну служби модуля.

На сьогоднішній день є промислові зразки сонячних батарей з ККД більше 40% (виробник компанія «Sharp» спільно з співробітниками Токійського університету, компанія «Spectrolab»), також планується підвищення ефективності перетворення енергії сонячного променя до 50% до 2025 р. [42].

Річні поточні витрати, пов'язані з впровадженням сонячних батарей оцінимо за формулою 6.3:

$$V_{\text{пот сб}} = N \times \text{Ins}_{\text{ст.у.}} \times \text{Цм2Ins}_{\text{ф.}} \times N_{\text{м2}} + V_{\text{тр}} + V_{\text{мр}} T_{\text{а}} + V_{\text{обс}} + V_{\text{нс}} \quad (6.3)$$

де:  $T_{\text{а}}$  - амортизаційний період, в роках;

$V_{\text{обс}}$  - витрати на обслуговування (протирання пилу, прибирання снігу, ремонт обладнання і т.д.), грн.;

$V_{\text{нс}}$  - витрати на перепідготовку співробітників, грн.

Відповідно до проведених досліджень приведені витрати для сонячних батарей визначаються за формулою 6.4:

$$V_{\text{прив сб}} = N \times \text{Ins}_{\text{ст.у.}} \times \text{Цм2Ins}_{\text{ф.}} \times N_{\text{м2}} + V_{\text{тр}} + V_{\text{мр}} + r\% 100\% + N \times \text{Ins}_{\text{ст.у.}} \times \text{Цм2Ins}_{\text{ф.}} \times N_{\text{м2}} + V_{\text{тр}} + V_{\text{мр}} T_{\text{а}} + V_{\text{обс}} + V_{\text{нс}} \quad (6.4)$$

Річний економічний ефект від впровадження сонячних батарей визначимо за формулою 6.5:

$$E_{\text{сб}} = V_{\text{прив баз}} - (N \times \text{Ins}_{\text{ст.у.}} \times \text{Цм2Ins}_{\text{ф.}} \times N_{\text{м2}} + V_{\text{тр}} + V_{\text{мр}}) \times r\% 100\% - N \times \text{Ins}_{\text{ст.у.}} \times \text{Цм2Ins}_{\text{ф.}} \times N_{\text{м2}} + V_{\text{тр}} + V_{\text{мр}} T_{\text{а}} - V_{\text{обс}} - V_{\text{нс}} \quad (6.5)$$

де:  $E_{\text{сб}}$  - економічний ефект від використання сонячних батарей в якості джерела енергії, грн.;

$V_{\text{прив баз}}$  - витрати на виробництво одиниці продукції за допомогою базового варіанту енергопостачання, грн.

Розроблена методика дозволяє вирішувати проблему оцінки річного економічного ефекту від реалізації інноваційно-інвестиційних проектів

впровадження сонячних батарей, як в сучасних умовах, так і для майбутніх періодів.

Для здійснення комплексної оцінки економічної ефективності впровадження сонячних батарей поряд з розрахунком річного економічного ефекту необхідно використовувати систему додаткових показників. В процесі виконання роботи були використані наступні показники для оцінки економічної ефективності впровадження сонячних батарей:

1. Чиста поточна вартість впровадження сонячних батарей (NPV) визначається за формулою:

$$\begin{aligned} NPV_{CB} = & -(N \times I_{nsc.t.y.} \times \Pi_{m2} \times Ins_{ф.} \times N_{m2} + B_{тр} + B_{мр}) + \sum V_{пот.ich.i} + \\ & + N \times I_{nsc.t.y.} \times \Pi_{m2} \times Ins_{ф.} \times N_{m2} + B_{тр} + B_{мр} \tau - \\ & - V_{обс\ i} - V_{пс\ i} (1+r)_{mi=1} \end{aligned} \quad (6.6)$$

де:  $V_{пот.ich.i}$  - поточні витрати по існуючому варіанту енергоспоживання, грн.;

$m$  - сумарна кількість періодів при  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ .

2. Внутрішня норма прибутковості інноваційно-інвестиційних проектів впровадження сонячних батарей (IRR) визначається виходячи з наступного рівняння:

$$\begin{aligned} & (N \times I_{nsc.t.y.} \times \Pi_{m2} \times Ins_{ф.} \times N_{m2} + B_{тр} + B_{мр}) + \sum V_{пот.ich.i} + N \times I_{nsc.t.y.} \times \\ & \times \Pi_{m2} \times Ins_{ф.} \times N_{m2} + B_{тр} + B_{мр} \tau - V_{обс\ i} - V_{пс\ i} (1+IRR)_{mi=1} = 0 \end{aligned} \quad (6.7)$$

3. Дисконтований термін окупності інвестицій (DPP) вкладених в інноваційно-інвестиційні проекти впровадження сонячних батарей визначаються виходячи з рівняння:

$$\begin{aligned} & (N \times I_{nsc.t.y.} \times \Pi_{m2} \times Ins_{ф.} \times N_{m2} + B_{тр} + B_{мр}) + \\ & + \sum V_{пот.ich.i} + N \times I_{nsc.t.y.} \times \Pi_{m2} \times Ins_{ф.} \times N_{m2} + B_{тр} + \\ & + B_{мр} \tau - V_{обс\ i} - V_{пс\ i} (1+r)^i \quad DPP_{i=1} = I_0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

За наведеними вище формулами розрахуємо ефективність впровадження сонячної батареї на даху приватного кафе площею 50 м<sup>2</sup> в м. Вінниці (всі розрахунки приблизні).

1. Капіталовкладення для встановлення сонячної батареї визначимо за даними таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Капіталовкладення для встановлення сонячної батареї для приватного кафе в м.Вінниці.

	Значення показника
Необхідна потужність сонячних батарей, Вт;	7 000
Інсоляція для досліджуваного регіону, Вт / м <sup>2</sup> ;	3600
Інсоляція для стандартних умов, Вт / м <sup>2</sup> ;	3200
Потужність сонячних батарей з 1 м <sup>2</sup> , Вт / м <sup>2</sup> ;	140
Ціна 1 м <sup>2</sup> сонячних батарей, грн.;	3 900
Витрати на транспортування, грн.;	Безкоштовно по Україні
Вартість монтажних робіт, грн.	<p>30 000 ВКАП СБ=  <math>7000 \times 3200 \times 3900 + 3600 \times 140 + 0 + 30000 = 203\,333</math> (грн.).</p> <p>1. Далі розраховуємо річні поточні витрати, пов'язані з впровадженням сонячних батарей (амортизаційний період – 10 років): Впот сб = <math>203\,333 \times 10 + 25000 = 45\,333,3</math> (грн./рік).</p> <p>3. Приведені витрати для сонячних батарей становлять: Вприв сб = <math>203\,333 + 14\% \times 100\% + 45\,333,3 = 248\,666,44</math> (грн.)</p> <p>4. Визначаємо річний економічний ефект від впровадження сонячних батарей: Есб = <math>Вприв баз - 203\,333 \times 14\% \times 100\% - 45\,333,3</math> За місяць кафе з кухнею середніх розмірів і з середнім набором устаткування, з вентиляцією витратить на традиційну електроенергію близько 16 000 грн. Отже, <math>Есб = 16\,000 \times 12 - 203\,333 \times 14\% \times 100\% - 45\,333,3 = 192\,000 - 28\,466,62 - 45\,333,3 = 118\,200,08</math> (грн.).</p> <p>5. Розраховуємо абсолютну ефективність впровадження сонячних батарей: <math>Еф = Есб / Вприв сб = 118\,200,08 / 248\,666,44 = 0,475</math></p> <p>Отже, впровадження сонячних батарей в даному випадку економічно доцільне.</p>

## 7. Охорона праці під час монтажу, експлуатації та обслуговування СЕС

Монтаж, експлуатація і технічне обслуговування системи на основі сонячних батарей вимагає відповідного рівня технічних знань. Будь-яка робота з системою повинна виконуватися тільки з дотриманням правил техніки безпеки при електромонтажних і налагоджувальних роботах. Перед установкою і підключенням або обслуговуванням фотоелектричної системи потрібно обов'язково ознайомитися інструкцією по експлуатації сонячних електростанцій та їх компонентів. Недотримання вимог безпеки може призвести до серйозних травм або поломки обладнання.

Важливі вимоги безпеки:

Сонячні батареї повинні використовуватися згідно з їх прямим призначенням. Заборонено вносити технічні зміни в конструкцію батарей. Під час монтажу потрібно дотримуватись усіх правил і норм безпеки. Також дотримуватись вимог безпеки при монтажі та експлуатації інших компонентів системи.

Кілька з'єднаних між собою сонячних батарей можуть генерувати високу напругу. Коли на сонячну батарею падає світло, на виводах з'являється напруга, яка може бути небезпечною і може загрожувати життю. Хоча одна сонячна батарея видає порівняно низьку напругу, зазвичай максимум 25-50В постійного струму, але при об'єднанні в послідовне з'єднання напруга підвищується у стільки разів, скільки додано батарей. При паралельному підключенні збільшується струм.

Вимоги техніки безпеки:

- Контактні роз'єми MC4 (рис. 7.1) захищені від випадкового дотику, все ж необхідні запобіжні заходи, щоб уникнути загоряння, іскріння і ударів струмом;
- Не можна вставляти ніякі електропровідні предмети в роз'єми, крім роз'ємів стандарту MC4;

- Потрібно зняти всі електропровідні прикраси під час механічної та електричної установки;
- Інструменти і робоча зона повинні бути сухими. Портативні сонячні панелі та роз'єми повинні бути сухими;
- Не можна проводити монтаж сонячних панелей в дощову погоду;
- При роботі з дротами потрібно завжди використовувати інструменти з ізоляцією, а також ізолюючі рукавички;
- Не можна розбирати сонячні батареї чи видаляти деталі або етикетки виробника;
- Потрібно використовувати тільки справні сонячні батареї, якщо є ушкодження або деформація сонячної батареї, її не можна підключати;
- Не притуляти до сонячної батареї гострі предмети, не фарбувати її і не приклеювати що-небудь;
- Не піддавати сонячні батареї штучно сфокусованому сонячному випромінюванню;
- Інші компоненти системи також можуть бути джерелом високої напруги. Дотримуватись інструкцій виробників для інших компонентів.



Рисунок 7.1 – Роз'єми стандарту MC4

Сонячні батареї, під дією світла, генерують постійний струм. При розриві такого ланцюга, наприклад, при відключенні дроту постійного струму від контролера заряду, може виникнути небезпечна електрична дуга:

- Неможна відключати сонячні батареї під навантаженням;
- Потрібно використовувати тільки справні дроти відповідного перерізу. Не можна використовувати дроти з пошкодженнями;
- Контакти і роз'єми повинні бути чистими і сухими.



Перевезення і зберігання:

1) Сонячні батареї вимагають дбайливого ставлення, тому потрібно бути обережним під час перевезення та зберігання. Залишати сонячні батареї в заводській упаковці до моменту їх монтажу.

2) Завжди піднімати і переносити сонячні панелі обома руками і ніколи не піднімати їх за розподільну коробку. Не кидати сонячні батареї й не розміщувати їх з нерівномірним навантаженням на раму.

3) Не ставити будь-які предмети на поверхню сонячних батарей. Уникати прогину і деформацій сонячних батарей, не ставити на них.

4) Зберігати сонячні батареї в сухому, провітрюваному приміщенні без різких перепадів температур.

Установка сонячних батарей:

1) Необхідно захистити себе та інших осіб від падінь, не виконувати установку при сильному вітрі. Підготувати робочу зону таким чином, щоб уникнути травм.

2) Не допускати максимально допустимого рівня механічних навантажень, перед установкою переконатися, що дії погодних умов не зможуть пошкодити сонячні батареї. Панелі можуть прогинатися під навантаженням при певних обставин. Для того, щоб уникнути пошкодження панелей через нерівності та деформації не класти між настановним профілем і задньою частиною сонячної батареї кріпильні елементи або дроти.

3) Переконатися в тому, що панелі заземлені. Для того щоб знизити ризик виникнення ураження електричним струмом або пожежі, сонячні батареї повинні бути заземлені згідно з правилами безпеки.

4) Установка систем на даху може вплинути на пожежну безпеку будівлі. Сонячні батареї, встановлені неналежним чином, можуть представляти небезпеку в разі пожежі. Тому панелі на даху повинні встановлюватися над поверхнею, що стійка до займання. Крім того, панелі не можна встановлювати в безпосередній близькості від вогню і горючих матеріалів або газів.

5) Переконайтеся, що після установки панелі не піддаються штучно концентрованому сонячному випромінюванню, не занурені у воду і не омиваються водою під тиском. Якщо панелі піддаються впливу солі або сірки, може виникнути корозія. Переконайтеся, що панелі не піддаються аномальному впливу хімічних речовин. У зв'язку з цим, через можливі викиди шкідливих речовин установка у безпосередній близькості від виробничих потужностей не рекомендується.

6) Дуже важливо, щоб сонячні батареї відповідали технічним параметрам всієї системи. Тому необхідно переконайтеся в тому, що панелі не піддаються якимось негативним механічним або електричним впливам від інших компонентів системи. Підключати послідовно панелі тільки з однаковим номінальним струмом і напругою. Сонячні батареї повинні працювати тільки в допустимих межах сумарної напруги системи, робота при більш високій напрузі не рекомендується.

7) Сонячні батареї не повинні встановлюватися в якості скління даху або фасаду. Крім самих панелей, система кріплення повинна також відповідати місцевим погодним умовам (вітрові та снігові навантаження) і витримувати ці навантаження.

Кут нахилу сонячної батареї:

1) Для отримання максимального вироблення електроенергії рекомендується розрахувати оптимальну орієнтацію і кут нахилу до встановлення сонячних батарей. Ідеальні умови дотримуються, якщо сонячні промені падають на поверхню сонячної батареї під кутом 90 градусів до площини панелі як можна довше. Потрібно підібрати оптимальний кут нахилу для регіону де проводиться установка, з урахуванням пори року, в якому прогнозується або максимальна сонячна активність, або максимальне споживання електроенергії.

2) При послідовному підключенні, щоб уникнути зниження ефективності, всі панелі в з'єднанні повинні розташовуватися на одній площині, під одним кутом.

### Сонячні батареї і тінь:

Навіть невелика тінь негативно позначається на виробленні електрики сонячними батареями. Тому масив сонячних батарей рекомендується розміщувати в місцях, не схильних до затінення. Протягом року, тінь змінює своє положення, це потрібно врахувати при установці. Не бажано закривати сонячні панелі додатковим склом, це знижує ККД панелі приблизно на 30%, навіть при видимій прозорості скла (рис. 7.2).



Рисунок 7.2 – Відбивання сонячних променів від скла

### Вентиляція сонячних батарей:

Не встановлювати нижню сторону сонячних батарей впритул до поверхні, між панеллю і настановною площиною має бути відстань для циркуляції повітря. При належній вентиляції нижньої поверхні сонячних батарей забезпечується розсіювання зайвого тепла, яке негативно позначається на ефективності панелей.

### Кріплення сонячних батарей:

1) В цілях виконання надійного кріплення, сонячні батареї повинні бути закріплені, принаймні, у чотирьох точках. Алюмінієва рама кріплення, що розрахована на кріплення по довгій стороні, не повинна використовуватися для кріплення на коротку сторону (рис. 7.3)

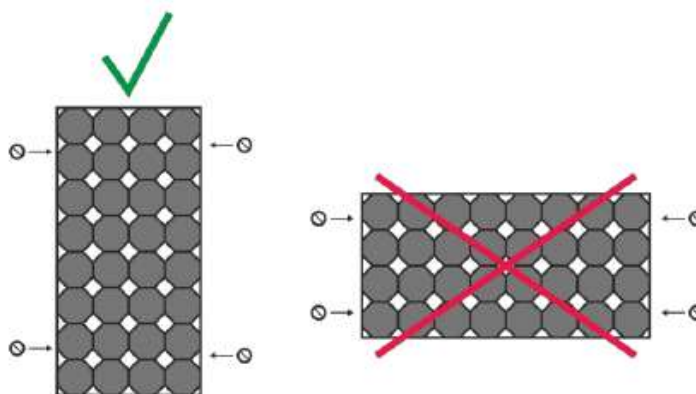


Рисунок 7.3 – Кріплення сонячних батарей.

2) Існує кілька способів кріплення сонячних батарей, основні з них: за допомогою притискних фіксаторів і за допомогою болтового з'єднання через отвори на нижній частині рами.

3) Для кріплення потрібно використовувати тільки спеціально передбачені отвори в рамі панелі та використовувати з'єднання з корозійностійких матеріалів.

Підключення сонячних батарей:

1) З'єднувальні дроти повинні бути стійкі до ультрафіолетового випромінювання. Для герметичного з'єднання на кінцях проводів передбачені роз'єми стандарту MC4.

2) Завжди перед підключенням сонячних батарей в систему потрібно перевіряти правильність електромонтажу. Перевіряється полярність і напруга холостого ходу масиву сонячних батарей, якщо вони відрізняються від паспортного значення, то є неправильне з'єднання.

3) При підключенні сонячних батарей не можна перевищувати технічні вимоги інших пристроїв по максимальній напрузі і допустимому струму. Дотримуватися технічних вимог виробників інвертора і контролера заряду.

4) Без потреби не розбирати розподільну коробку сонячної батареї. Панелі мають всі необхідні дроти і сполучні роз'єми для підключення до системи.

5) Для підключення рекомендується використовувати тільки мідні одножильні дроти з перерізом залежно від величини струму, але не менше

4мм<sup>2</sup>. Ізоляція проводів повинна бути стійка до ультрафіолетового випромінювання. Якщо використовується провід не стійкий до ультрафіолетового випромінювання, то він обов'язково прокладається в гофрі, призначеній для зовнішньої прокладки.

б) По можливості прокладати дроти так, щоб вони не потрапляли під прямі сонячні промені. З'єднання дротів і конекторів здійснюється за допомогою спеціального обтискного інструменту або пайки.

Для того щоб зібрати невелику сонячну електростанцію потрібно:

1. Сонячна батарея;
2. Контролер заряду;
3. Акумулятор (бажано герметичний, якщо він встановлений в приміщенні);
4. Інвертор для перетворення електричної напруги 12В на 220В.
5. Запобіжники для захисту від короткого замикання (бажано).
6. Комплект конекторів MC4 для підключення сонячної батареї до контролера.

На рис. 7.4 представлена схема невеликої сонячної електростанції:

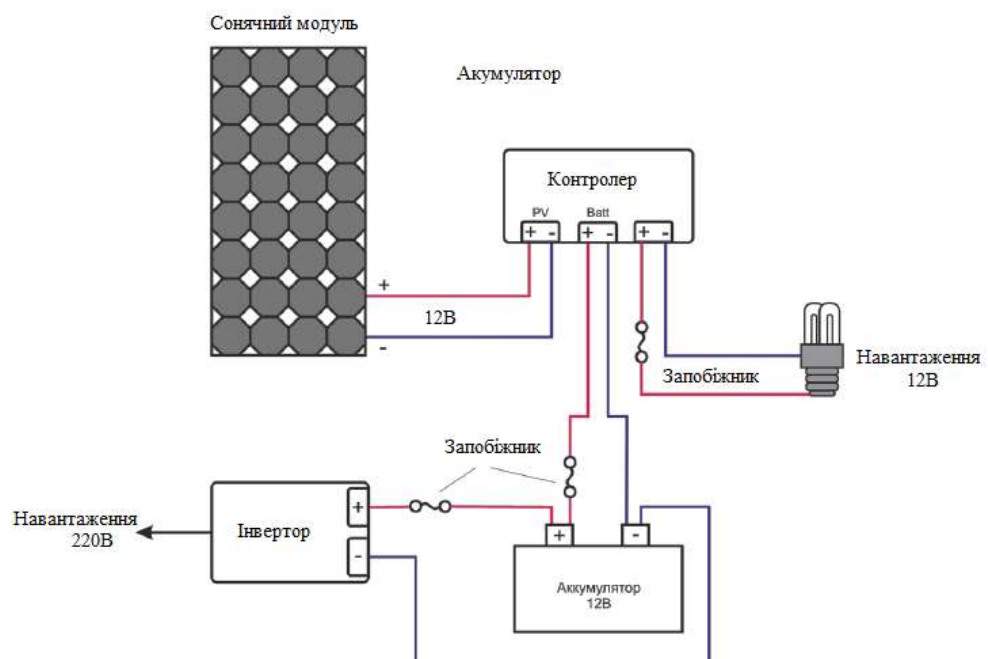


Рисунок 7.4 – Схема невеликої сонячної електростанції.

Послідовність дій:

1. Підключити акумулятор до контролера у відповідні роз'єми, дотримуючись полярності. Для підключення використовувати дроти з перерізом відповідним потужності контролера.

2. Підключити сонячну батарею до контролера у відповідні роз'єми, також дотримуючись полярності. Для безпечного підключення використовувати конектори MC4.

3. До відповідних роз'єми контролера підключити навантаження 12В.

4. Якщо є необхідність перетворювати електричну напругу 12В на 220В змінного струму, підключити до акумулятора інвертор, дотримуючись полярності. Не підключати інвертор безпосередньо до контролера.

5. До виходу інвертора підключити електричні прилади 220В.

Потрібно дотримуватися послідовності підключення елементів сонячної електростанції, щоб уникнути поломки контролера. Заземлити сонячну батарею і встановити запобіжники, на з'єднання між контролером і акумулятором, а також між акумулятором і інвертором щоб уникнути короткого замикання.

Обслуговування та догляд:

Зазвичай сонячні батареї очищаються під час дощу і при скочуванні снігу. При кутах нахилу 70-90 градусів до площини поверхні землі панелі, як правило, не потребують додаткової очистки. У разі значного забруднення панелі потрібно помити звичайною водою без застосування миючих засобів. Найкраще панелі очищаються за допомогою шланга з водою і м'якої губки. Щоб уникнути мікроподряпин, які можуть знизити вироблення електроенергії сонячними батареями, ніколи не можна витирати запилену поверхню панелей сухими предметами.

Регулярно, не рідше 1 рази в рік, система потребує огляду і перевірки:

- Жорсткості кріплень і відсутності корозії;
- Якості та цілісності електричних з'єднань, відсутності корозії в місцях з'єднань;
- Цілісності сонячних батарей;

- Електричних параметрів [41].

Система слідування за Сонцем - це комплекс пристроїв і механізмів, забезпечує за рахунок проходження за ходом Сонця по небосхилу буквально заданий стан прийомних поверхонь фотоелектричних пристроїв відносно Сонця і тим самим підвищення сонячного випромінювання, що надходить на приймальні поверхні. ГОСТ Р 57229-2016 (МЭК 62817: 2014 року).

Реальний еталон встановлює малі запити до систем стеження за Сонцем, що забезпечують повноту інформації про конкретну систему стеження за Сонцем.

Способи випробувань систем стеження за Сонцем в цілому і їх основних компонентів. Частина способів випробувань встановлює методи вимірювання і розрахунку характеристик, які вказуються в паспортних даних конкретної системи стеження за Сонцем, інша частина способів випробувань спеціалізована для визначення відповідності характеристик систем стеження за Сонцем встановленим параметрам.

Друга частина випробувань спеціалізована ще для виявлення конструкцій систем стеження за Сонцем, які будуть володіти високу можливість відмов на відміну від конструкцій, здатних робити свої функції відповідно до технічної документації з високою міцністю.

Підсумки механічних випробувань, наведених в реальному ідеалі, що не поширюються на фундамент і частини будівельних конструкцій, до яких кріпиться випробувана система стеження за Сонцем, так як такий тип відповідності визначається ще будівельними нормами, правилами і рисами місця установки наприклад: землі, ґрунту тощо. Реальний еталон ще може існувати при розробці геліотехнічних пристроїв і геліосистем інших типів.

Системи спостереження за Сонцем, призначені для впровадження в фотоелектричних системах, поділяють на два основні класи: системи спостереження за Сонцем для розміщення плоских фотоелектричних модулів; системи спостереження за Сонцем для розміщення фотоелектричних модулів з концентраторами.

Кожен з цих класів систем стеження за Сонцем може бути далі поділений на категорії за кількістю і напрямку осей, компоновочним рішенням справних пристроїв, типам приводів, кліматичному виконанню, типу вертикального монтажу і фундаменту, типу управління, типу формування сигналу про спрямованість на Сонце і іншому, в тому числі по зазначеним нижче характеристикам.

За чисельністю напрямків осей обертання:

- одновісні, які, в свою чергу, поділяють у напрямку осі:
- з горизонтальною віссю;
- з вертикальною віссю;
- похилі.
- двовісний, які, в свою чергу, поділяють у напрямку

За типом приводу:

- з електроприводом;
- з гідроприводом;
- з пасивним приводом.

За типом приведення в дію:

- з індивідуальним приведенням у дію;
- з груповим приведенням у дію.

За типом управління: ГОСТ Р 57229-2016

- з пасивним управлінням;
- з функціональним управлінням;
- з превентивним управлінням.

За типом вертикального кріплення:

- на вертикальних опорах або стійках;
- карусельні.

За місцем встановлення:

- на землі;
- на воді;
- на будівлі (даху, стіни) або на іншому об'єкті;



- вбудовані в будівлю / об'єкт.

За типом фундаменту:

- на фундаменті глибокого залягання;
- на поверхневому фундаменті.

Системи спостереження за Сонцем для розміщення плоских фотоелектричних модулів зобов'язані гарантувати зменшення кута між курсором на Сонце і нормаллю до приймальної (робочої) поверхні фотоелектричного модуля. За рахунок цього гарантується найбільш повне використання всієї енергії, що надходить Сонця і зростає чисельність енергії, що надходить на приймальну поверхню фотоелектричних модулів за той же проміжок часу.

Плоскі фотоелектричні модулі перетворюють як пряме, так і розсіяне сонячне випромінювання, падаюче під будь-яким кутом, і генерують електроенергію навіть у тому випадку, коли їх приймальна поверхня не орієнтована прямо на Сонце. Стеження в фотоелектричних системах з плоскими фотоелектричними модулями вживається для збільшення чисельності енергії, одержуваної від прямої складової сонячного випромінювання.

Висока точність стеження в системах стеження за Сонцем для розміщення плоских фотоелектричних модулів, як правило, не потрібно.

Плоскі фотоелектричні модулі, розміщені на системах стеження за Сонцем з точністю спостереження  $\pm 5^\circ$ , мають всі шанси дістати 99,6% енергії.

Системи спостереження за Сонцем для розміщення фотоелектричних модулів з концентраторами зобов'язані гарантувати реалізацію переваг оптичних пристроїв (Концентраторів). Оптичні пристрою таких фотоелектричних модулів / пристроїв зобов'язані направляти перпендикулярно потоку прямого сонячного випромінювання з більшою точністю, ніж прийомні поверхні звичайних плоских фотоелектричних модулів

Головні типи конструкцій одноосьових систем стеження за Сонцем

- з горизонтальною віссю обертання;

- з вертикальною віссю обертання;

- з похилою віссю обертання.

Вісь обертання одноосьової системи стеження за Сонцем з горизонтальною віссю обертання горизонтальна по відношенню до поверхні землі.

Горизонтальну вісь обертання рекомендується ставити уздовж справжнього північного меридіана. При застосуванні особливих алгоритмів стеження горизонтальну вісь обертання дозволено визначити в будь-якому напрямку.

## **Висновки**

В магістерській роботі проаналізовані засоби акумулювання енергії та їх роль у перспективах розвитку відновлювальних джерел енергії та одержані наступні наукові та практичні результати. Обґрунтовано методи підвищення ефективності застосування відновлюваних джерел енергії. Показано оптимальне співвідношення окремих елементів у комбінованих енергетичних системах (КЕС) на основі ВДЕ визначається з урахуванням багатьох факторів, що впливають на роботу таких енергосистем.

Виконаний аналіз системи акумулювання енергії відновлюваних джерел та надана класифікація акумуляторів енергії. Сформовані Вимоги до систем акумулювання електричної енергії. Обґрунтовано вибір електрохімічних акумуляторів. Розглянута система акумулювання теплової енергії. Яка є однією з актуальних проблем відновлюваної енергетики в сонячній теплоенергетиці; теплові акумулятори також ефективно використовуються в комплексі з вітроелектричними агрегатами, фотобатареями та в традиційній енергетиці для зняття пікових навантажень.

Обґрунтовано системи зберігання енергії з урахуванням аспектів безпеки і оптимізації. Показано оптимальне проектування системи СЗЕ яке має включати вибір типу СЗЕ, а також визначення бажаної потужності і розташування системи. Зазвичай як цільова функція приймається мінімальне споживання енергії і мінімальний діапазон зміни потужності акумулятора або максимізація прибутку (NPV – чистої приведеної вартості) станцій, що працюють на ВДЕ із застосуванням СЗЕ

Розроблено математичну модель процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від вітроелектричних установок та комплексних вітро-сонячних енергоустановок, яка дозволяє враховувати вплив типу електрохімічної системи, власні потреби станції та забезпеченість енергією вітру для визначення енергоємності буферного акумулятора.

В результаті аналізу динаміки розвитку ринку електромобілів в Україні та запропонованого прогнозу розвитку встановлено, що потреба в їх енергозабезпеченні, яка може забезпечуватись за рахунок енергії вітру та Сонця на території України до 2050 року складе 57,3 ТВт· год.

В роботі наведені показники економічної ефективності при використанні ВДЕ та розглянуто питання техніки безпеки при виконанні робіт.

## Список використаних джерел

1. Стаднік М. І., Рубаненко О. О., Бондаренко С. В. Аналіз ефективності генерації електроенергії на основі сонячної енергії в Вінницькій області. «Техніка, енергетика, транспорт АПК» С.104-114. - Вінниця, 2016. - №2(94) ,- 128с.
2. Стаднік М. І., Рубаненко О. О., Бондаренко С.В. Визначення рівня генерації електроенергії на сонячній електростанції відносно її встановленої потужності. «Техніка, енергетика, транспорт АПК» С.213-220. - Вінниця, 2016. -№3(95) ,- 249с
3. Стаднік М. І., Рубаненко О.О., Бондаренко С. В. Вибір встановленої потужності сонячної електростанції та її елементів. «Техніка, енергетика, транспорт АПК» С.166-1175. - Вінниця, 2017. -№1(96) ,- 189с.
4. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О., Методичні вказівки по оформленню дипломних робіт магістра для студентів ОКР «Магістр» спеціальності 8.10010101 «Енергетика сільськогосподарського виробництва» та студентів ОС «Магістр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка».– Вінниця: ВНАУ, 2016. - 64 с.
5. Будько В.І. Особливості зарядження акумуляторної батареї електромобілю від стаціонарної вітроелектричної станції / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2014. – №2. – С.16–19.
6. Будько В.І. Дослідження режимів паралельної роботи тягових джерел живлення екомобілю / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2014. – №4. – С.31–34.
7. Будько В.І. Автономні енерговузли на основі відновлюваних джерел енергії з різними системами акумуляування енергії / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2015. – №2. – С.21–25.
8. Будько В.І. Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в Україні / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2016. – №4. – С.32–41.
9. Будько В.І. Аналіз особливостей роботи та специфіки роботи

зарядних режимів свинцево-кислотних та нікель-залізних акумуляторних батарей / В.І. Бурдюк // Відновлювана енергетика. – 2017. – №1. – С.17–24.

10. Бурдюк В.І. Аналіз особливостей роботи та специфіки роботи зарядних режимів нікель-металогідридних та літієвих акумуляторних батарей / В.І. Бурдюк // Відновлювана енергетика. – 2017. – №2. – С.17–25.

11. Бурдюк В.І. Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок / В.І. Бурдюк // Відновлювана енергетика. – 2017. – №3. – С.6–13.

12. Бурдюк В.І. Застосування теорії черг для описання процесу заряду електромобілів на автономних заправочних станціях на основі відновлюваних джерел енергії / В.І. Бурдюк // Відновлювана енергетика. – 2017. – №4. – С.27–32.

13. Бурдюк В.І. Визначення енергоємності акумулятору водню при використанні вітроелектричних установок як первинних генераторів електроенергії в складі автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах / В.І. Бурдюк // East European Scientific Journal. – 2019 – №45, part 1. – С.21–27.

14. Бурдюк В.І. Комплексне використання ВДЕ в складі зарядних станцій акумуляторних батарей електромобілів / В.І. Бурдюк // XV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2014.– С.112–114.

15. Бурдюк В.І. Аналіз можливостей використання сонячної енергії як додаткового енергоджерела в НТУУ «КПІ» / В.І. Бурдюк // XII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2011.– С.216–217.

16. Бурдюк В.І. Пілотний проект сонячної станції в НТУУ «КПІ» для часткового покриття потреби в електричній енергії навчальних корпусів, задіяних в роботі приймальної комісії / В.І. Бурдюк // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2012.– С.229–232.

17. Будько В.І. Можливості використання відновлюваних джерел енергії на підприємствах агропромислової та харчової галузей України / В.І. Будько, Р.А. Климюк // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4. – С.26–30.

18. Мхитарян Н.М. Комплексное использование энергии возобновляемых источников / Н.М. Мхитарян, С.А. Кудря, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, М.Д. Ткаленко, В.И. Будько // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №17. – С.14–22.

19. Будько В.І. Концепція зарядження акумуляторної батареї електромобіля від фотоелектричної станції / В.І. Будько, С.О. Кудря, В.Б. Павлов // Відновлювана енергетика. – 2014. – №1. – С.14–21.

20. Головка В.М. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" на статичні характеристики вітроустановки / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2016. – №1. – С.45–54.

21. Будько В.И. Современное состояние и развитие возобновляемой энергетики / В.И. Будько, С.А. Кудря, А.В. Пепелов, // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – №4-6. – С.130–141.

22. Павлов В.Б. Зарядження електромобілів від відновлюваних джерел / В.Б. Павлов, В.І. Будько // Технічна електродинаміка. – 2017. – №6. – С.32–35.

23. Будько В.І. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі фотоелектричних батарей / В.І. Будько, С. В. Войтко, О. О.Трофименко // Відновлювана енергетика. – 2018. – №1. – С.19–25.

24. Будько В.І. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі вітроелектричних установок / В.І. Будько, С.О. Кудря, С.В. Войтко, О.О.Трофименко // Відновлювана енергетика. – 2019. – №1. – С.45– 50.

25. Павлов В.Б. Особливості роботи автономних зарядних станцій електромобілів з використанням вітроелектричних установок та буферних

аккумуляторів енергії / В.Б. Павлов, С.О. Кудря, В.І. Будько, В.М. Кириленко, В.Ю. Іванчук // Технічна електродинаміка. – 2019. – №4. – С. 70-76.

26. Ткаленко Д.А. Зависимость перенапряжения катодного выделения водорода на металлах от их свободной поверхности энергии и  $\psi$ -фактора / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №4. – С.28–31.

27. Ткаленко Д.А. О коррозионной устойчивости электродов электрохимических преобразователей энергии с расплавленными электролитами / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №1. – С.5–10.

28. Ткаленко Д.А. Моделирование кислородного электрода высокотемпературных электрохимических генераторов энергии / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №2. – С.5–10.

29. Ткаленко Д.А. Транспортные стадии и топология токообразующих процессов в высокотемпературных топливных элементах / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №3. – С.17–20.

30. Патент на корисну модель №129991 Україна, МПК F03D9/00 H02j7/00. Пристрій для зарядження акумуляторних батарей / В.Б. Павлов, В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, В.Є. Павленко, В.І. Будько.; заявник та правовласник Інститут відновлюваної енергетики НАН України, – №u201804673 ; заявл. 27.04.18 ; опубл. 26.11.18 ; Бюл. №22.

31. Sydorenko K. Flying of the UAV by the solar energy / K. Sydorenko, V. Budko // 2-nd International Conference "Methods and Systems of Navigation and Motion Control", 09.10.2012., p.159-160.

32. Будько В.І. Методи заряду електромобілів від відновлюваних джерел енергії / В.І. Будько, В.Б. Павлов // Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана та воднева енергетика - 2018», – 2018 р.– Київ, – С. 54 – 59.

33. Кудря С.О. Проблеми створення вітроводневих систем / С.О. Кудря, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, В.І. Будько // XIV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2013.– С.133–135.

34. Кудря С.О. Використання вітрової та сонячної енергії для опріснення / С.О. Кудря, М.А. Ткаленко, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, В.І. Будько // XVII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2016.– С.229–231.

35. Остапчук О.В. Перспективи використання джерел розподіленої генерації в енергосистемі України / О.В. Остапчук, В.І. Будько // Міжнародна науково-практична конференція —Енергозбереження та енергоефективність - 2018, Дніпро, 2018р. .– С.36–38.

36. Electricity access database - International Energy Agency. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/energyaccess/database/>

37. Робота ОЕС. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/roboata-oes-ukrayiny-zatyzhden/>

38. ДСТУ 3466-96 Якість електричної енергії. Терміни та визначення. Київ, 1998. 22 с.

39. Тарифи на електроенергію для домогосподарств України [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/catalog1/Prezentatsia\\_optymizatsia\\_taryfiv\\_na\\_electro.pdf](http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/catalog1/Prezentatsia_optymizatsia_taryfiv_na_electro.pdf)

40. Закон України «Про електроенергетику»: редакція від 01.01.2019. / Верховної Ради України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua>

41. Денисенко Г.И. Возобновляемые источники энергии / Г.И. Денисенко – Киев: КПИ, 1983. – 220 с.

42. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії :



Підручник/ С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.

43. Резцов В.Ф., Суржик Т.В. Синергетичний метод аналізу причин виникнення автоколивальних режимів у процесах перетворення енергії відновлюваних джерел / В.Ф. Резцов, Т.В. Суржик // Відновлювана енергетика. – 2017. – №1. – С.14–17.

44. Лежнюк П.Д., Бартецький А.А., Бартецька І.А. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій для забезпечення балансової стійкості енергосистеми// Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. – Том 29, №5, частина 2. – 2018. – С. 114–118.

45. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В., Котилко І. В., Прокопенко І. О. Оцінювання якості електропостачання в локальних електричних системах з різнотипними відновлюваними джерелами енергії // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – №195. – 2018. – С. 23–25.

46. Каплун В.В. Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення: монографія / В.В.Каплун – К.: КНУТД , 2017. – 187с.

47. Каплун В.В. Удосконалення перетворювального агрегату комбінованої системи електроживлення з поновлюваними джерелами енергії / Каплун В.В., Шавьолкін О.О. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. - №22(98). – С.165-169. <http://etks.opu.ua/core/getfile.php?id=1810>

48. Новський В.О., Павлов В.Б.Попов В.А., Палачов С.О. Застосування зарядних станцій електромобілів в міських електричних мережах / В.О. Новський, В.Б. Павлов, В.А. Попов, С.О. Палачов // Технічна електродинаміка. - 2018. - № 6. - С.77-80. <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.077>

49. Васько П.Ф., Ибрагимова М.Р., Пазыч С.Т. Гидроаккумулирующие электростанции на морской воде - технологическая основа

крупномасштабного использования ветровой и солнечной энергии в электроэнергетической системе Крыма / П.Ф. Васько, М.Р. Ибрагимова, С.Т. Пазыч // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №15. – С.38–49.

50. Науково-технічні засади підвищення енергоефективності фотоелектричних джерел електропостачання : автореф. дис... д-ра техн. наук / Е. А. Бскіров; НАН України. Ін-т відновлюв. енергетики. - К., 2008. - 32 с. - укр.

51. Невичерпна енергія : підруч. для студ. спец. «Нетрадиційні джерела енергії» вищ. навч. закл. Кн. 1. Вітроелектрогенератори / В. С. Кривцов, О. М. Олейников, О. І. Яковлєв. – Х. : ХАІ, 2004. – 396 с.

52. Неисчерпаемая энергия : учеб. для студентов специальности «Нетрадиционные источники энергии» высш. учеб. заведений. Кн. 2. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х. : ХАИ, 2004. – 519 с.

53. Шидловський А.К., Жарків А.Ф., Павлов В.Б., Новський В.О. Вплив розвитку зарядної інфраструктури електромобільного і гібридного транспорту на режими електричних мереж / А.К. Шидловський, А.Ф. Жарків, В.Б. Павлов, В.О. Новський // Технічна електродинаміка. - 2018. - № 3. - С.74-81. <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.074>

54. Неисчерпаемая энергия : учеб. для студентов специальности «Нетрадиционные источники энергии» высш. учеб. заведений. Кн. 4. Ветродородная энергетика / В. И. Кривцова, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х. : ХАИ, 2007. – 606 с.

55. Кузнецов М. П., Ужейко С. О. Імовірнісні аспекти використання відновлюваних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС / М. П. Кузнецов, С. О. Ужейко // Відновлювана енергетика. - 2016. - № 3. - С. 6-12.

56. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020: редакція від 01.10.2014. / Кабінету Міністрів України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>

57. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в слабкі електричні мережі. / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко, І.В. Трач // Технічна електродинаміка. 2012, - №3, с. 25-26.

58. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України / Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – К.: ВІОЛ-Принт, 2012. – 55 с.

59. Global EV Outlook 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/gevo2019/>

60. Full-Service Fulfillment House. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [www.ctcf-inc.com](http://www.ctcf-inc.com)

61. Statistics Time Series. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>

62. Ринок електромобілів зростає. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://news.finance.ua/ua/news/-/384511/rynok-elektromobiliv-zrostaue>

63. Химические источники тока: Справочник / Под редакцией Н.В. Коровина и А.М. Скудина. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 740с.

64. Нефедов В.Г., Поліщук Ю.В. Електрохімічна енергетика. Свинцеві акумулятори: улаштування, виробництво, розрахунки: навчальний посібник. / В.Г. Нефедов, Ю.В. Поліщук – Дніпропетровськ.: ДВНЗ УДХТУ, 2013. – 298 с.

# Додатки

# Direct Normal Irradiation (DNI)

# Europe

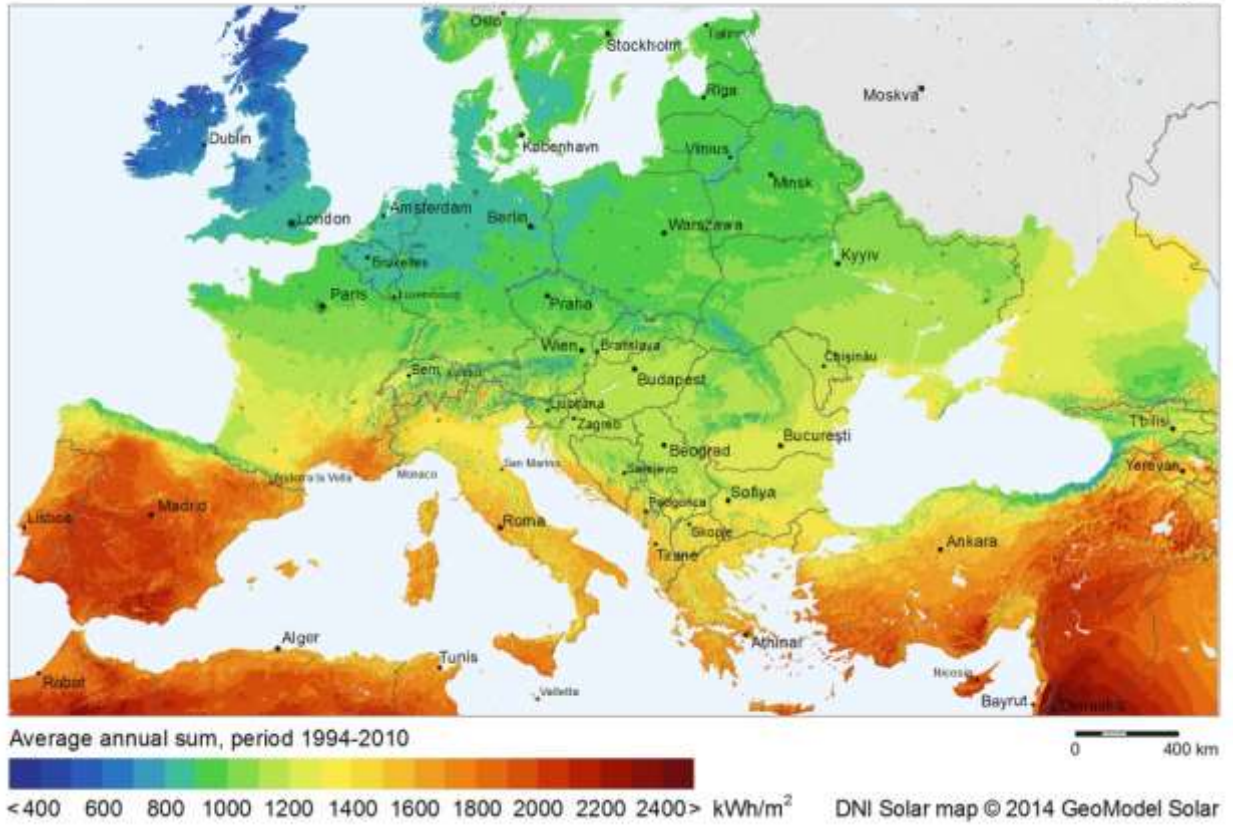


Рисунок 1 – Карта середньої сумарної інсоляції Європи за рік.

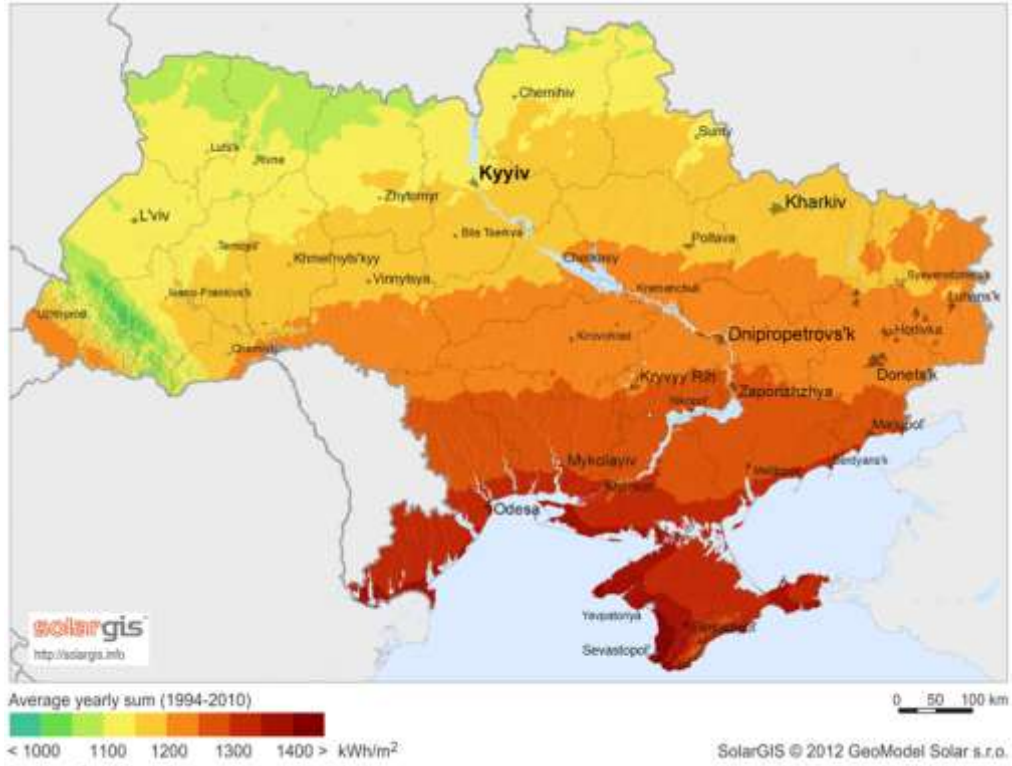


Рисунок 2– Карта середньої сумарної інсоляції України за рік.

## Додаток Б

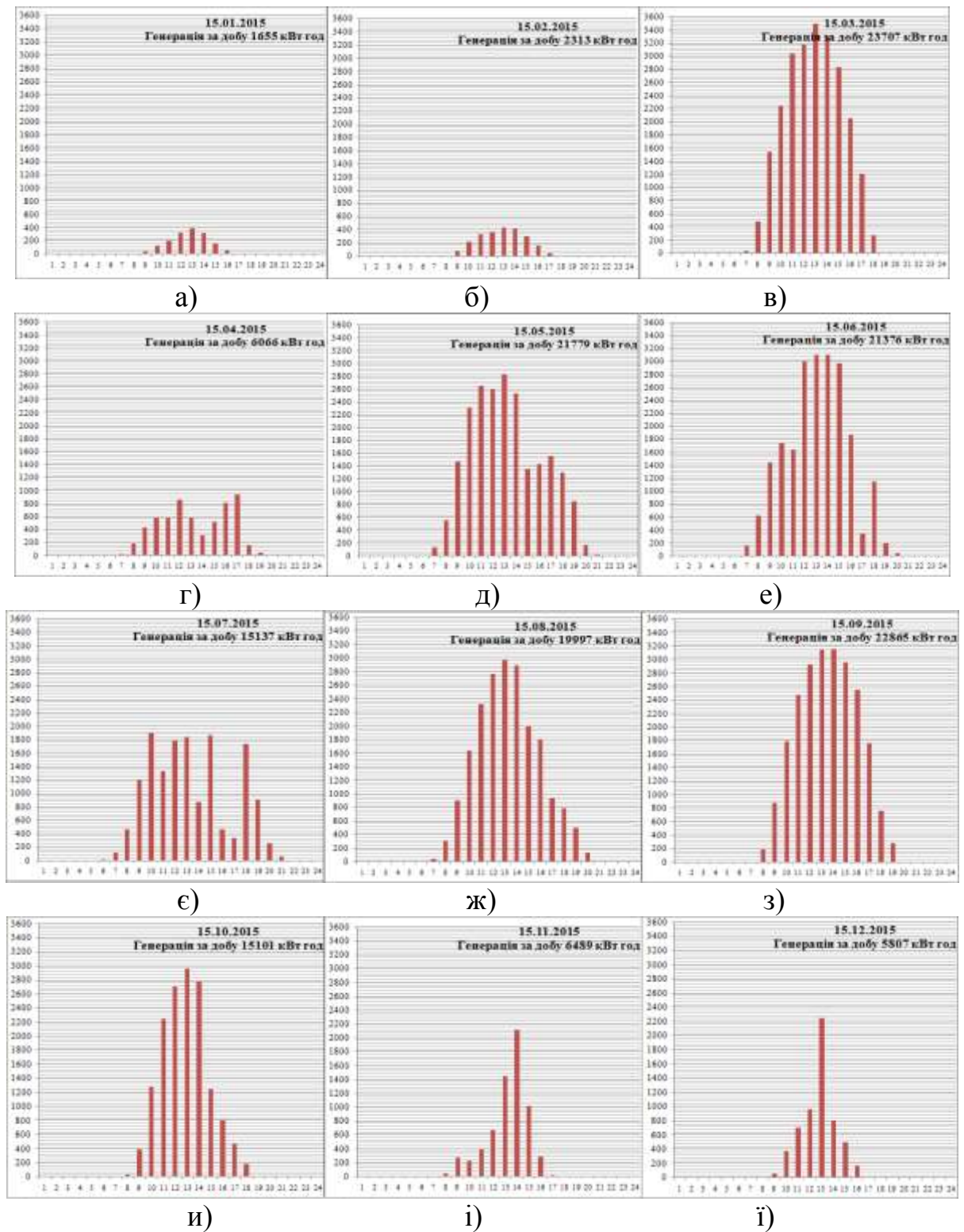


Рисунок 3 – Гістограми на основі добового навантаження Цекинівської СЕС за 15 число кожного місяця а) 15.01.2015; б) 15.02.2015; в) 15.03.2015; г) 15.04.2015; д) 15.05.2015; е) 15.06.2015; є) 15.07.2015; ж) 15.08.2015; з) 15.09.2015; и) 15.10.2015; і) 15.11.2015; ї) 15.12.2015.

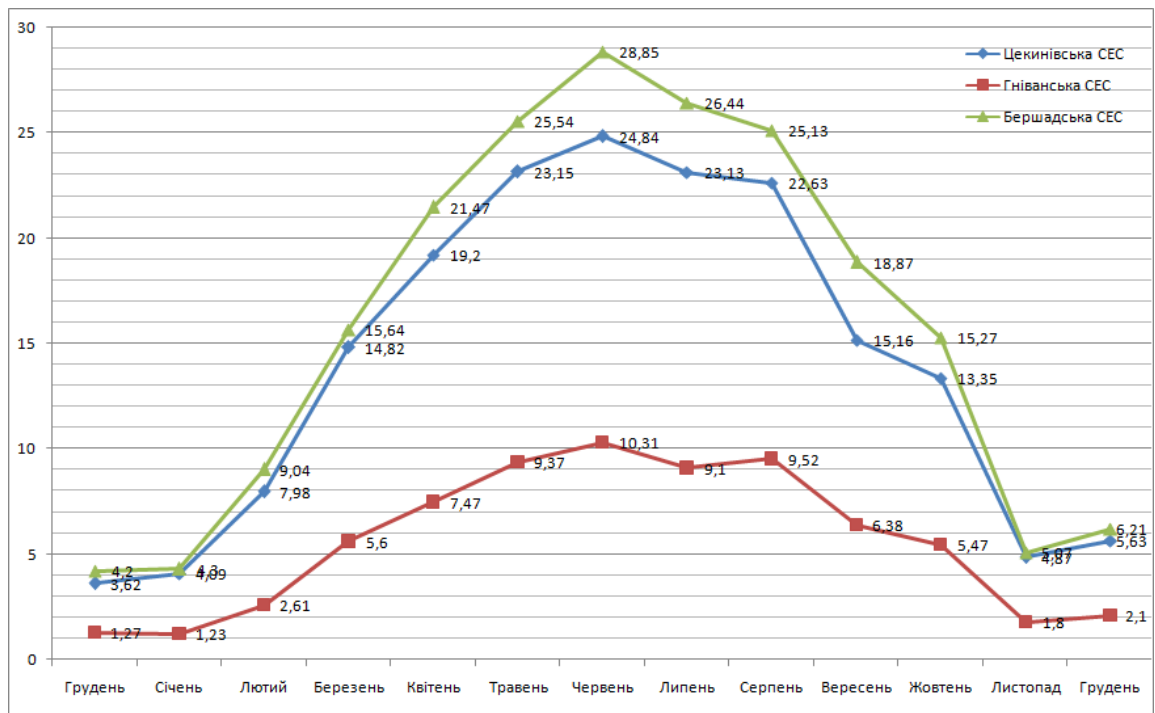


Рисунок 4 – Генерація електроенергії за кожен місяць з 1 м<sup>2</sup> в кВт год для трьох СЕС з грудня 2014 до грудня 2015.

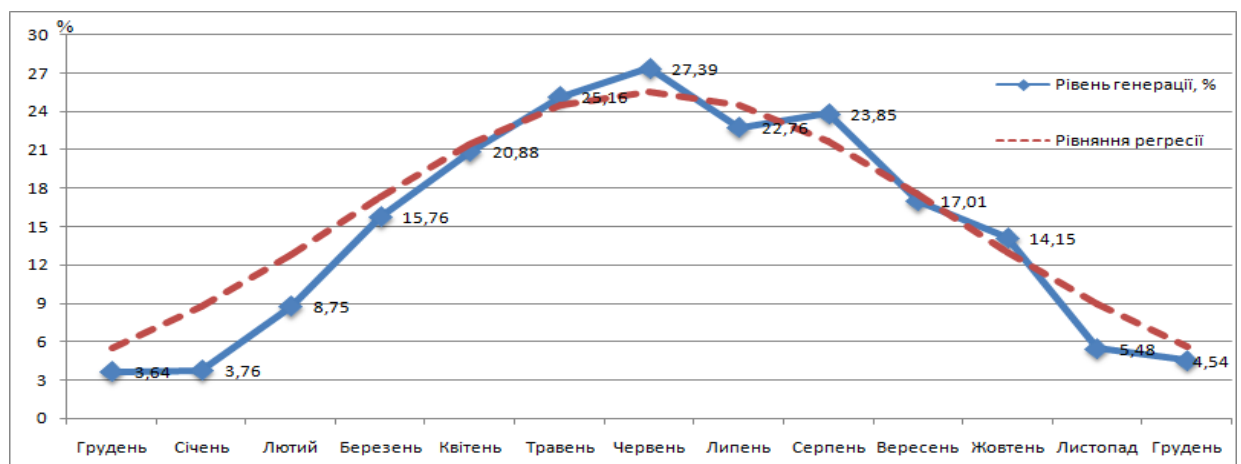


Рисунок 5 – Графік рівня використання встановленої потужності сонячних панелей на СЕС південної частини Вінницької області за грудень 2014 року – грудень 2015 року.

Графік статистичного рівня генерації на рис. 5 (синя лінія) описується рівнянням регресії:

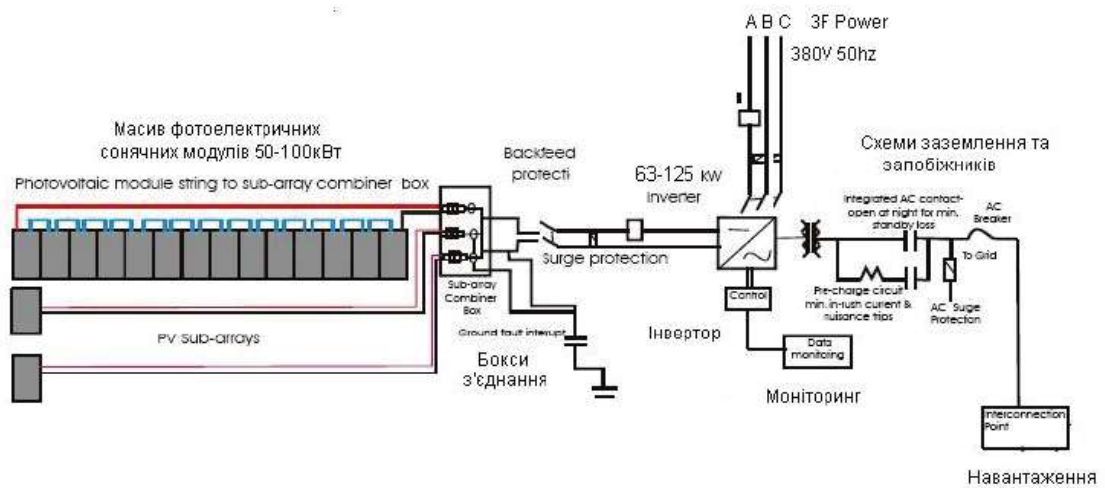


Рисунок 6 – Промислова сонячна електростанція на 50—100 кВт (пік, max) типу «on-grid» (із підключенням до зовнішньої електроенергетичної мережі 380 В)

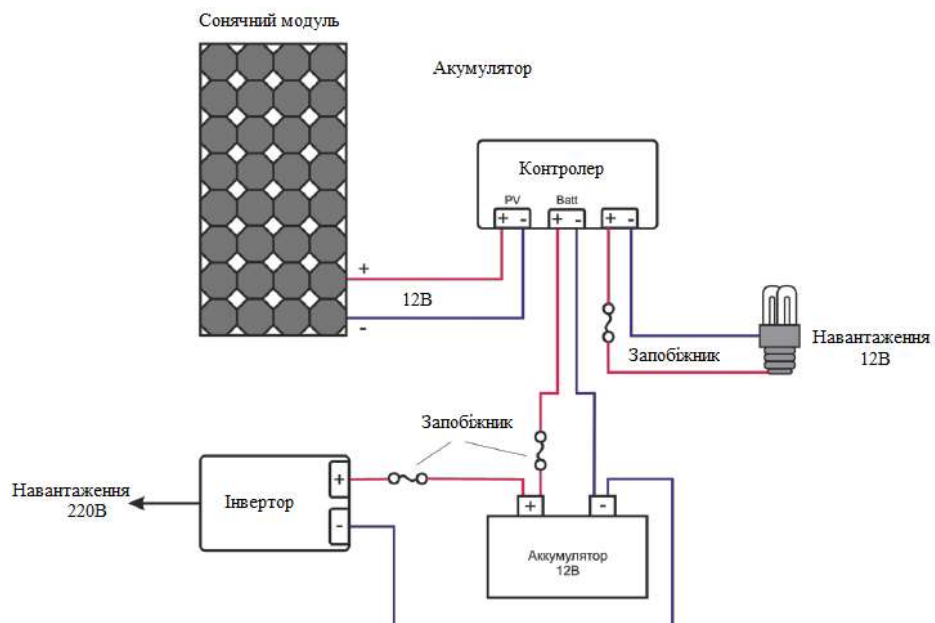


Рисунок 7 – Схема домашньої сонячної електростанції для автономного електропостачання.



## Технічні характеристики комерційних електромобілів

Марка електро- мобіля	Тип електродвигуна	Потужність ел.- двигуна		Тип бортової АБ	Напруга АБ, В	Енергія бортової АБ, кВт·год	Дальність пробігу		Максимальна швидкість, км/год	Звичайний заряд від АС мережі 220В, год	Звичайний заряд від АС мережі 380В, год	Прискорений заряд від мережі DC до 0,8Сн, год	Питома витрата енергії, кВт·год/км
		к.с.	кВт				ЕРА	NEDC					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SMART ForTwo	Трифазний синхронний двигун змінного струму	77	54	Літій- іон	93	17,6	110	154	130	6	3,5	0,75	0,16
Volkswagen e- Golf 201	Синхронний електродвигун змінного струму	136	100	Літій- іон		35,8	200	-	150	7-10	4-5	1	0,179
Tesla Model S 75D	Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом	315	235	Літій- іон	300	75	400	480	225	25 – 35	5 – 7	0,5	0,187
Tesla Model S 75D	Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом	330	245	Літій- іон	300	75	420	490	225	25 – 35	5 – 7	0,5	0,178
Tesla Model 3	Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом	238	175	Літій- іон	300	50	354	-	210	20-40	8	0,5	0,14

	Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом	261	192	Літій- іон	300	75	499	-	210	20-40	8	0,5	0,15
Tesla Model X P100D	Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом	720	576	Літій- іон	350	100	462	542	250	35-50	6-9	0,5	0,216
Tesla Model X 100D	Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом	423	310	Літій- іон	350	100	472	-	248	40	6-9	0,5	0,212
Renault ZOE Z.E. 40 2017	Електродвигун	92	68	Літій- іон	400	41	300	400	140	7,5	2,67	1,67	0,137
Renault Kangoo Z.E. 2017	Синхронний двигун змінного струму	60	44	Літій- іон	400	33	200	270	130	6	-	-	0,165
Peugeot iOn	Електро-двигун	64	47	Літій- іон	330	16	115	150	130	6	-	0,5	0,139
Peugeot Partner Electric	Асинхронний двигун змінного струму	67	49	Літій- іон	310	22,5	130	170	110	7 – 8	3 – 4	0,5	0,173
Opel Ampera-e	Синхронний трьохфазний електродвигун з постійними магнітами	204	150	Літій- іон	360	60	380	520	145	9	-	0,5	0,158
Nissan Leaf 2018	Електричний двигун EM57	150	110	Літій- іон	360	40	243	378	144	16	8	0,67	0,165
Nissan e- NV200	Синхронний двигун змінного струму	109	80	Літій- іон	360	40	220	280	122	21,5	7,5	0,67-1	0,18
Kia Soul EV 2018	Синхронний двигун змінного струму	110	90	Літій- іон	360	30	173	220	145	5 – 6	-	33 хв.	0,173
Kia Niro EV 2018	Синхронний двигун змінного струму	204	150	Літій- іон	360	64	385	-				0,9	0,166
Jaguar I-Pace	2 синхронних двигуна EV400	400	294	Літій- іон	390	90	480	-	200	-	1,5	0,67	0,187
Hyundai Ioniq Electric	Електричний двигун з постійними магнітами	120	88	Літій- іон	360	28	177	250	165	8-14	-	0,5	0,158

Hyundai Cona Long- range	Електричний двигун з постійними магнітами	204	150	Літій- іон	356	64	420	-	167	9,67	-	0,9	0,152
Hyundai Cona Short- range	Електричний двигун з постійними магнітами	136	100	Літій- іон	356	39	263	-	167	6,1	-	0,9	0,148
Honda clarity electric	Асинхронний електродвигун змінного струму	161	120	Літій- іон	348	25,5	142	-		3,5	-	0,5	0,179
Ford Focus Electric 2017	Електродвигун	143	107	Літій- іон	-	33,5	185	-	135	5	-	0,5	0,189
Fiat 500e	Електродвигун	111	83	Літій- іон	364	24	135	-	141	4	-	-	0,178
Citroen C- Zero	Електродвигун	64	47	Літій- іон	330	16	115	150	130	6	-	0,5	0,139
Citroen Berlingo Electric	Асинхронний двигун змінного струму	67	49	Літій- іон	310	22,5	130	170	110	7 – 8	3 – 4	0,5	0,173
Chevrolet Bolt EV	Електро-двигун	200	150	Літій- іон	350	60	380	-	160	9	-	0,5	0,158
Byd E6	Синхронний електродвигун з постійними магнітами	121	91	Літій- іон	-	75	350	400	140	6 – 8	-	0,67	0,214
BMW i3	Технологія BMW eDrive: гібридний синхронний двигун	170	125	Літій- іон	353	33,2	250	300	150	9,5	2,75	до 67	0,133
BMW i3s 2018	Технологія BMW eDrive: гібридний синхронний двигун	184	135	Літій- іон	353	33,2	230	280	160	9,5	2,75	до 67	0,143

## Технічні показники електромобілів

Марка електро-мобіля	Енергія бортової АБ, кВт*год	Дальність пробігу по ЕРА	Напруга АБ ЕМ, В	Маса ЕМ, кг	Питома витрата енергії, кВт*год/км	Потреба енергії для заряду від 0,2 до 0,8Сн, кВт*год/км	Ємність АБ ЕМ А*год
1	2	3	4	5	6	7	8
SMART ForTwo	17,6	110	370	940	0,16	10,56	50
Volkswagen e-Golf 2017	35,8	200	323	1567	0,179	21,48	110
Tesla Model S 75D	75	400	300	2110	0,187	45	250
Tesla Model S 75D	75	420	300	2110	0,178	45	250
Tesla Model 3	50	354	300	-	0,14	30	167
	75	499	300	-	0,15	45	250
Tesla Model X P100D	100	462	350	2396	0,216	60	286
Tesla Model X 100D	100	472	350	2396	0,212	60	286
Renault ZOE Z.E. 40 2017	41	300	400	1470	0,137	24,6	102,5
Renault Kangoo Z.E. 2017	33	200	400	1426	0,165	19,8	82,5
Peugeot iOn	16	115	330	1195	0,139	9,6	49
Peugeot Partner Electric	22,5	130	310	2225	0,173	13,5	72,5
Opel Ampera-e	60	380	360	1691	0,158	36	167
Nissan Leaf 2018	40	243	360	1557	0,165	24	111
Nissan e-NV200	40	220	360	2250	0,18	24	111
Kia Soul EV 2018	30	173	375	1513	0,173	18	75
Kia Niro EV 2018	64	385	375	1737	0,166	38,4	171
Jaguar I-Pace	90	480	390	2133	0,187	54	230

Hyundai Ioniq Electric	28	177	360	1420	0,158	16,8	77,78
Hyundai Cona Long-range	64	420	356	1685	0,152	38,4	180
Hyundai Cona Short-range	39	263	356	1535	0,148	23,4	110
Honda clarity electric	25,5	142	348	1826	0,179	15,3	73,2
Ford Focus Electric 2017	33,5	185	-	1661	0,189	21	-
Fiat 500e	24	135	354	1005	0,178	14,4	68
Citroen C-Zero	16	115	320	1120	0,139	9,6	50
Citroen Berlingo Electric	22,5	130	310	1391	0,173	13,5	72,5
Chevrolet Bolt EV	60	380	350	1625	0,158	36	171
Byd E6	61,4	350	317	2020	0,214	45	194
BMW i3	33,2	250	353	1245	0,133	19,92	94
BMW i3s 2018	33,2	230	353	1365	0,143	19,92	94

## Технічні показники комерційних електромобілів на паливних елементах

Марка електромобіля	Тип електродвигуна	Потужність електродвигуна		Тип бортової АБ	Вартість електромобіля FCEV,	Потужність паливних елементів, кВт	Дальність пробігу	Максимальна швидкість, км/год	Тривалість заправки, хв	Споряджена маса, кг	Тиск в ємності з воднем, атм	Місткість ємності для водню, л	Тип паливних елементів
		к.с.	кВт										
Honda Clarity	Синхронний електродвигун на постійних магнітах змінного струму	174	128	Літій-іон	59,4	103	589 EPA	160	3-5	1890	До 700	171	На протоно-обмінних мембранах (PEMFC)
Toyota Mirai	Синхронний електродвигун на постійних магнітах змінного струму	154	113	Нікель-металогідрид	57,5	114	502 EPA	175	3-5	1850	До 700	112,4	На протоно-обмінних мембранах (FC stack)
Hyundai Nexa	Синхронний електродвигун на постійних магнітах	161	120	Літій-іон полімерний	59,8-62,3	95	600 EPA 800 NEDC	177	5	1870	До 700	156	На протоно-обмінних мембранах
Hyundai ix35 FCEV	Синхронний електродвигун на постійних магнітах	134	100	Літій-іон полімерний	69,8	100	426 EPA	160	5	1830	До 700	144	На протоно-обмінних мембранах