

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОДОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ЦІЛЬОВОЇ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ГРАВІТАЦІЙНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ
ЕНЕРГІЇ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕС-24 мг
Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
_____/ Денис ВЕЛИЧКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Вячеслав МЕЛЬНИКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Віктор ХОМЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Денису ВЕЛИЧКО

1. Тема «Підвищення надійності водопостачання фермерського господарства шляхом впровадження цільової фотоелектричної станції з гравітаційним накопичувачем енергії»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3664 від «06» жовтня 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «15» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, що відображені у періодичних виданнях, наукових роботах, монографіях.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ДОСВІДУ ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ КОМПЛЕКСУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З ГРАВІТАЦІЙНИМ РІДИННИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ, РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ КЕРУВАННЯ ПОСТІЙНОЮ ШВИДКІСТЮ ГІДРАВЛІЧНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ВИСНОВКИ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2025 р.

Керівник

(підпис)

Вячеслав МЕЛЬНИКОВ

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Денис ВЕЛИЧКО

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.25 – 15.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.25 – 23.10.25	
3	Виконання першого розділу магістерської кваліфікаційної роботи	24.10.25– 01.11.25	
4	Виконання другого та третього розділу магістерської кваліфікаційної роботи	02.11.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 – 07.12.25	
6	Підготовка доповіді, презентації до захисту	08.12.25- 15.12.25	

Студент (ка)

(підпис)

Денис ВЕЛИЧКО

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 59, рисунків – 25; таблиць - 1; літературних джерел – 51.

В роботі було проведено ґрунтовний критичний аналіз сучасних технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами.

Розроблено загальні принципи побудови комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

Розроблено технологічну схему комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

Досліджено параметри керування постійною швидкістю гідравлічного накопичувача енергії.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ, ГРАВІТАЦІЙНІ
НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ, ЗАСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ,
ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА, ГІДРОАКУМУЛЯТОРИ

ABSTRACT

Pages of text – 59; pictures – 25; tables – 1; literary sources – 51.

The work has conducted a thorough critical analysis of modern technologies for energy storage using gravity accumulators.

The general principles of building a complex of a target photovoltaic station with a liquid gravitational energy storage system have been developed

The technological scheme of a complex of a target photovoltaic station with a liquid gravitational energy storage system has been developed

The parameters of constant speed control of a hydraulic energy storage system have been studied

PHOTOELECTRIC POWER PLANTS, GRAVITATIONAL ENERGY
STORAGE SYSTEMS, SPEED REGULATION DEVICES, TECHNOLOGICAL
SCHEME, HYDRAULIC ACCUMULATORS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ГРАВІТАЦІЙНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1 Загальні положення аналізу систем гравітаційного накопичення енергії

1.2. Рідке гравітаційне накопичення енергії

1.3. Накопичувач енергії твердої сили тяжіння

1.4. Порівняльний аналіз технологій

Висновки за розділом 1

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПРОЩЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ

ВОДОПОСТАЧАЛЬНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ

ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ГРАВІТАЦІЙНИМ РІДИННИМ

НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

2.1. Загальні положення

2.2. Складання технологічної схеми

Висновки за другим розділом

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ

ПОСТІЙНОЮ ШВИДКІСТЮ ГІДРАВЛІЧНОГО НАКОПИЧЕННЯ

ЕНЕРГІЇ

3.1 Загальні положення

3.2. Система контролю постійної швидкості та експериментальна випробувальна установка

3.2.1. Огляд системи

3.2.2. Схеми управління

3.2.3. Експериментальний випробувальний стенд

3.3. Математична модель гідроаккумулятора

3.3.1. Гідроаккумулятор

3.3.2. Пропорційний клапан

3.3.3. Запобіжний клапан

3.3.4. Змінний двигун

3.3.5. Синхронний генератор

3.3.6. Датчик швидкості

3.3.7. Банк навантаження

3.4. Моделювання та експериментальне дослідження

3.4.1. Моделювання міцності на кроку потужності
постійного навантаження

3.4.2. Експерименти міцності на змінному кроці потужності
навантаження

Висновки за третім розділом

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

АСГД – асинхронізований гідрогенератор-двигун

АСГДК – асинхронізований гідрогенератор-двигун контрроторного виконання

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕС – вітрова електростанція

СГ – синхронний генератор

ГГ – гідрогенератор

ГЕС – гідравлічна електрична станція

ГАЕС – гідравлічна акумулююча електрична станція

ККД – коефіцієнт корисної дії

СГД – синхронний гідрогенератор-двигун

ФЕС – фотоелектрична електростанція

ТЕО – техніко-економічне обґрунтування

КЗ – коротке замикання

ЛЕП – лінія електропередачі

ВСТУП

Актуальність дослідження полягає у тому, що фотоелектричні станції мають низку проблем при їх інтеграції до загальних мереж, а в автономному режимі вони повинні мати засоби накопичення енергії. Наразі ця проблема вирішується засобами акумулювання електричної енергії переважно в хімічних акумуляторах з приєднанням станції та акумуляторів до споживача через силові інвертори.

Вартість цього обладнання складає переважну долю загальної вартості фотоелектричної електростанції. Використання рідинного гравітаційного накопичувача енергії з двомашинним агрегатом дозволить відмовитися від силових інверторів у складі технологічного обладнання фотоелектричної електростанції а значною мірою здешевити її будівництво

Об'єктом дослідження є процес накопичення енергії в рідинних гравітаційних накопичувачах енергії

Предмет дослідження - технологічна схема комплексу цільової фотоелектричної електростанції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії

До завдання дослідження відносяться:

- Проведення аналізу сучасних технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами
- Розробка загальних принципів побудови комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії
- Розробка технологічної схеми комплексу цільової фотоелектричної станції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії
- Дослідити параметри керування постійною швидкістю гідравлічного накопичувача енергії

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГРАВІТАЦІЙНОГО НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1 Загальні положення аналізу систем гравітаційного накопичення енергії

Їх широкомасштабне застосування вимагає ефективного та надійного накопичення енергії системи для забезпечення стабільного енергопостачання. Гравітаційний накопичувач енергії, як накопичувач енергії

Технологія, заснована на фізичних принципах, має унікальні переваги перед іншими накопичувачами енергії методів, особливо з точки зору довговічності, великомасштабного зберігання енергії та екологічності дружелюбності. На прикладі гідроакumuлюючих гідроакumuляторів (ГГЕС) [1,2] термін його експлуатації може перевищувати 50 років, значно перевищуючи 5–15 років накопичення енергії літій-іонної батареї (LIBES) [3,4]. Відсутня проблема хімічного розкладання та низька вартість обслуговування. Кому порівнянні з короткостроковими технологіями високої потужності, такими як накопичувач енергії на маховику (FES) [5,6] або надпровідний магнітний накопичувач енергії (SMES) [7,8], здатність до накопичення енергії тяжіння може досягає рівня GWh, що робить його придатним для пікового значення мережі та довготривалого зберігання енергії потреби, а не обмежуватися додатками другого чи хвилинного масштабу. Економічно вони мають нижчу вартість життєвого циклу, ніж батареї та накопичувачі водневої енергії (HES) [9], незважаючи на те більш високі початкові інвестиції. Такі матеріали, як вода та бетон, є стабільними та доступними доступний. Вони не схильні до коливань цін на рідкісні метали. Екологічно, сила тяжіння Зберігання енергії дозволяє уникнути проблем з видобутком корисних копалин і утилізацією відходів електрохімічні накопичувачі енергії та насосні накопичувачі мають низький вуглецевий слід.

Гравітаційне накопичення енергії (SGES)[10–12] може навіть використовувати відпрацьовані ресурси, що краще ніж накопичення енергії

стисненого повітря (CAES)[13,14], яке потребує паливної допомоги. Крім того, технологія збереження енергії гравітації досить зріла.

Нові пілоти SGES також демонструють потенціал для прориву географічні обмеження. У порівнянні з накопичувачами теплової енергії, такими як HES, яких менше ефективно, гравітаційне накопичення енергії може досягати 70–90% ККД із прямим і стабільним виходом.

Однак він менш географічно залежний і чуйний, ніж Li-ion BES або SMES ще потрібно оптимізувати. Результати порівняння кількох поширених накопичувачів енергії методи показані в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння кількох поширених технологій зберігання енергії.

Type	Capacity Level	Energy Density (Wh/kg)	Response Time	Service Life (year)	Efficiency (%)	Levelized Cost (USD/kWh)
LIBES	kW	100–265	ms	10–20	85–95	0.15–0.25
FES	kW	5–30	ms	15–20	85–90	0.25–0.50
SMES	kW	0.5–50	us	20–30	95–98	0.50–2.00
HES	kW/MW	30–50	us	15–25	35–50	0.20–0.50
CAES	MW	30–60	min	20–30	40–70	0.10–0.20
PHS	GW	0.5–1.5	min	40–60	70–85	0.05–0.15
SGES	MW	0.1–0.5	min	30–50	80–90	0.05–0.10

Зберігання енергії тяжіння – це технологія, яка базується на перетворенні гравітаційної потенціаленергії для реалізації накопичення електричноїенергії, а основніформи включаютьPHS і Порівняно з іншими методами зберігання енергії, гравітаційне зберігання енергії має наступні переваги: по-перше, він має довший термін служби, менше зношування та розтирання механічна система, і порівняно з LIBES, вона має більший цикл життя та менший розпад

По-друге, матеріалами гравітаційних систем накопичення енергії є переважно сталь і бетон, які мають менший вплив на навколишнє середовище та є більш безпечними для навколишнього середовища, ніж HES.

Крім того, порівняно з SMES і FES, гравітаційне накопичення енергії є більш економічним для великомасштабних програм зберігання енергії. Однак гравітаційне накопичення енергії також є певні недоліки. По-перше, його щільність енергії низька в порівнянні з CAES і LIBES і його енергоємність на одиницю маси низька. По-друге, це більше обмежено географічними умовами, особливо тому, що традиційна гідроакumuлююча система потребує відповідності

рельєфу місцевості. І в той час як твердий гравітаційний ліфтенергосховище зменшує географічну залежність, це все ще вимагає більших інвестицій в інфраструктуру. Крім того, гравітаційне накопичення енергії є повільніша миттєва реакція потужності, що не вигідно в сценаріях, які вимагають швидкого

динамічна відповідь у порівнянні з SMES і FES. Тому в майбутніх застосуваннях гравітація накопичувач енергії потрібно поєднати з інтелектуальним керуванням, щоб оптимізувати планування підвищення його конкурентоспроможності[15,16].

Фундаментальний принцип технології накопичення енергії гравітації досягає перетворення між енергією гравітаційного потенціалу та електричною енергією за допомогою підйому і опускання важких предметів. Під час фази підйому надлишкова електрична енергія перетворюється в гравітаційну потенціальну енергію для зберігання. Коли виникає дефіцит електропостачання, накопичена гравітаційна потенціальна енергія вивільняється та перетворюється назад в електричну енергію. Акумулятори енергії тяжіння можна класифікувати як накопичувачі енергії тяжіння в рідкому стані (LGES) і SGES на основі середовища зберігання. PHS є найдосконалішою формою LGES і було широко впроваджено в усьому світі. Однак його розширення стримується географічними умовами та впливом на навколишнє середовище. В останні роки зароджується гравітація технології накопичення енергії привернули увагу. SGES включає баштові, залізничні, і шахтні системи гравітаційного зберігання. Ці інноваційні підходи спрямовані

на розширення сценарії застосування систем зберігання енергії та підвищення ефективності використання енергії.

Друга частина присвячена рідкому гравітаційному накопиченню енергії. третя частина описує твердий гравітаційний накопичувач енергії. Частина четверта представляє порівняння гравітаційного зберігання енергії і проблеми, з якими стикаються. Частина п'ята підсумовує весь огляд. Цей огляд підсумовує і аналізує останні досягнення в галузі технології гравітаційного зберігання енергії, охоплюючи принципи роботи, технічні характеристики, переваги та проблеми різних типів гравітаційних систем зберігання енергії. Він також досліджує їхні потенційні застосування в майбутньому енергетичні системи. Цей огляд має на меті забезпечити систематичний огляд існуючої літератури теоретичне забезпечення та довідник для подальших досліджень і розвитку гравітаційної енергії технологія зберігання.

1.2. Рідке гравітаційне накопичення енергії

LGES використовує рідину як носій інформації. Шляхом переміщення води між верхньою водоймою

і нижній резервуар, електрична енергія перетворюється на гравітаційну потенційну енергію

зберігання, а потім, коли це необхідно, вивільняється як електрична енергія. Принцип його роботи полягає в складається з двох фаз: накопичення енергії та виділення енергії.

Під час фази накопичення енергії надлишок електроенергії з мережі, наприклад надлишок вітрова або сонячна енергія в періоди пікового навантаження або нічні години з низьким попитом використовується для приводу водяних насосів. Ці насоси перекачують воду з нижнього резервуару в верхній резервуар, перетворюючи електричну енергію в гравітаційну потенціальну енергію, збережену в підвищена водна маса. Збережену енергію можна виразити рівнянням

$$E = mgh$$

де m - позначає масу піднятої ваги, g — прискорення вільного падіння, h — вертикальну висота, на яку піднімається вага.

У фазі виділення енергії вода з верху водосховище стікає назад до нижнього резервуару. Текуча вода приводить в дію турбіну, змушуючи його обертатися. Механічна енергія турбіни передається генератору, який перетворює її в електричну енергію та постачає в мережу для задоволення пікового попиту на електроенергію.

Через такі фактори, як втрати гідравлічного напору, електромагнітні втрати в генераторі та турбулентність і тертя в трубах, типова ефективність насосно-гідроакumuлюючої системи коливається від 70% до 85%.

LGES сильно залежить від географічних умов, оскільки його накопичувальна ємність безпосередньо залежить визначається об'ємом накопиченої води та перепадом висот. Однак це просто і надійна робота робить його незамінним для великомасштабного тривалого зберігання енергії програми. У наступних розділах представлено конкретні випадки застосування рідкої гравітації зберігання енергії.

Насосна гідроакumuляція

Зараз електростанція Fengning PHS, розташована в провінції Хебей, Китай найбільша електростанція PHS у світі за встановленою потужністю, як показано на рисунку 1.1.

Проект був побудований у дві черги із загальною встановленою потужністю 3600 МВт загальна сума інвестицій становить 18 мільярдів юанів. Станція складається з 12 енергоблоків, кожен з яких потужністю 300 МВт, що робить їх одними з найбільших одноблокових потужностей у світі.

Станція має верхній і нижній резервуари, причому верхній резервуар може зберігати 58 млн кубометрів води і нижнє водосховище 61 млн кубометрів.

Перепад висот між двома водосховищами 425 м. Система подачі води складається із сталевих трубопроводів високого тиску загальною довжиною

приблизно 4,5 км і а діаметр 8,5 м. Електростанція може виробляти електроенергію з повним навантаженням у режимі очікування всього за 2 хв. Він здатний виконувати два повних цикли заряджання-розряджання на день, з загальний ККД 82–85%. Fengning також є першою в світі гідроакумуючою станцією яка перевищує потужність 3000 МВт, зберігаючи ефективність понад 80%. В майбутньому, станція планує інтегрувати 500 МВт фотоелектричної (PV) і 200 МВт вітрової енергії, формуючи комплексну систему зберігання відновлюваної енергії, яка поєднує сонячну, вітрову та насосну гідроакмуляцію.

Насосна станція округу Бат, якою спільно керують Dominion Energy та FirstEnergy є одним із найбільших накопичувачів енергії в Північній Америці, як показано на рисунку 1.2. відображено будівництво електростанції яке було розпочато в 1977 році, і вона була повністю введена в експлуатацію 1985 році із загальним обсягом інвестицій 1,6 мільярда доларів. Станція має загальну встановлену потужність 3003 МВт, а при повному навантаженні протягом 8 год забезпечує енергоакумуючу ємність 24 ГВт*год. Верхнє водосховище має ємність 113 млн куб нижнє водосховище може зберігати 136 млн куб. Перепад висот між двох водосховищ 380м. Станція складається з шести енергоблоків, кожен з яких має 501 МВт.



Рис.1.1. Електростанція Fengning PHS.

Насосна станція округу Бат, якою спільно керують Dominion Energy та FirstEnergy є одним із найбільших накопичувачів енергії в Північній Америці, як показано на рисунок 1.2.

місткість. Система водопостачання включає два основних тунелі, кожен із яких має загальна довжина 1,6 км і діаметр 8,8 м. Станція може наростати з режиму очікування до повного генерує навантаження протягом 5 хвилин і здатний виконувати 1,5 повних циклу заряду-розряду на день.

Загальний ККД системи становить 75–80%. Насосна станція округу Бат відіграє вирішальну роль у регулюванні частоти в США Пенсільванія-Нью-Джерсі-Мері

Земля (PJM) Interconnection, з часом відгуку 5 хв і можливістю згладжування $\pm 2\%$ коливання навантаження. З огляду на його довгу історію експлуатації, планується модернізація із змінною швидкістю для двох генеруючих блоків до 2025 року, щоб підвищити загальну ефективність станції до 80%.

Крім того, інтеграція сонячної, гідроакumuляційної та насосної акумуляції (PV-hydro hybrid system) розглядається як напрямок майбутнього розвитку.

МВт потужність. Система водопостачання включає два основних тунелі, кожен із яких має загальну довжину 1,6 км і діаметр 8,8 м. Станція може переходити від режиму очікування до повного навантаження генерації протягом 5 хвилин і здатний до 1,5 повних циклів заряджання-розряджання на день. Загальний ККД системи 75–80%. Насосна станція округу Бат відіграє вирішальну роль у регулюванні частоти в США Пенсільванія-Нью-Джерсі-Меріленд

(PJM) Взаємозв'язок, час відгуку 5 хв і здатність згладжувати $\pm 2\%$ навантаження коливання. Зважаючи на довгу історію експлуатації, планується модернізація із змінною швидкістю два енергоблоки до 2025 року, щоб підвищити загальну ефективність станції до 80%.

Крім того, інтеграція сонячної, гідроакumuляційної та насосної акумуляції (гібридна PV-гідросистема) розглядається як напрямок майбутнього розвитку.

ГАЕС Окутатарагі, розташована в Японії та експлуатується Kansai Electric Power Company (KEPCO) є однією з найсучасніших насосних станцій країни складські приміщення з найбільшим гідравлічним напором. Як показано на малюнку 3, завод був введена в експлуатацію в 1974 році. Система складається з чотирьох блоків, кожен з номінальною потужністю 483 МВт, використовуючи синхронні генератори. Він забезпечує вироблення електроенергії при повному навантаженні з місця зупинки 3 хв, загальною встановленою потужністю 1932 МВт. Завод забезпечує накопичення енергії потужністю 14,5 ГВт-год за 7,5 год роботи на повному навантаженні. Верхній резервуар має сховище ємністю 12 млн. куб.м, а нижня водойма вміщує 14 млн. куб.

Система працює з гідравлічним напором 388 м, підтримується водопроводом система, що складається з двох вертикальних шахтних

напірних трубопроводів, довжиною 1,2 км і довжиною 5,2 м кожен діаметр. Завод виконує два повних цикли заряджання-розряджання щодня, досягаючи циклу ефективність поїздки 85%. Завдяки інтеграції агрегатів із змінною швидкістю з надвисоким напором,



Рис. 1.2 Станція Бат



Рис. 1.3 Станція ГАЕС Окутатарагі

Завод Okutataragi демонструє виняткову продуктивність у регулюванні частоти мережі точність і ефективність інтеграції відновлюваної енергії, пропонуючи критично важливу підтримку для живлення системи з високим проникненням відновлюваної енергії.

Наведено порівняння продуктивності кількох великих гідроакумулюючих станцій у таблиці 1. 2. Насосний накопичувач займає центральне положення в системах зберігання енергії [17] за ознакою надвеликомасштабних, довгострокових, недорогих і зрілих технологій. Його незамінність в такі сценарії, як пікове значення мережі та споживання відновлюваної енергії, незважаючи на виклики географічних обмежень[18]і тривалих циклів будівництва.

Таблиця 1.2. Порівняння параметрів кількох основних станцій PHS.

Parameter	Fengning	Bath County	Okutataragi
Capacity (MW)	3600	3003	1932
Hydraulic head (m)	425	380	388
Efficiency (%)	82–85	75–80	85
Response time (min)	2	5	2.5

Нове рідке гравітаційне накопичення енергії

Порівняно з твердим гравітаційним накопичувачем енергії, накопичувач гідроенергії з насосом (PHES) страждає від низької щільності енергії. Щоб усунути це обмеження, RheEnergise зосереджується на розробка систем гравітаційного зберігання енергії високої щільності на основі рідини (HDF-GES). Ядро інновація полягає в заміні води рідинами високої щільності як середовища зберігання енергії, з метою підвищення щільності енергії та зменшення площі системи. RheEnergise використовує а фірмова екологічно чиста рідина на мінеральній основі щільністю 2,5 т/м³, приблизно у 2,5 рази

більше, ніж у води, зберігаючи в'язкість, порівнянну з водою m у першому рівнянні можна виразити як у рівнянні

$$m = \rho V$$

де ρ – щільність вантажу, що піднімається, V є його обсяг.

Це середовище теоретично досягає 2,5-кратної щільності зберігання енергії звичайний PHS в ідеальних умовах. Система використовує покинуті шахти як сховище камери. У періоди надлишку електроенергії двигуни перекачують рідину високої щільності (HDF) від нижніх водойм до підвищених. Під час розряду HDF протікає вниз трубопроводи, що приводять в рух турбіни для виробництва електроенергії, а потім повертаються в нижній резервуар, завершення циклу заряд-розряд.

Подібним чином компанія Sink Float Solutions (SFS) у Нідерландах використовує щільний фізіологічний розчин розчин циркулював між піднятими та нижніми резервуарами для зберігання енергії. цілі ДФС інтегрувати сховища в міську інфраструктуру, продемонструвавши доцільність компактний гравітаційний накопичувач рідини високої щільності. У Китаї важелі New Energy Let's Go міські підземні інженерні тунелі для будівництва розподілених мереж гравітаційного зберігання рідини використання рідин високої щільності.

1.3. Накопичувач енергії твердої сили тяжіння

SGES представляє технологію механічного накопичення енергії, що працює на принципах аналог ЛГЕС. Критична відмінність полягає у використанні твердих мас як середовище зберігання енергії, а не рідини. Ця технологія забезпечує двонаправлене перетворення енергії через контрольоване вертикальне переміщення твердих вантажів, трансформ електричну енергію в гравітаційну потенційну енергію під час заряджання та реверсування процесу під час розряду. Забезпечуючи ефективне накопичення енергії та зменшення

пікових навантажень у масштабі сітки можливостей, SGES вирішує критичні проблеми в інтеграції відновлюваної енергії. Ці характеристики позиціонують SGES як новий центр досліджень сталої енергетики рішення для зберігання.

Поточні реалізації SGES можна розділити на чотири основні конфігурації: Баштові CГЕС (T-SGES) [19],
Рейкові CГЕС (R-SGES) [20],
Шахтні CГЕС (SSGES) [21,22],
Гірська SGES (M-SGES) [23].

У той час як баштова і залізнична конфігурації досягли стадії прототипу або пілотного зразка, наприклад баштові системи Energy Vault і ARES демонстрації на рейках, впровадження на основі валу залишаються в експериментальній перевірці цієї фаз. Гірські підходи, хоча теоретично перспективні для кількох ГВт-год потенціал зберігання, вимагають подальших геотехнічних обґрунтувань. Різноманітність цих архітектури підкреслює адаптивність SGES до різноманітних ландшафтів інфраструктури, починаючи з міського середовища до постіндустріальних об'єктів.

T-CГЕС

T-SGES — це нова технологія накопичення енергії мережевого масштабу, яка використовує гравітацію потенціальної енергії твердої сили тяжіння для накопичення та виділення електрики. Завдяки своїм перевагам низькою вартістю, тривалим терміном служби та екологічністю є кілька станцій T-SGES у всьому світі використовується для регулювання від піку до спаду, регулювання частоти мережі тощо.

Модель системи T-SGES, розроблена компанією Swissenergystorage Energy Vault показано на рисунку 1.4. Система центрів шестигранної вежі інтегрована з шістьма кранами маніпуляторами. У періоди надлишку електроенергії надлишкова потужність змушує систему піднімати 35 тонн бетонні блоки та складіть їх у вежу висотою 120 м, перетворюючи

електроенергію на гравітаційна потенціальна енергія. Під час нестачі електроенергії крани опускають блоки, за допомогою сили тяжіння ваги, що приводить в дію генератори, зберігає збережену енергію електроенергії. Використовуючи цю технологію, EnergyVault розгорнула свою першу 35 МВт·год SGES система в Індії в 2019 році, як показано на рисунку 1.5. Система складається з масивних шести плечей кран і кілька 35-тонних бетонних блоків. Він забезпечує накопичувальну ємність 35 МВт·год, а пікова вихідна потужність становить 4 МВт, а час відповіді становить 2,9 для початку виробництва електроенергії.

Система досягає ККД 90% без перерв і може безперервно розряджатися протягом 8–16 годин на потужності 4–8 МВт, що забезпечує швидке реагування на потреби мережі.



Рис. 1.4 Загальний вигляд моделі модуля T-SGES від EnergyVault.



Рисунок 1.5. T-SGES від EnergyVault, розгорнутий в Індії: (а) загальне зображення T-SGES; (b) вид верхньої частини.

Системи T-SGES пропонують такі переваги, як мінімальні географічні обмеження, гнучкість розташування, тривалий безперервний розряд потужності та швидка швидкість реакції, що робить їх добре підходить для задоволення вимог щодо зменшення пікових навантажень мережі. Ємність даних систем можна розширити за рахунок інтеграції кількох веж зберігання та модульної конфігурації. Однак це ключ до подолання обмежень розвитку систем T-SGES полягає в пом'якшенні зовнішнього впливу на навколишнє середовище та забезпеченні міліметрового рівня похибки.

S-SGES

S-SGES — це технологія зберігання енергії, яка використовує підземні шахти або виготовлені шахти для накопичення та вивільнення електроенергії. Його принцип роботи схожий на принцип баштовий гравітаційний накопичувач енергії, за винятком того, що ця система використовує природні підземні перепади висот.

Маючи приблизно 1 мільйон покинутих шахт у всьому світі, системи S-SGES мають значне та потенціал розвитку.

Gravitricity, британська компанія, що спеціалізується на гравітаційному накопиченні енергії, запропонувала система S-SGES. Принципова схема системи показана на рисунку 1.6. Інтегруючи покинутих шахтах з інфраструктурою зберігання енергії, Gravitricity побудувала випробувальний полігон на Leith Port в Единбурзі в 2021 р. Глибина шахти 15 м, а загальна маса ваги становить 50 тонн. Під час фази накопичення енергії надлишок електроенергії змушує двигун піднімати вагу до верхньої частини валу, перетворюючи електричну енергію в гравітаційний потенціал енергії. Під час розряду вага опускається, приводячи в дію генератор за допомогою редукторної системи виробляти електроенергію. Система має ємність накопичення енергії 1 МВт·год, пікову потужність 259 кВт і ККД 85%. Він може пройти десятки тисяч циклів відсутність значного зниження ефективності та досягає часу відгуку 0,5 с, відповідаючи сітці вимоги регулювання частоти. Після успішного пілотування компанія Gravitricity ініціювала а демонстрація комерційного масштабу у 2023 році шляхом модернізації стовбура вугільної шахти глибиною 800 м у 9 з 15 регіон Сілезія. Модернізована система розрахована на загальну потужність 20 МВт/год пікова потужність 4 МВт, обслуговує локальні мікромережі в районах видобутку.

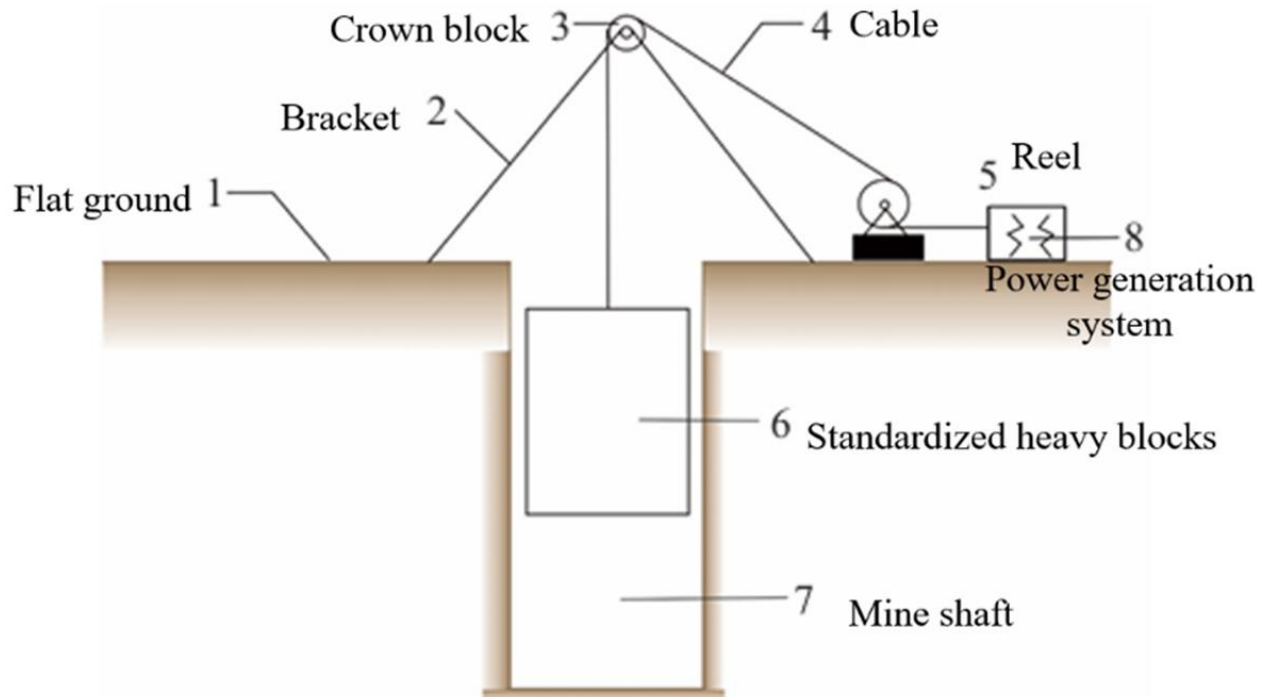


Рис. 1.6 Принципова схема S-SGES

Проект Gravitricity підтвердив доцільність побудови енергії тяжіння системи зберігання з використанням покинутих шахт. S-SGES пропонує такі переваги, як висока швидкість відгуку та тривалий термін служби, що робить його ідеальним рішенням для регулювання частоти мережі та інтеграції з накопичувачами відновлюваної енергії. Проте покинуті шахти зазвичай несуть ризики обвалення, що потребує додаткового зміцнення. Основна технічна проблема для систем S-SGES полягає в покращенні точності позиціонування систем двигуна для досягнення точного регулювання частоти.

Швидкість і тривалий термін служби, що робить його ідеальним рішенням для регулювання частоти мережі та інтеграції з накопичувачами відновлюваної енергії. Проте покинуті шахти зазвичай несуть ризики обвалення, що потребує додаткового зміцнення. Серйозна технічна проблема для

R-SGES

R-SGES — це нова технологія накопичення енергії, яка перетворює гравітаційну енергію потенціальної та електричної енергії шляхом переміщення тягарців по похилих доріжках. Він досягає накопичення та вивільнення енергії за допомогою гусеничних механічних систем. Коли електроенергія в мережі надлишкова, система активує двигуни для транспортування електропоїздів із противагами вгору по коліях до піднятих платформ для зберігання. Ефективність перетворення енергії під час цього процесу залежить від ефективності двигуна та механічних втрат на тертя, причому загальна ефективність досягає приблизно 80–85%. Коли потрібна потужність мережі, ваги опускаються вздовж рейок під дією сили тяжіння, приводячи в дію генератори для виробництва електроенергії. Потенційна енергія перетворюється на електричну та повертається в мережу через інвертори, досягаючи ефективності генерації 85–90%. Загальна ефективність системи в обидві сторони становить від 70 до 75%. Весь процес не містить хімікатів і екологічно чистий. Підходить для гірських районів і покинутих шахт, деякі є надлишковими, система активує двигуни для транспортування електропоїздів із противагами вгору вздовж колій до підвищених складських платформ. Ефективність перетворення енергії під час цього процесу залежить від ефективності двигуна та механічних втрат на тертя, причому загальна ефективність досягає приблизно 80–85%. Коли потрібна потужність мережі, ваги опускаються вздовж рейок під дією сили тяжіння, змушуючи генератори виробляти електроенергію. Потенційна енергія перетворюється на електричну та повертається в мережу через інвертори, досягаючи ефективності генерації 85–90%. Загальна ефективність системи в обидві сторони становить від 70 до 75%. Весь процес не містить хімікатів і є екологічним. Кілька пілотних проєктів рейкових гравітаційних систем накопичення енергії вже реалізовано для гірських районів і покинутих шахт.

У проєкті ARES (Advanced Rail Energy Storage) США, як показано на рисунку 1.7, використовується схил місцевості в покинутих шахтах для

розгортання залізничних колій. Доріжки мають нахил 8–10° і простягаються приблизно на 8,85 км. Для зменшення втрат на тертя від накладних витрат контактних мереж, проект використовує розподілені електровози, що живляться через третю рейку.

Один поїзд складається з двох локомотивів і семи вагонів загальною вагою 1550 тонн. Модульна конструкція підтримує координоване планування кількох поїздів для розширення ємності системи накопичення енергії. Двонаправлена моторна система проєкту дозволяє швидке перемикання між режимами заряджання та розряджання, полегшуючи реагування в режимі реального часу коливання частоти мережі та оптимізоване розподіл енергії. Демонстраційний проєкт в Неваді має загальну потужність 12,5 МВт-год і пікову вихідну потужність 50 МВт, здатну задовольнити погодинну потребу в електроенергії 15 000 домогосподарств. Використовуючи вже існуючі залізничної інфраструктури, проєкт зменшує капітальні витрати. Слідом за успішною Невадою ARES планує розробити систему зберігання енергії в масштабі 10-15 ГВт у Каліфорнії, інтегровану з фотоелектричними станціями для безперебійної інтеграції в мережу відновлюваної енергії.

Цільовий проєкт має запланований термін експлуатації понад 40 років з орієнтовним вирівнюванням вартості електроенергії нижче 0,05 USD/кВт-год.

Проєкт ARES встановив себе як еталон для нової гравітаційної енергії зберігання через його ефективну механічну систему на основі рейок. Система R-SGES використовує похилої місцевості та існуючої залізничної інфраструктури для будівництва, досягнення зменшеного інвестиційні витрати при збереженні географічної адаптованості. Як механічна система, це пропонує подовжений термін служби та менші вимоги до технічного обслуговування перехід із режиму очікування на повну вихідну потужність за секунди, це ефективно адресує.

Вимоги високочастотного регулювання частоти. Однак його загальна ефективність та енергія щільність залишається відносно низькою, що

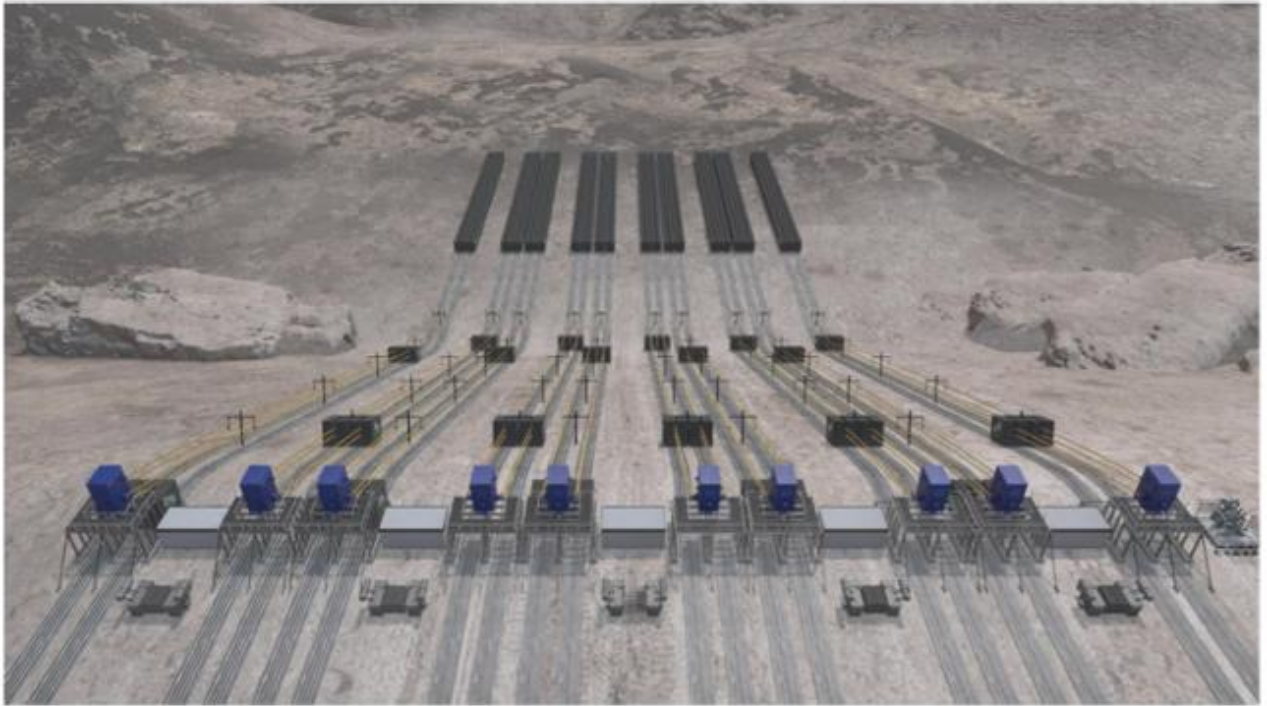
супроводжується переривчастою вихідною потужністю під час ваги транспортування. Отже, розробка легких композитних матеріалів для мінімізації втрати енергії та спільне розміщення з установками відновлюваної енергії, такими як вітрові та сонячні електростанції з'явилися ключові тенденції розвитку R-SGES.

M-SGES

Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (IIASA) запропонував M-SGES технологію довгострокового зберігання енергії, придатна для потужностей нижче 20 МВт.

Технологія використовує природні перепади висот у гірському дощі для побудови сили тяжіння системи накопичення енергії, як показано на рисунку 1.8. Це досягає взаємного перетворення між потенційна електроенергія шляхом транспортування сипучих матеріалів, таких як пісок гравій між підвищеними та нижніми місцями зберігання. Під час фази зберігання енергії крани підйомники та гравійні кабелі від нижнього до підвищеного місця зберігання, перетворення надлишкова електрична енергія у збільшену гравітаційну потенціальну енергію ваги.

У фазі вивільнення енергії ваги спускаються по кабелях від підвищеного до нижчого сховища, перетворюючи енергію гравітаційного потенціалу в електрику за допомогою механічних робота, яка потім подається в мережу. гравітаційні системи зберігання енергії, як показано на рисунку 1.8. Це досягає взаємного перетворення між потенційною енергією та електричною енергією шляхом транспортування сипучих матеріалів, таких як пісок і гравій між високими та нижніми місцями зберігання.



(a)



(b)

Рисунок 1.7. Рендер-зображення запланованої гірської R-SGES ARES:

(a) загальний вигляд моделі системи R-SGES;

(b) демонстраційний проєкт ARES Nevada.

Під час накопичення енергії етап, крани піднімають пісок і гравій за допомогою кабелів з нижнього місця зберігання на підвищене, перетворення надлишкової електричної енергії в збільшену гравітаційну потенційну енергію ваги. У фазі вивільнення енергії вантажі спускаються по кабелях з

піднесеного до нижнє місце зберігання, перетворюючи гравітаційну потенційну енергію в електрику механічна робота, яка потім подається в мережу.

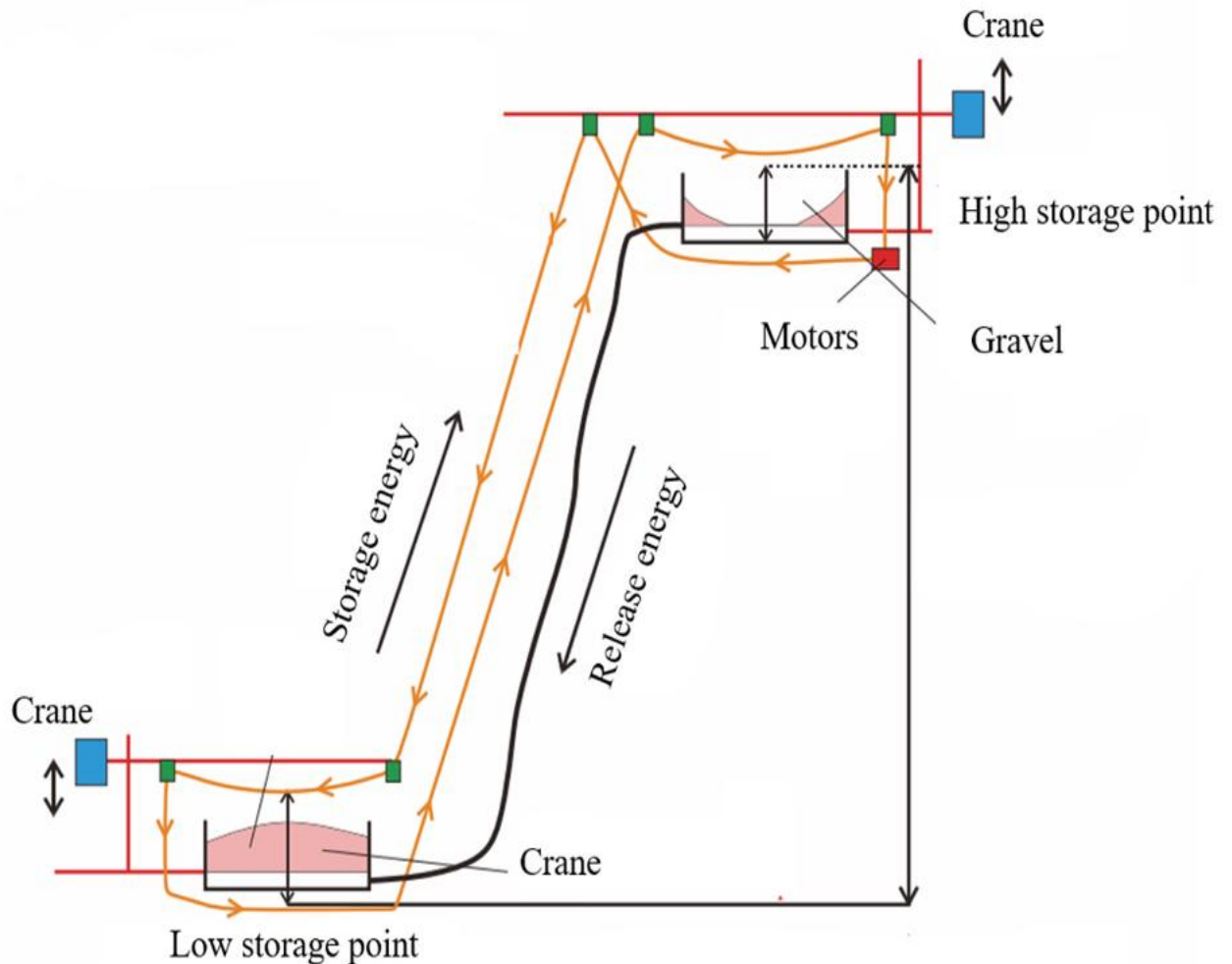


Рис. 1.8 Принципова схема системи M-SGES

Порівняно з PHS, M-SGES пропонує більш високу щільність енергії при повному використанні крутизна гірська місцевість. Однак масштаб таких систем безпосередньо обмежений топографія: чим більша різниця у висоті між нижнім і підвищеним місцями зберігання і чим крутіші схили гір, тим виразніша ефективність зберігання енергії система стає.

1.4. Порівняльний аналіз технологій

Як обговорювалося в розділах 1.2 і 1.3, PHS, T-SGES, S-SGES та R-SGES довготривалі, великомасштабні технології накопичення енергії. Їхній фундаментальний принцип роботи передбачає взаємне перетворення гравітаційної потенційної енергії та електричної енергії для досягнення накопичення та вивільнення енергії. Однак між ними існують помітні відмінності загальні технології гравітаційного накопичення енергії з порівняльними результатами, узагальненими в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Порівняння параметрів гравітаційних накопичувачів енергії

Type	PHS	T-SGES	S-SGES	R-SGES
Capacity	GW	MW	MW	MW
Service life (year)	40–60	30–50	30–50	25–40
Efficiency (%)	70–85	80–90	80–85	75–85
Response time (min)	2–5	1–5	1–5	2–10
LCOE (USD/MWh)	60–150	80–130 [24]	70–110 [25]	90–160 [26]
Example	Fengning PHS Station	Energy Vault: Switzerland	Gravitricity: Scotland	ARES: Nevada, US state

PHS, найдосконаліша технологія, використовує різницю рівня води між верхньою та нижньою резервуари для перетворення енергії. Він досягає ефективності 70–85% і зазвичай має термін служби 50 років. Тим не менш, він стикається зі значними географічними обмеженнями, довго цикли будівництва та високі капітальні витрати. T-SGES забезпечує більшу гнучкість розміщення завдяки підйому ваги через баштові конструкції для зберігання та вивільнення енергії. З ефективністю в діапазоні від 80–90% і термін служби 30–50 років, однак він стикається з проблемами щодо матеріалу вибір за вагою та міцністю конструкції. S-SGES використовує природну або покинуту шахту вали для побудови системи, ефективно використовуючи наявні ресурси для зменшення інвестицій витрати. Він досягає ККД 80–85% і має тривалість служби, порівнянну з системами на базі башт.

Однак ця технологія залишається на етапі демонстрації, безпосередньо масштабуючи систему обмежена глибиною шахти та відносно високими

витратами на обслуговування. Р-СГЕС, на даний час на пілотній стадії суттєво використовує залізничні колії для розвитку інфраструктури зниження вартості будівництва. Загальний ККД, що досягає 75–85%, представляє відносно високоефективне рішення для зберігання.

Тоді як технології гравітаційного зберігання енергії знаходять все більш широке застосування в електромережах залишаються значні проблеми в їх розвитку.

Можливості та виклики

Стабільність навантаження

У системах SGES стабільність важких об'єктів, таких як бетонні або сталеві блоки, безпосередньо впливає на безпеку експлуатації та ефективність перетворення енергії системи. Під час підйому та опускання через інерцію вага може коливатися, що впливає на стабільність роботи залізничної системи. Існуючі дослідження показали, що використання актив системи демпфування або стратегії адаптивного керування можуть ефективно зменшити коливання. Для T-SGES, сильний вітер може призвести до відхилення підвішених тягарів, впливаючи на точність вирівнювання. Рішення включають оптимізацію аеродинамічної конструкції ваг і впровадження інтелектуальної системи керування вітром [27–29]. Нерівномірний розподіл навантаження в а схема спільного зберігання кількох ваг може призвести до нерівномірного навантаження в системі та посилити знос механічних компонентів. Оптимізація геометрії ваг і стратегія управління навантаженням є ефективними напрямками вдосконалення [30,31].

Гравітаційна система зберігання енергії. Точність

Орбітальна система є основною частиною системи накопичення енергії твердої гравітації та її точність визначає точність позиціонування ваги та загальну ефективність система. Невеликі деформації або накопичені помилки орбіти можуть призвести до падіння ваги відхиляються від ідеального шляху та впливають на стабільність роботи. Людина високоточної колії процес

виготовлення та регулярний механізм калібрування помилок є важливими. Ролики або полози в рейковій системі може зазнавати втрати на тертя через тривале використання, що знижує ефективність системи [32].

Дослідження показали, що використання матеріалів з низьким коефіцієнтом тертя, таких як полімерні композити, і технологія магнітної левітації може значно зменшити втрати на тертя [33–35]. Крім того, у великомасштабних програмах зберігання енергії кілька важких об'єктів можуть працювати на різних шляхів, уникнення перешкод між коліями та оптимізація стратегій перемикавання колій є ключовими технічними проблемами. В останні роки з'явилися алгоритми призначення треків на основі машинного навчання показали більший потенціал для застосування в цій галузі.

Оптимізація алгоритму керування

Оптимізація алгоритмів керування має вирішальне значення для покращення загальної продуктивності твердих гравітаційних систем накопичення енергії, які в основному включають аспекти ваги планування, управління енергією та динамічний відгук системи. Енергоефективність систему можна вдосконалити шляхом прогнозування попиту на навантаження та раціонального розташування ритми підйому та опускання тягарів [36,37]. В останні роки інтелектуальна оптимізація методи, засновані на навчанні з підкріпленням, були досліджені в цій галузі. Використання високоточні датчики, такі як лазерні далекоміри та інерціальні навігаційні системи, до моніторинг положення важких вантажів у режимі реального часу та поєднання адаптивного контролю алгоритми, такі як керування режимом ковзання та нечітке керування, можуть підвищити точність позиціонування вантажу. Системи накопичення енергії з твердою гравітацією можуть мати збої в передачі або помилки керування та інтелектуальні системи діагностики несправностей, такі як аномалія на основі глибокого навчання алгоритми виявлення, можуть підвищити надійність і безпеку системи [38,39].

Висновки за розділом 1

Гравітаційне накопичення енергії, як нова широкомасштабна технологія накопичення енергії, тримається широкі перспективи розвитку в глобальному енергетичному переході. Основна його перевага полягає в використанні недорогих, придатних для переробки ваг, таких як вода та гравій, для зберігання енергії, уникаючи споживання ресурсів і забруднення навколишнього середовища, пов'язані з хімічними батареями. В останні роки, зумовлені швидким розвитком відновлюваної енергетики та глобальною вуглецевою нейтральністю цілі, гравітаційне зберігання енергії продемонструвало значний потенціал зростання:

По-перше, політична підтримка та зростаючий ринковий попит сприяли розвитку можливості зберігання енергії гравітації. Уряди в усьому світі активно сприяють цьому інфраструктура відновлюваної енергетики [40, 41], тоді як накопичення енергії — критичне значення для пікового зниження мережі і балансування навантаження — потреба зростає.

По-друге, технологічний прогрес і скорочення витрат підвищили конкурентоспроможність гравітаційного зберігання енергії.

Крім того, інтеграція покинутих шахт і перепрофілювання застарілої інфраструктури можуть бути ефективними зменшити початкові інвестиції та підвищити економічну життєздатність.

Однак глобальний розвиток гравітаційного зберігання енергії все ще стикається з багатьма проблемами:

По-перше, ефективність системи потребує оптимізації, як поточна ефективність двостороннього проходження залишаються нижчими, ніж у деяких зрілих технологій зберігання.

По-друге, високі початкові інвестиції менти зберігаються. Значні витрати на інфраструктуру вимагають зменшення економії на масштабі питомі витрати на комерційну життєздатність. Як екологічне рішення для зберігання енергії, енергія гравітації Зберігання створює одночасно можливості та виклики.

Майбутній успіх залежатиме від технологічні інновації, політичні вказівки та оптимізовані бізнес-моделі для її стимулювання широкомасштабна інтеграція в глобальні енергетичні системи.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПРОЩЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВОДОПОСТАЧАЛЬНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ГРАВІТАЦІЙНИМ РІДИННИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

2.1 Визначення загальних принципів проєктування спрощеної технологічної схеми фотоелектричних електростанцій

Розробка спрощених технологічних схем базується на таких основних принципах:

- принцип невибагливого споживача;
- принцип цільового використання;
- принцип зменшення ступенів перетворення енергії;
- принцип використання елементів схем за подвійним призначенням.

Принцип невибагливого споживача

Концепція невибагливого споживача передбачає, що низка споживачів електричної енергії можуть корисно та ефективно споживати електричну енергію, але при цьому не вимагають від системи електропостачання дотримання вимог їх категорійності згідно з Правилами улаштування електроустановок. Тобто їх умовно можна назвати споживачами четвертої категорії. Таким чином невибагливий споживач енергії – це споживач, який не висуває жорстких умов по синхронізації графіків генерації та споживання, а задовольняється певною кількістю енергії за період часу. При цьому перерви в електропостачанні та стохастична зміна потужності споживання електричної енергії не завдають суттєвої шкоди технологічному процесу споживача. До прикладів таких невибагливих споживачів можна віднести:

- системи водопостачання з функцією накопичення;
- системи опалення з функцією накопичення;
- окремі обчислювальні комп'ютерні системи;
- системи промислового електролізу водневої енергетики;

- системи гарячого водопостачання з функцією накопичення теплової енергії;
- окремі системи кондиціонування повітря промислових об'єктів;
- окремі системи вентиляції.

Режим роботи таких споживачів може відповідати можливостям нестабільної генерації електричної енергії такими слабкопрогнозованими в поточному часі джерелами живлення як вітрові та сонячні електростанції.

Принцип цільового використання

Електрична енергія є самим універсальним видом енергії, проте вона потребує постійного регулювання та вимагає чіткого дотримання показників якості електричної енергії. При цьому сучасна уніфікація параметрів процесу електропостачання не дозволяє приєднувати не стандартизованих споживачів та джерела живлення, тому, що це порушує сам технологічний процес електропостачання.

Проте за умови автономного споживання електроенергії цей процес може мати значні відхилення від загальних стандартів об'єднаних мереж і при цьому згенерована електрична енергія буде корисно споживатися. Звісно такої переваги як універсальність така система буде позбавлена, тому розроблені фотоелектричні електростанції будуть мають суто цільове призначення та не зможуть працювати синхронно в загальних електричних мережах.

Принцип зменшення ступенів перетворення енергії

Відомо, що будь яке перетворення енергії в технологічних системах відбувається з використанням певного обладнання та систем. Також відомо, що будь який технологічних пристрій має коефіцієнт корисної дії менше одиниці та має втрати. Тому велика кількість ступенів перетворення енергії в будь якому разі буде зменшувати загальний ККД системи. Зменшення ступенів трансформації енергії дозволить підвищувати ККД всієї системи.

За принципом зменшення ступенів перетворення енергії зі складу технологічних схем фотоелектричних електростанцій виключається ланка перетворення постійного струму на змінний, а основним споживачем стає двигун постійного струму та інші споживачі постійного струму.

Принцип використання елементів схем за подвійним призначенням

Принцип спрощення технологічних схем передбачає також зменшення кількості вузлів та елементної бази електростанцій, що значно здешевшує кінцевий результат. Тому за цим принципом передбачається, що технологічні елементи схем окрім своєї прямої функції виконують додаткові функції. Наприклад вода окрім свого прямого призначення водопостачання може бути використана як робоче середовище гравітаційних накопичувачів енергії, а опорні конструкції та перепад висот водонапірної вежі може слугувати основною верхнього та нижнього б'єфів гідроакумуючої мікроелектростанції, також опорні конструкції водонапірної вежі можуть використовуватися як основа для монтажу фотоелектричних модулів, тощо.

2.2 Розробка спрощеної технологічної схеми цільової водопостачальної фотоелектричної електростанції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії.

Відомі фотоелектричні електростанції з функцією накопичення виробленої енергії яка реалізована на базі хімічних акумуляторів [42,43,44]. Недоліками таких фотоелектричних електростанцій є:

- висока вартість обладнання яке призначене для зберігання енергії та інтеграції подібної електростанції до загальної електричної мережі яка становить більш ніж половину від загальної вартості фотоелектричної електростанції;
- складність конструкції яка обумовлена тим, що батарея хімічних акумуляторів та система інверторів є складними електротехнічним пристроями та потребують значних експлуатаційних витрат.

Відомі фотоелектричні станції які мають у своєму складі гравітаційні накопичувачі енергії та силові інвертори. [45]. Недоліком таких електростанцій є висока вартість інверторів та додаткова ступінь перетворення параметрів електричної енергії, що знижує їх коефіцієнт корисної дії.

Відомі фотоелектричні станції які мають у своєму складі гравітаційні перетворювачі енергії зі споживачем постійного струму, та стисненим повітрям у якості робочого середовища [46]. Недоліком таких електростанцій є малий коефіцієнт корисної дії внаслідок значних втрат енергії при її перетворенні за рахунок зміни тиску повітря.

Дана технологічна схема покликана вирішити наступні технічні задачі:

- спростити технологічну схему фотоелектричної електростанції з функцією накопичення енергії;
- оптимізувати режим енергоспоживання систем централізованого водопостачання;

- підвищити ефективність роботи силових агрегатів систем централізованого водопостачання;
- розширити галузь використання фотоелектричних електростанцій.

В основу технологічної схеми поставлено задачу удосконалення конструкції комплексу фотоелектричної електростанції, яка має засоби накопичення виробленої електричної енергії.

Поставлена задача вирішується тим, що дана корисна модель містить у своїй конструкції типову водонапірну вежу, водозабір, насос, двигун постійного струму, гідротурбіну, гідрогенератор, систему управління гідроагрегатом. Сукупність вказаних елементів утворюють рідинний гравітаційний накопичувач енергії. Робочим середовищем вказаного накопичувача є вода яка використовується одразу за двома призначеннями:

- за прямим призначенням для водопостачання споживачів.;
- як робоче середовище рідинного гравітаційного накопичувача енергії.

Дана технологічна схема відрізняється від відомих тим, що має суто цільове використання електричної енергії, яка генерується фотоелектричними модулями і витрачається виключно на роботу приводного двигуна постійного струму насоса нагнітача. При цьому двигун постійного струму живиться безпосередньо постійним струмом від фотоелектричних модулів.

Суть корисної моделі технологічної схеми пояснюється кресленням, де на рис. 2.1 зображено конструкцію фотоелектричної станції з гравітаційним рідинним накопичувачем енергії, а на рисунку 2.2 її узагальнену технологічну схему.

Фотоелектрична станція містить фотоелектричні модулі 1, резервуар верхнього б'єфу 2, систему управління генерацією електричної енергії 3, насос 4, приводний двигун постійного струму 5, гідротурбіну 6, синхронний генератор 7, резервуар нижнього б'єфу 8.

Фотоелектричні модулі 1 розташовані на опорних конструкціях водонапірної вежі резервуар якої 2 окрім прямого призначення використовується як резервуар верхнього б'єфу гравітаційного рідинного накопичувача енергії.

Фотоелектричні модулі 1 генерують електричну енергію постійного струму, яка живить двигун постійного струму 5, двигун постійного струму обертає робочий орган насоса нагнітача води 4 який нагнітає воду з резервуару нижнього б'єфу 8 у резервуар верхнього б'єфу 2 та утворює тиск водяного стовпа який дорівнює висоті водонапірної вежі. Під час використання води за прямим призначенням для централізованого водопостачання споживачів від неї відбирається її кінетична енергія руху за допомогою гідротурбіни 6. Дана енергія перетворюється на електричну енергію за допомогою синхронного генератора 7. Регулювання режимів роботи гідротурбіни 6 та генератора 7 відбувається за допомогою відповідної системи управління 3.

Застосування технологічної схеми моделі завдяки спрощеному цільовому використанню фотоелектричних модулів та використанню води як робочого середовища гравітаційного рідинного накопичувача енергії дозволяє значною мірою спростити та здешевити технологічну схему фотоелектричної електростанції з функцією накопичення енергії.

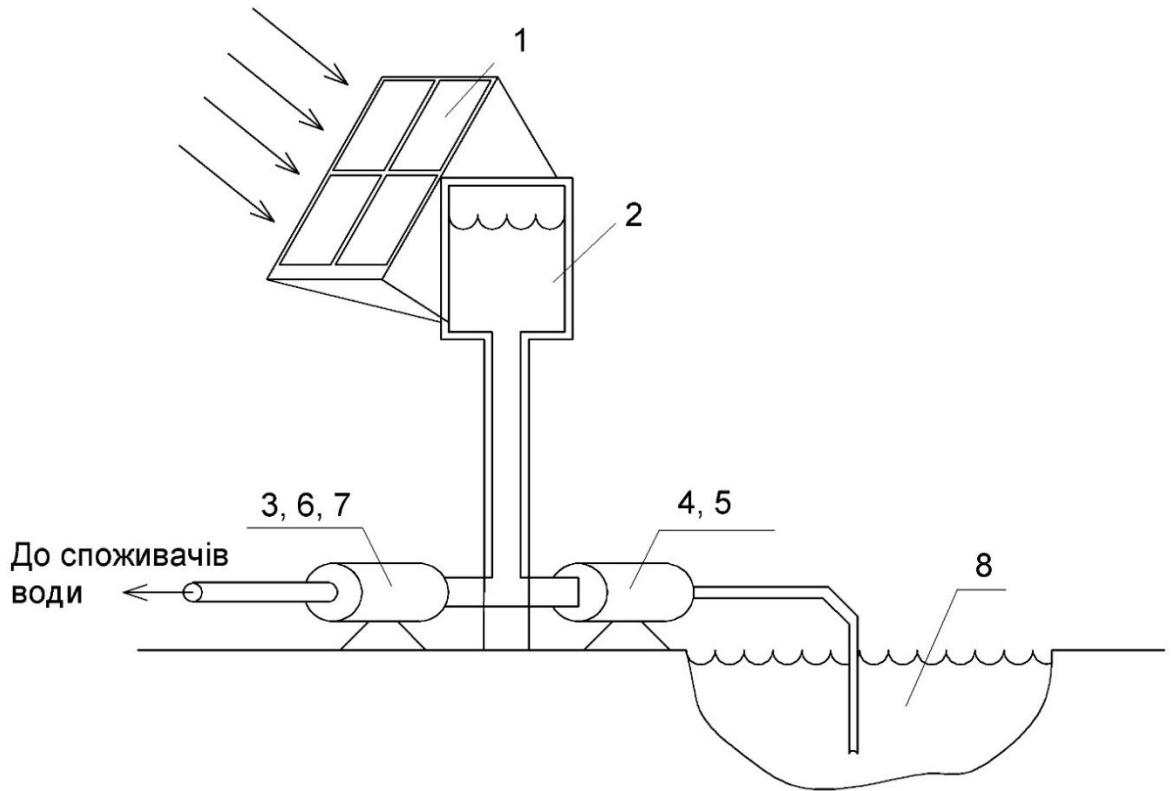


Рис. 2.1 Технологічна схема станції

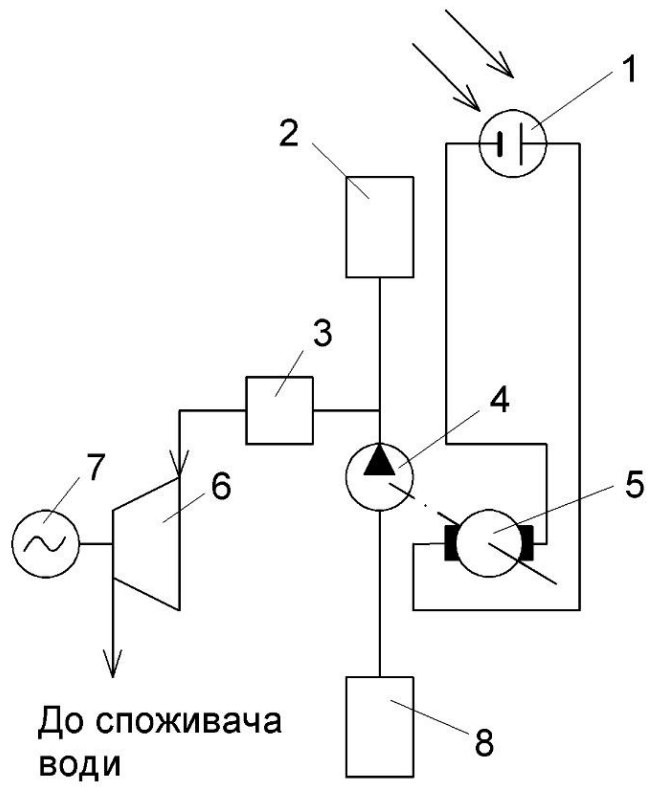


Рис. 2.2 Принципова електрична схема станції

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1 Аналіз вихідних даних на проєктування фотоелектричної електростанції

Вихідні умови на проєктування фотоелектричної електростанції для цільового використання для водопостачання фермерського господарства Харківської області відповідно до технічного завдання наведено в таблиці 2.12

Таблиця 2.12 Вихідні дані на проєктування фотоелектричної електростанції

Показник	Вимога	Од.вим	Кількісний показник
Розташування об'єкту	Харківська обл. Валківський р-н		49.904303, 35.712052
Тип електростанції за видом підключення до зовнішніх та внутрішніх мереж	Цільова, постійного струму	---	---
Бажана встановлена потужність фотоелектричних модулів		кВт	5
Бажана ємність засобів акумулювання енергії	Гравітаційне рідинне накопичення	м ³	50
Бажаний діапазон максимальної генерації електричної енергії	Максимально можливий за погодно-кліматичних умов	год.	10:00 – 15:00
Кліматичні умови району	Харківська область, Валківський р-н		
Бажаний річний обсяг згенерованої електричної енергії	Під власне споживання	кВт*год	5000

Відповідно до план-карти об'єкту та бажаного часу максимального навантаження визначимо максимально можливу кількість панелей фотоелектричних модулів, які розташовуються на землі та на опорних конструкціях водонапірної вежі та орієнтовані на південь. Визначення кількості фотоелектричних модулів відбувається на підставі проєктування їх розміщення по покрівлі об'єкту (рис. 2. 3)

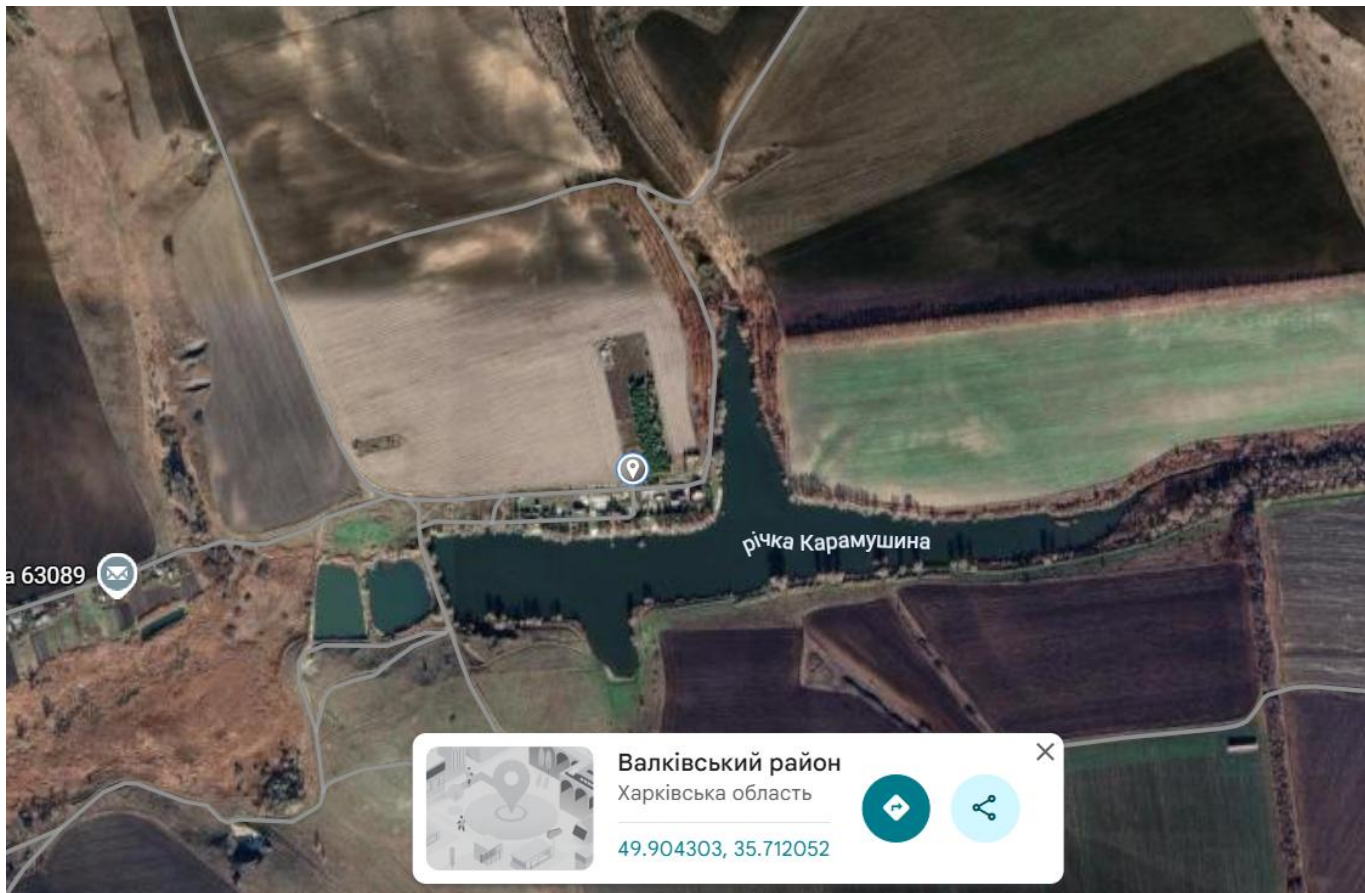
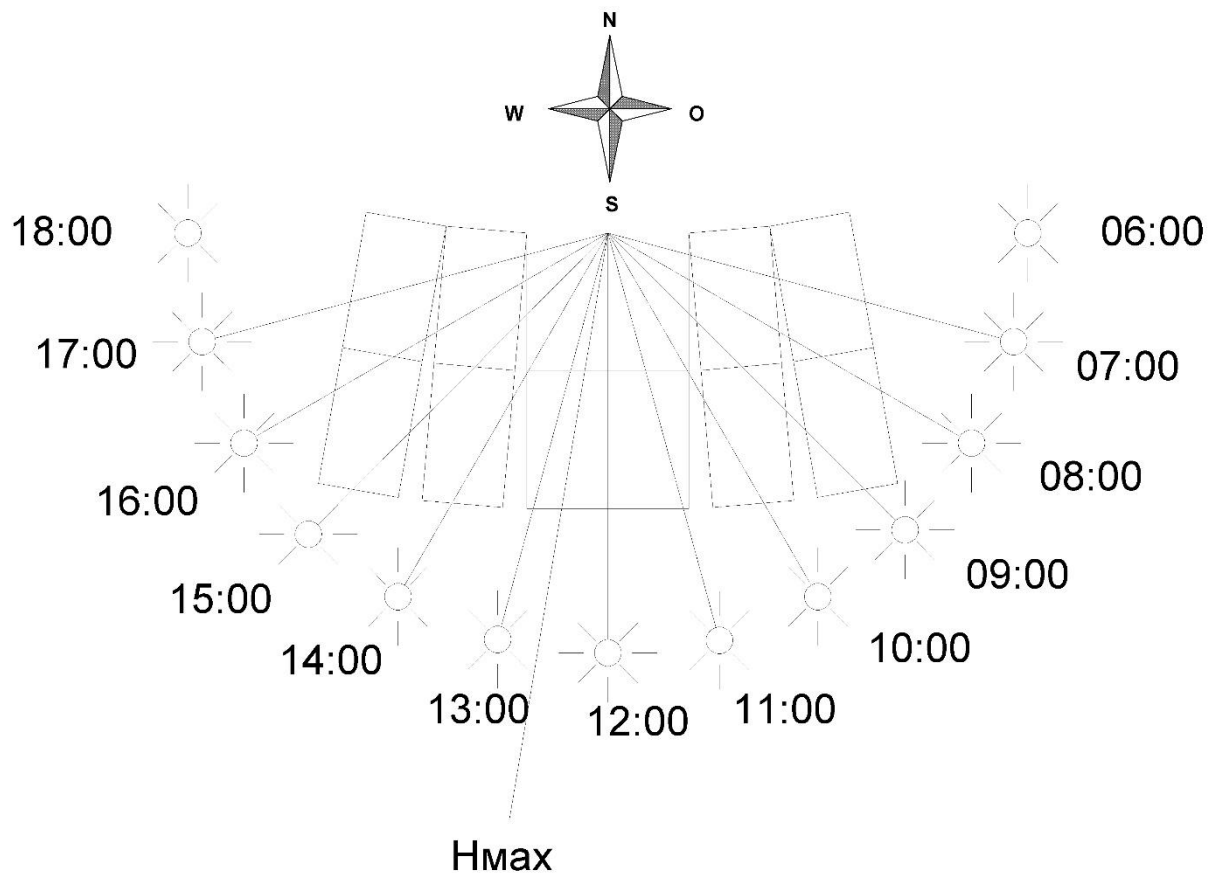


Рис. 2.2 План-карта об'єкту



Дані геолокації
49.904303,
35.712052

Харківська обл,
Валківський р-н

Кількість модулів - 12 ш

Рис. 2.3 План розміщення фотоелектричних модулів на покрівлі об’єкту

Відповідно до плану розміщення фотоелектричних модулів маємо такі базові показники сонячної електростанції (таблиця 2.13)

Таблиця 2.13 Базові показники сонячної електростанції

Показник	Одиниця виміру	Значення
Кількість фотоелектричних модулів	шт.	12
Тип фотоелектричних модулів	---	Монокристалічні
Встановлена потужність	кВт	0,44

одиниці фотоелектричного модулю		
Загальна встановлена потужність електростанції	кВт	5,28

Визначимо очікувану річну генерацію електростанції за формулою:

$$W = P \times H \times PH,$$

де P – сумарна встановлена потужність фотоелектричних модулів, кВт

H – середньорічна сонячна інсоляція у вибраному кліматичному регіоні, кВт*год/м²

PH – коефіцієнт продуктивності роботи електростанції, в.о.

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.4.3.

Таблиця 2.14 Визначення очікуваної річної генерації сонячної фотоелектричної електростанції, яка проєктується

Сумарна встановлена потужність фотоелектричних модулів	Середньорічна сонячна інсоляція	Коефіцієнт продуктивності	Річна генерація електричної енергії СЕС
P	H	PH	W
кВт	кВт*год/м ²	в.о.	кВт*год
5,28	1125	0,8	4752

Визначення елементної бази сонячної електростанції

Перелік основних елементів сонячної електростанції, що проєктується відповідає принциповій технологічній схемі сонячної електростанції (рис. 2.4) та наведено в таблиці 2.14.

Рис. 2.4 Принципова технологічна схема сонячної фотоелектричної електростанції яка проєктується

Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	108 (2×54)
Dimensions	1762×1134×30mm (69.37×44.65×1.18 inch)
Weight	22.0 kg (48.50 lbs)
Front Glass	1.6mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	1.6mm, Heat Strengthened Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm , (-): 200mm or Customized Length

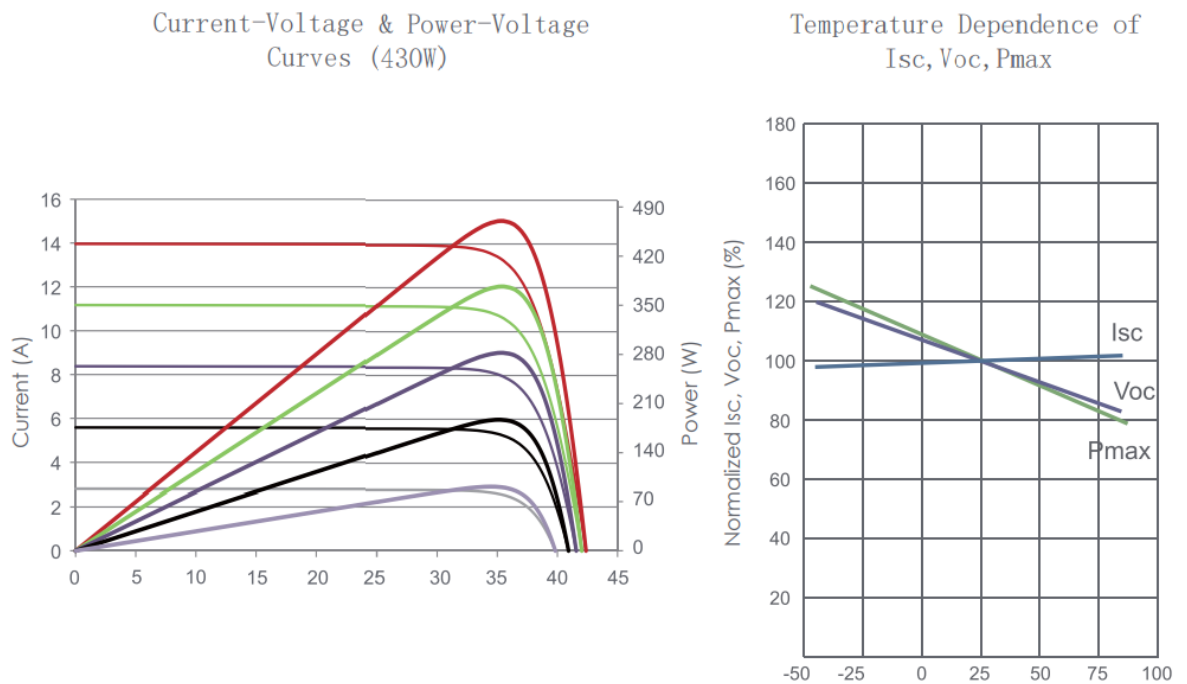


Рис. 2.7 Вольт-амперні та температурні характеристики фотоелектричних модулів

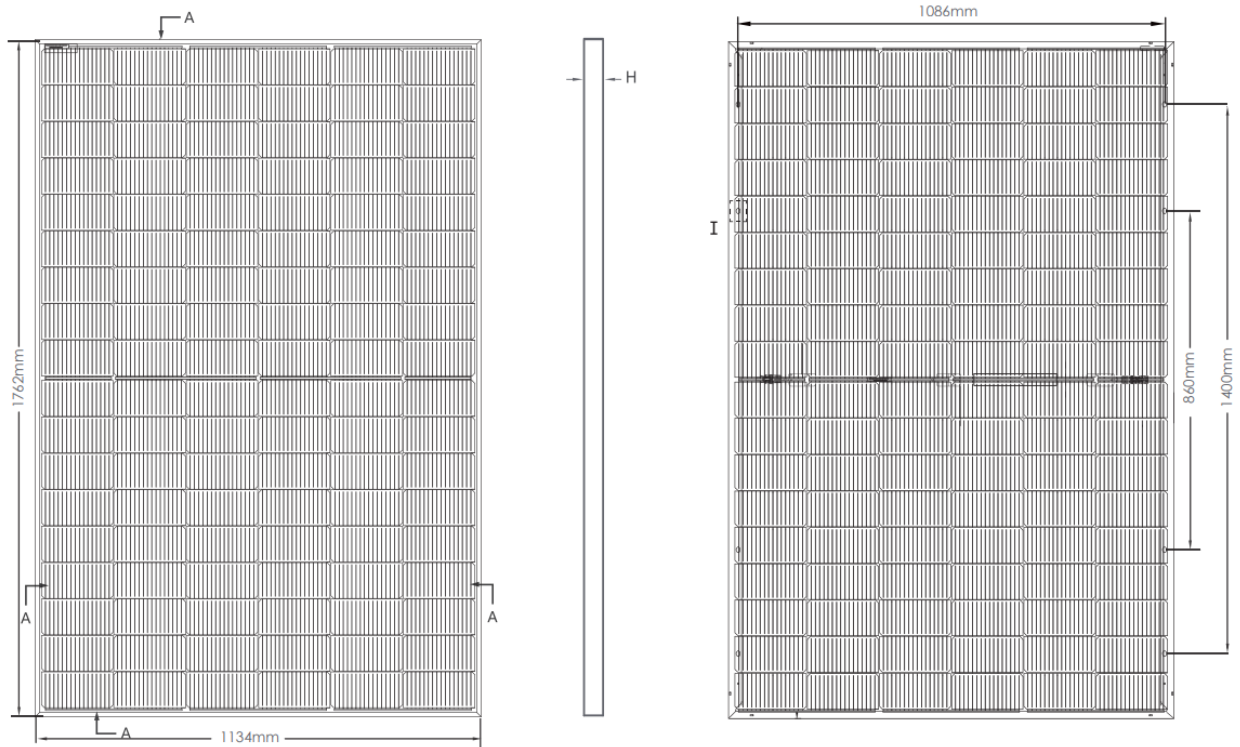


Рис. 2.8 Габаритні та монтажні розміри фотоелектричних модулів

Таблиця 2.16 Технічні характеристики акумуляторних блоків

Item	B4850 Parameter value
Nominal Voltage(V)	48
Work Voltage Range(V)	42~54
Nominal Capacity(Ah)	50
Nominal Energy(kWh)	2.4
Nominal Power(kW)	0.7
Max Power(kW)	2.4
1S Peak Power(kW)	2.64
1S Peak Current(A)	55
Charging Current(A)	25
Discharge Current(A)	25

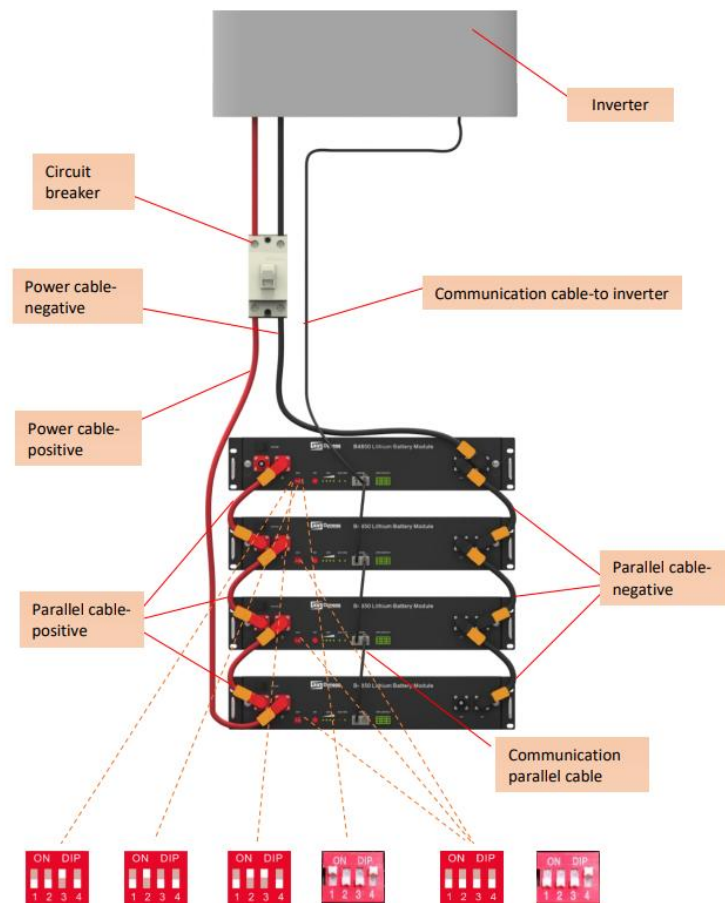
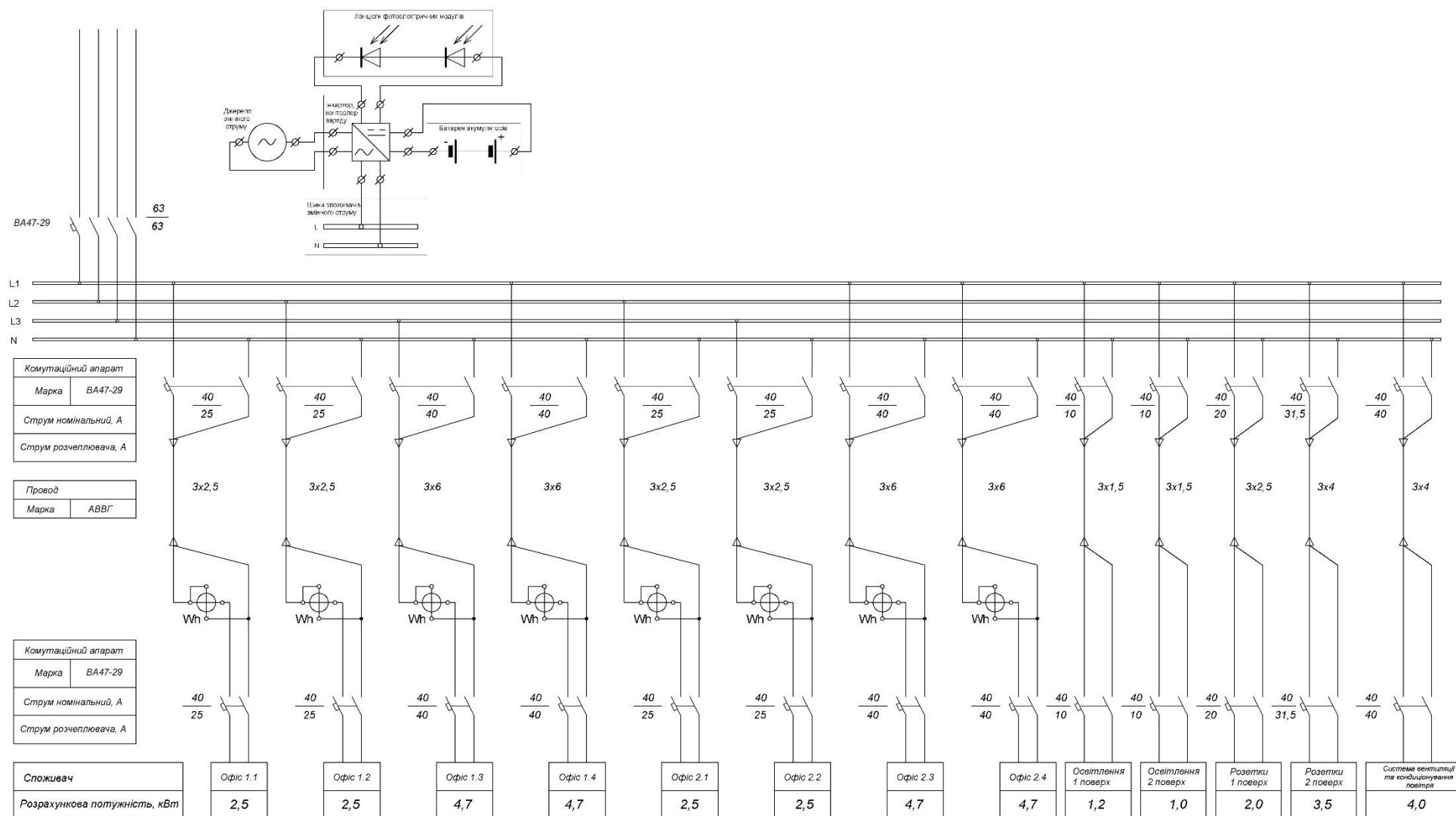


Рис. 2.9 Схема підключення акумуляторних блоків

2.5 Складання принципової однолінійної схеми системи комплексного електропостачання об'єкту

Спроектована однолінійна схема системи комплексного енергозабезпечення представлена на рис.2.10

Схема живлення споживачів – магістральна, резервне живлення забезпечується по фазі L1 від інвертора, який керує режимами роботи фотоелектричних модулів, дизель-генератора та акумуляторних батарей.



Висновки за розділом 2

У другому розділі роботи проведено ескізне проєктування системи комплексного енергозабезпечення офісного центру у м. Харків.

Спроектовано структурну схему системи комплексного енергозабезпечення, проведене проєктування системи електропостачання ліцею з використанням трьох джерел живлення: електрична мережа, фотоелектрична сонячна електростанція та дизель генератор. Проведено проєктування фотоелектричної електростанції. Визначено показники надійності роботи системи розподілу електроенергії .

ВИСНОВКИ

1. Проведено ґрунтовний порівняльний критичний аналізу технологій накопичення енергії гравітаційними акумуляторами. Визначено перспективи розвитку рідинних гравітаційних накопичувачів енергії у системах генерації електричної енергії засобами відновлюваної енергетики (зокрема фотоелектричними електростанціями).

2. Розроблено загальні принципи побудови спрощених цільових технологічних схем фотоелектричних електростанцій з гравітаційними накопичувачами енергії.

3. Розроблено принципову та технологічну схеми цільової фотоелектричної електростанції з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії, яка заснована на використанні води водонапірних веж у якості робочого середовища рідинного гравітаційного накопичувача енергії

4. Визначено основні енергетичні співвідношення розробленого комплексу

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rehman, S.; Al-Hadhrami, L.M.; Alam, M.M. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 44, 586–598.
2. Zhang, X.; Patelli, E.; Zhou, Y.; Chen, D.; Lian, J.; Xu, B. Enhancing the economic efficiency of cross-regional renewable energy trading via optimizing pumped hydro storage capacity. *Renew. Energy* 2025, 240, 122205.
3. Goodenough, J.B.; Park, K.S. The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective. *J. Am. Chem. Soc.* 2013, 135, 1167–1176.
4. Zheng, S.; Teh, J.; Alharbi, B.; Lai, C.-M. A review of equivalent-circuit model, degradation characteristics and economics of Li-ion battery energy storage system for grid applications. *J. Energy Storage* 2024, 101, 113908.
5. Hu, D.; Dai, X.; Li, W.; Zhu, Y.; Zhang, X.; Chen, H.; Zhang, Z. A review of flywheel energy storage rotor materials and structures. *J. Energy Storage* 2023, 74, 109076.
6. Ji, W.; Hong, F.; Zhao, Y.; Liang, L.; Du, H.; Hao, J.; Fang, F.; Liu, J. Applications of flywheel energy storage system on load frequency regulation combined with various power generations: A review. *Renew. Energy* 2024, 223, 119975.
7. Coombs, T.A. 11-High-temperature superconducting magnetic energy storage (SMES) for power grid applications. In *Superconductors in the Power Grid*; Rey, C., Ed.; Woodhead Publishing Series in Energy; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2015; pp. 345–365.
8. Adetokun, B.B.; Oghorada, O.; Abubakar, S.J.A. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. *J. Energy Storage* 2022, 55, 105663.
9. Bhandari, R.; Adhikari, N. A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems. *Int. J. Hydrogen Energy* 2024, 82, 923–951.
10. Kavooosi, A.; Hagh, M.T. Solid gravity energy storage: Pioneering energy storage solution—A review. *J. Energy Storage* 2025, 113, 115691.
11. Tong, W.; Lu, Z.; Chen, W.; Han, M.; Zhao, G.; Wang, X.; Deng, Z. Solid gravity energy storage: A review. *J. Energy Storage* 2022, 53, 105226.

12. Tong, W.; Lu, Z.; Sun, J.; Zhao, G.; Han, M.; Xu, J. Solid gravity energy storage technology: Classification and comparison. *Energy Rep.* 2022, 8 (Suppl. 8), 926–934.
13. Barbour, E.; Pottie, D.L. Adiabatic compressed air energy storage technology. *Joule* 2021, 5, 1914–1920.
14. Luo, X.; Wang, J.; Dooner, M.; Clarke, J.; Krupke, C. Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology. *Energy Procedia* 2014, 62, 603–611.
15. Khan, M.K.; Raza, M.; Shahbaz, M.; Farooq, U.; Akram, M.U. Recent advancement in energy storage technologies and their applications. *J. Energy Storage* 2024, 92, 112112.
16. Elalfy, D.A.; Gouda, E.; Kotb, M.F.; Bureš, V.; Sedhom, B.E. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Rev.* 2024, 24, 101482.
17. Majidi, M.; Rodriguez-Garcia, L.; Mosier, T.M.; Parvania, M. Coordinated operation of pumped-storage hydropower with power and water distribution systems. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2022, 142, 108297.
18. Daneshkar, S.; Yousefi, H. Developing site selection indices for hydro-pumped storage systems (Case study: Tehran Province, Iran). *Energy Storage Sav.* 2025, 4, 27–37.
19. Guo,H.;Cui, J.; Xu, M.; Ge, Y.; Li, D.; Zhao, P. Optimal Capacity Allocation of Combined Output of Tower Gravity Energy Storage Power Station and Wind Farm. In *Proceedings of the 2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*, Shanghai,China, 25–27 August 2022; pp. 23–27.
20. Wu,C.;Lu,S.;Xue,F.; Jiang, L.Earth Potentialasthe Energy Storagein Rail Transit System—Ona Vertical Alignment Optimization Problem. In *Proceedings of the 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA, 4–7 November 2018; pp. 2729–2734.
21. Li, Y.; Ou, Z.; Zhang, Y.; Shen, Y.; Wang, X.; Zhou, S.; Zeng, X.; Zhao, H. Characteristic Analysis of Flux Switching Linear Machine for Gravity Energy Storage System. In *Proceedings of the 2024 The 9th International Conference on*

Power and Renewable Energy (ICPRE), Guangzhou, China, 20–23 September 2024; pp. 1015–1020.

22. Al-Hilfi, L.M.A.; Morris, S.; Fathima, A.P.; Ezra, M. Investigation of Potential Benefits and Challenges of Using Gravity Energy Storage in Residential Sectors. In Proceedings of the 2022 International Virtual Conference on Power Engineering Computing and Control: Developments in Electric Vehicles and Energy Sector for Sustainable Future (PECCON), Chennai, India, 5–6 May 2022; pp. 1–6.

23. Yang, C.; Hou, H.; Xu, T.; Wu, X.; Liu, P.; Wang, H. A New Gravity Energy Storage Operation Mode to Accommodate Renewable Energy. In Proceedings of the 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Macao, China, 1–4 December 2019; pp. 1–5.

24. Energy Vault LLC. Ev. Energy Vault. 2021. Available online: <https://www.energyvault.com/> (accessed on 13 December 2024).

25. Gravitricity LLC. G. Gravitricity. 2021. Available online: <https://gravitricity.com/> (accessed on 13 December 2024).

26. AdvancedRailEnergyStorageLLC, ARES. AdvancedRailEnergyStorage. 2021. Available online: <https://aresnorthamerica.com/> (accessed on 13 December 2024).

27. Suthakorn, J.; Parker, G.G. Anti-Swing Control of Suspended Loads on Shipboard Robotic Cranes. *J. Syst. Cybern. Inform.* 2004, 3, 35–40.

28. Wang, J.; Chu, J.; Liu, X. Anti-Swing Control for Quadrotor with Slung Load Using Integral Backstepping Sliding Mode Controller and Extended State Observer. In Proceedings of the 2024 China Automation Congress (CAC), Qingdao, China, 1–3 November 2024; pp. 6006–6011.

29. Jafari, M.; Alipour, A. Methodologies to mitigate wind-induced vibration of tall buildings: A state-of-the-art review. *J. Build. Eng.* 2021, 33, 101582.

30. Emrani, A.; Berrada, A. Structural behavior and flow characteristics assessment of gravity energy storage system: Modeling and experimental validation. *J. Energy Storage* 2023, 72, 108277.

31. Tong, W.; Lu, Z.; Chen, Y.; Zhao, G.; Hunt, J.D.; Xu, G. Enhancing modular gravity energy storage plants: A hybrid strategy for optimal unit capacity configuration. *Appl. Energy* 2025, 378, 124774.
32. Yan, W.; Yang, H.; Xin, J.; Chen, H.; Sun, X.; Wang, Q. Linear Motor Topology Study and Prospect of Abandoned Mine Type/Mountain Gravity Energy Storage. In *Proceedings of the 2023 4th International Conference on Power Engineering (ICPE)*, Macau, Macao, 11–13 December 2023; pp. 133–138.
33. Wang, Y.; Wang, Y.; Gao, T.; Dong, L. Analysis of Energy Efficiency Characteristics of Gravity Energy Storage System. In *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Electrical Energy Conversion Systems and Control (IEECSC)*, Shanghai, China, 8–10 November 2024; pp. 288–292.
34. Emrani, A.; Berrada, A.; Ameer, A.; Bakhouya, M. Assessment of the round-trip efficiency of gravity energy storage system: Analytical and numerical analysis of energy loss mechanisms. *J. Energy Storage* 2022, 55, 105504.
35. Gao, T.; Zhang, Y.; Dong, L.; Wang, Z.; Zhao, H.; Huang, Y.; Wang, Y.; Wu, G. Sensitivity Analysis on Efficiency Influence Factors of Transmission Chain Slope Gravity Energy Storage System Based on Sobol Method. In *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Electrical Energy Conversion Systems and Control (IEECSC)*, Shanghai, China, 8–10 November 2024; pp. 255–259.
36. Liang, T.; Zhang, X.; Tan, J.; Jing, Y.; Lv, L. Deep reinforcement learning-based optimal scheduling of integrated energy systems for electricity, heat, and hydrogen storage. *Electr. Power Syst. Res.* 2024, 233, 110480.
37. Leng, D.; Polmai, S. Virtual Synchronous Generator Based on Hybrid Energy Storage System for PV Power Fluctuation Mitigation. *Appl. Sci.* 2019, 9, 5099.
38. Li, Y.; Yu, C.; Shahidehpour, M.; Yang, T.; Zeng, Z.; Chai, T. Deep Reinforcement Learning for Smart Grid Operations: Algorithms, Applications, and Prospects. *Proc. IEEE* 2023, 111, 1055–1096.
39. Askarov, A.; Rudnik, V.; Ruban, N.; Radko, P.; Ilyushin, P.; Suvorov, A. Enhanced Virtual Synchronous Generator with Angular Frequency Deviation

Feedforward and Energy Recovery Control for Energy Storage System. Mathematics 2024, 12, 2691.

40. Roushenas, R.; Rahbari, H.R.; Alsagri, A.S.; Arabkoohsar, A. Improved marketing strategy of a hybrid renewable plant integrated with gravitational energy storage: Techno-economic analysis and multi-objective optimization. J. Energy Storage 2024, 78, 109991.

41. Berrada, A.; Loudiyi, K.; Zorkani, I. Dynamic modeling and design considerations for gravity energy storage. J. Clean. Prod. 2017, 159, 336–345.

42. Гнатов А.В., Аргун Щ.В. Аналіз схем сонячних електростанцій на фотоелектричних модулях для зарядних станцій електромобілів., Автомобільний транспорт, вип. 41, 2017 С.163-169

43. Чернюк А.М., Кирисов І.Г., Сук І.В., Карлова О.М., Білоус І.О. Аналіз технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Енергетика, Том 30 (69) Ч. 2 № 4 2019, С. 33 – 41

44. Яковчук П. Є., Цяпа В. Б., Комаров В. І., Національний університет «Львівська політехніка», Сонячна енергетика [Електр.ресурс] – Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/30762/1/35.pdf>

45. Asmae Berrada, Khalid Loudiyi Gravity Energy Storage, Elsevier, 2019, 186 p.

46. Чернюк А.М., Олійник Ю.С., Качанов Є.І., Пальваль Д.Г. Фотоелектрична станція з пневмогравітаційним накопичувачем енергії. Патент на корисну модель МПК H01F 30/12, 13.11.2024, Бюл.№ 46