

АНАЛІЗ ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ІЗ ЗАМКНУТИМ ЦИКЛОМ ВИКОРИСТАННЯ РОБОЧОГО ТІЛА

Отримано 25 січ. 2024 р.; рекомендовано до публікації 22 бер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 квіт. 2024 р.

Головко В. М.¹, Семененко Р. Ю.²

Автор для кореспонденції: Головко Володимир,
e-mail: golovkovm@ukr.net

¹ д-р техн. наук, проф.

<https://orcid.org/0000-0003-0195-9654>

² асп.

<https://orcid.org/0000-0003-4737-7836>

¹ Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна

^{1,2} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена розгляду конструктивних особливостей гідроакумулювальних електростанцій із замкнутим циклом використання робочого тіла, а також інших гравітаційних акумуляторів енергії для забезпечення накопичення енергії від відновлюваних джерел енергії шляхом порівняльного аналізу. Задачі підбору раціонального способу акумулювання електроенергії від вітро- та фотоелектростанцій вимагають комплексного підходу з урахуванням усіх особливостей відновлюваних джерел енергії. Збільшувальна встановлена потужність фото- та вітроелектростанцій пов'язана з необхідністю розв'язку проблеми нестабільності генерації електричної енергії в часі. Аналіз різних технологій зберігання, зокрема гравітаційні акумулятори, гідроакумулювальні електростанції підземного та морського типів, теплове зберігання, підтверджує що гідроакумулювальна електростанція із замкнутим циклом використання робочого тіла є ефективним накопичувачем енергії для автономних енергетичних систем відновлюваної енергетики. Проведений порівняльний аналіз гідроакумулювальних систем із замкнутим циклом робочого тіла показав, що станції такого типу, порівняно з класичними, потребують меншої кількості робочого тіла для забезпечення тієї самої потужності завдяки тому, що створюється більший напір, до 600 м, і що зовнішнє джерело води необхідне лише для покриття втрат системи. Також встановлено зменшення екологічних впливів, оскільки для установки потрібні менші території відчуження, а можливість використання тунелів і підземних станцій мінімізує вплив на довкілля. Визначена кількість потенційних місць для встановлення гідроакумулювальних електростанцій закритого типу – понад 615 тис. по всьому світу із сумарним потенціалом акумулювання 23,1 млн ГВт-год.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, автономна гідроакумулювальна електростанція, гравітаційна електростанція, замкнутий цикл використання робочого тіла, вітроелектростанція, фотоелектростанція.

ANALYSIS OF THE CLOSED-CYCLE PUMPED-STORAGE HYDROELECTRIC POWER STATIONS

Received Jan. 25, 2024; accepted Mar. 22, 2024
Available online Apr. 01, 2024

Golovko V.¹, Semenenko R.²

Author for correspondence: Golovko Volodymyr,
e-mail: golovkovm@ukr.net

¹ Dr. of Tech. Sciences, professor.

<https://orcid.org/0000-0003-0195-9654>

² Graduate Student.

<https://orcid.org/0000-0003-4737-7836>

¹ Institute of Renewable Energy NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

^{1,2} National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Abstract. This paper examines the consideration of the design features of closed-cycle pumped-storage hydroelectric power stations, as well as other gravitational energy accumulators to ensure the accumulation of energy from renewable energy sources by means of a comparative analysis. The tasks of

research are a rational way of accumulating electricity from wind and solar power plants require a comprehensive approach, taking into account all the features of renewable energy sources. The growing installed capacity of photo and wind power plants is associated with the need to solve the problem of instability of electric power generation over time. The analysis of various storage technologies, including gravity accumulators, hydroaccumulating power plants of underground and marine types, thermal storage, emphasizes that the closed-cycle pumped-storage hydroelectric power stations is an effective energy accumulator for autonomous energy systems of renewable energy. A comparative analysis of closed-cycle pumped-storage hydroelectric power stations showed that stations of this type, in comparison with classic ones, require a smaller amount of working fluid to ensure the same power, which is achieved due to the creation of a higher head up to 600m and the fact that the external source of water needed only to cover system losses. The reduction of environmental impacts is also established, as the installation requires a smaller size of exclusion areas, and the possibility of using tunnels and underground stations minimizes the impact on the environment. It was established that the number of potential places for the installation of closed-cycle pumped-storage hydroelectric power stations is over 615,000 around the world with a total accumulation potential of 23.1 million GWh.

Keywords: renewable energy sources, autonomous pumped storage power plant, gravity power plant, closed cycle of working fluid, wind power plant, solar power plant.

Вступ. Очікується, що в найближчому майбутньому частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичному світовому секторі дедалі збільшуватиметься. Зважаючи на це, гідроакмулювальні електростанції (ГАЕС) є перспективним напрямом для розвитку, адже їх інтеграція в електричні мережі дозволить стабілізувати стохастичне енергонадходження від фото- та вітроелектростанцій (ФЕС та ВЕС), що набувають популярності. ФЕС та ВЕС зараз є найчастіше встановлюваними електростанціями у світі [1]. Встановлена потужність вітроелектростанцій збільшилася з 733 ГВт у 2020 році до 898 ГВт у 2022-му (+22,5 %), сонячних електростанцій, відповідно з 842 ГВт до 1061 ГВт (+26 %). Однак масове їх впровадження потребує вирішення проблеми непостійності та неточності прогнозування генерації електричної енергії. В [2] запропоновано «гібридну модель довгострокової короткочасної пам'яті» (англ. Long Short-Term Memory – LSTM) для вихрової нейронної мережі (англ. Convolutional Neural Network – CNN), що використовувалася для точного прогнозування виробництва електроенергії фотоелектричними системами. Модель спочатку класифікувала погодні умови за допомогою CNN, а потім вивчала закономірності виробництва електроенергії за допомогою LSTM та надавала свій прогноз. Середня абсолютна відсоткова похибка запропонованої моделі становила 4,58 % у сонячні дні та 7,06 % у хмарні дні, що вказує на можливість точного прогнозування виробництва електроенергії та оптимізації роботи ФЕС [2]. Для порівняння [3] у 2017 році проведено аналіз тогочасних моделей та встановлено, що найкраща з них забезпечувала абсолютну відсоткову похибку прогнозування виробництва енергії на рівні 10...14 % для місячних проміжків та до 35 % для денних інтервалів. Однак висока точність прогнозування все одно не вирішує проблему розходження між графіком споживання та графіком генерації електричної енергії. Дослідження на світовому рівні [4, 5] підтверджують, що акумулювання енергії буде ключовим елементом управління майбутньою мережею з високим відсотком генерації від нестабільних ВДЕ. Серед технологій зберігання в цих дослідженнях

розглядаються хімічні акумулятори електроенергії, виробництво газу (водень або метан), стисненого газу (повітря), теплове зберігання та різноманітні гравітаційні акумулятори енергії, найпоширенішою з яких є ГАЕС [6]. До того ж, з урахуванням інвестиційних витрат, технологія ГАЕС є найефективнішим накопичувачем енергії для автономних енергетичних систем [4].

У світлі зростаючого попиту на ВДЕ з усіма описаними вище їх особливостями існує потреба дослідити життєздатні рішення для зберігання енергії, щоб забезпечити надійне та послідовне електропостачання. Одним з рішень, яке привернуло увагу останніми роками, є концепція накопичення електроенергії завдяки перетворенню її на потенційну енергію води шляхом перекачування її з однієї ємності у іншу, яка розташована на більшій висоті. Основною відмінністю запропонованого рішення від класичної ГАЕС, є те що тепер система стає автономною та майже не залежить від річок чи озер, адже їх вплив на гідрограф мінімальний. Замикання гідравлічного кола може дозволити розширити можливості ГАЕС та зменшити вплив на довкілля, адже використання зовнішнього джерела води для таких систем необхідне лише для покривання втрат системи на випаровування та негерметичність вузлів.

Постановка завдання. Мета досліджень полягає в проведенні розгляду конструктивних особливостей гідроакмулювальних електростанцій із замкнутим циклом використання робочого тіла шляхом порівняльного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Дослідження теми акумулювання електроенергії шляхом використання замкнутих гідроакмулювальних установок є пріоритетним завданням у відновлювальній енергетиці. Це особливо важливо в сучасних системах з ФЕС та ВЕС, де стохастичний та нестабільний характер генерації потужності [7, 8] потребує зберігання та накопичення енергії. Тема дослідження залишається актуальною в сучасних умовах з огляду на кілька ключових аспектів:

- Ефективність та стійкість до змін попиту на енергію. Збільшення обсягу виробництва та накопичування електроенергії за допомогою ГАЕС стає надзвичайно важливим у контексті росту споживання енергії та необхідності забезпечення стабільного постачання електроенергії споживачам.
- Екологічна придатність. ГАЕС з замкнутим циклом працюють за принципом закритого гідравлічного контуру, що означає, що вони використовують фіксований об'єм води без залучення стороннього джерела води, а отже без значних негативних впливів на навколишнє середовище [9].
- Акумулятори енергії для відновлювальних джерел. ГАЕС із замкнутим циклом використання робочого тіла можуть акумулювати енергію, яка виробляється за допомогою відновлювальних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія. Це дозволяє компенсувати непостійність генерації енергії від цих джерел та забезпечує більшу стійкість енергетичної системи.
- Розвиток технології. Додавання нового енергетичного вузла – гідравлічного тарана – дає змогу ефективно піднімати воду на розрахункові висоти без необхідності використання зовнішніх джерел енергії та за рахунок використання залишкової енергії води, скинутої гідротурбіною, підняти загальну енергетичну ефективність системи.
- Гнучкість в управлінні електроенергією. ГАЕС можуть бути використані для забезпечення гнучкості в управлінні електроенергією, що дозволяє вирівняти піки попиту та забезпечувати стабільність в енергетичних системах.

ГАЕС є установкою для зберігання потенційної енергії робочого тіла – води. Система включає два резервуари для енергоносія на різних рівнях висоти, з'єднані трубами або тунелями. При генерації електроенергії в електричну мережу вода тече з верхнього резервуару до нижнього по трубах або тунелях через турбіну, з'єднану з генератором, так само, як і в традиційних гідроелектростанціях. Однак у разі надлишку електроенергії від іншого джерела (наприклад, сонячне випромінювання або вітер) вода перекачується з нижнього резервуару до верхнього за допомогою електричних насосів. Насос може бути окремим пристроєм або, як часто буває, використовується один агрегат турбіна-насос, що обертається в два напрямки та може працювати і як насос, і як турбіна.

Резервуари, які використовуються в ГАЕС з замкнутим циклом використання робочого тіла, є відносно невеликими порівняно з традиційними гідроелектростанціями подібної потужності. Крім того, періоди генерації електроенергії можуть бути неперервними протягом усього дня. Розглянемо деякі публікації пов'язані з ГАЕС із замкнутим циклом використання робочого тіла. Ключові моменти занесено до табл. 1.

Таблиця 1. Оглядові статті про гідроаккумуляційні електроустановки з замкнутим циклом використання робочого тіла в різних аспектах

Джерело	Назва джерела	Що було виявлено в результаті дослідження
[8]	Global Atlas of Closed-Loop Pumped Hydro Energy Storage	- Обчислено потенціал ГАЕС із замкнутим циклом (дал – установок) використання робочого тіла - Дослідження визначило потенційні місця для розташування таких установок. Це близько 616818 по всьому світу із сумарним потенціалом зберігання 23,1 млн ГВт-год - Встановлено зменшення екологічних наслідків у порівнянні з класичними ГАЕС: установка потребує менше територій, а використання тунелів і підземних станцій, мінімізує вплив на поверхню; зменшений водозабір із річок - Установки мають переваги перед традиційними схемами, оскільки дозволяють встановити верхній резервуар на вершині пагорба, збільшуючи напір і потенційну енергію
[9]	A Comparison of the Environmental Effects of Open-Loop and Closed-Loop Pumped Storage Hydro-power	- Звіт містить порівняння екологічних впливів традиційних (відкритих) ГАЕС та ГАЕС із замкнутим циклом використання робочого тіла - У звіті робиться висновок, що ГАЕС із замкнутим контуром зазвичай має менший і більш локалізований вплив на навколишнє середовище - Певні конструкції ГАЕС замкнутого циклу можуть впливати на ґрунтові води, що потребує розгляду в екологічних експертизах
[10]	Efficiency analysis of underground pumped storage hydropower plants	- Дослідження присвячене акумулюванню енергії від джерел ВДЕ за допомогою підземних ГАЕС - Використано два насоси-турбіни типу Френсіс для циркуляції води між резервуарами в обох напрямках - Аналітичні моделі та тривимірне моделювання показують, що, на відміну від звичайних систем, на енергоефективність ГАЕС із замкнутим циклом у зворотному напрямку впливає тиск у підземному резервуарі

Джерело	Назва джерела	Що було виявлено в результаті дослідження
[11]	Comparing Subsurface Energy Storage Systems: Underground Pumped Storage Hydropower, Compressed Air Energy Storage and Suspended Weight Gravity Energy Storage	- У дослідженні порівнюються підземні гідроакумулювальні електростанції, накопичувачі енергії на стисненому повітрі й підвишені гравітаційні накопичувачі енергії у підземному просторі, наприклад у покинутих шахтних тунелях - Розглянуто підземний резервуар води об'ємом $0,5 \times 10^6 \text{ м}^3$ і чистий напір 600 м для ГАЕС, $0,25 \times 10^6 \text{ м}^3$ для резервуару зі стисненим повітрям, а також 3000 т підвищеної маси та 600 м глибини для гравітаційного акумулятора. В результаті за одних і тих же умов накопичення енергії за цикл становило 717, 880 і 3,8 МВт-год відповідно
[12]	Гідроударна система опалення без споживання енергії від зовнішніх джерел	- Розглянуто замкнуту систему опалення, де нагрівання та транспортування нагрітої води до споживачів здійснюється за рахунок енергії, що виділяється під час кавітації та гідроудару - Модифікований гідроциліндр споживає значну кількість води, яка не використовується для опалення, що робить його придатним насамперед для великих відкритих водойм - У статті досліджується можливість застосування модифікованого гідроциліндра в закритій системі опалення, повністю виключаючи втрати води
[13]	Modelling a pumped storagepower plant on the example of the Porąbka Żar power plant	- Представлено математичну модель роботи ГАЕС закритого типу. Модель розроблено в інтерфейсі Matlab – Simulink - Досліджено її роботу в поєднанні з ВЕС та ФЕС на основі критеріїв енергетичного балансу, ефективності, економічного балансу - Створено модель прогнозу для значень споживання електроенергії, яка базується на простій нейронній мережі прямого зв'язку

ГАЕС спочатку розроблялися для компенсації небалансів між споживанням електроенергії та генерацією від інертних ТЕС та АЕС: енергія використовувалася для перекачування води, коли попит на електроенергію був низьким вночі, а потім вода вивільнялася для виробництва електроенергії протягом дня. Отже, ГАЕС на даний момент є найбільшим джерелом акумулювання електроенергії з понад 95 % світової встановленої потужності накопичувачів електроенергії (ГВт) і 99 % об'єму накопичуваної енергії (ГВт-год). Незважаючи на це, багато досліджень присвячено відновлюваній енергетиці в майбутніх електричних системах без гідроакумулювальних електроустановок [5]. Значні вимоги до рельєфу звичайних ГАЕС та екологічний вплив на довкілля наводяться як аргумент для переходу на інші технології зберігання, зокрема хімічні акумулятори та водень.

ГАЕС із замкнутим циклом використання робочого тіла та його «позарічкове» (off-river) гідронасосне обладнання може надати новий погляд цій технології (рис. 1). Верхній резервуар для цих схем може бути розташований високо в гірських районах, а не в річковій долині. В мікроустановках це може бути будь-яка штучно створена водойма. Схеми із замкнутим циклом використовують воду, яка під час роботи циркулює між верхнім і нижнім резервуарами. Незначне зовнішнє джерело води потрібно лише для компенсації різниці між випаровуванням, витоками та опадами. Резервуари також зазвичай є невеликими, близько десятків або сотень гектарів. Розташування верхніх резервуарів на значній відстані від рік значно зменшує екологічний вплив. Це також мінімізує необхідність управління великими повеннями, як це робиться на більшості сучасних ГАЕС, що суттєво знижує вартість будівництва. Оскільки більшість поверхні суходолу світу не розташована біля річок,

є значно більше потенційних областей для облаштування позарічкових ГАЕС замкнутого типу на відміну від річкових. Виявлено близько 616 818 можливих місць встановлення низькозатратних ГАЕС «позарічкового» типу з загальною потужністю 23,1 млн ГВт-год [10].

Потенційна енергія води є найбільш використовуваним гравітаційним акумулятором енергії. Проте як енергоносії також можуть використовуватися інші рідини, тверді речовини та навіть газ. Нижче наведено результати аналізу основних технологій, які дозволяють акумулювати енергію (рис. 2).

А. ГАЕС з поверхневим резервуаром. Стандартний гравітаційний акумулятор – це ГАЕС, що використовує пару верхніх-нижніх резервуарів, обидва на поверхні землі. Існуючі ГЕС можуть бути переобладнані в ГАЕС шляхом додавання насосного обладнання. Водосховища роблять за допомогою побудови дамби або з використанням природного рельєфу.

Основною перевагою цієї конструкції є її значна потужність (20–500 МВт), мінімальний вплив на підземні води та відносна примітивність конструкції. Основним недоліком є її залежність від режиму роботи річки та значний екологічний вплив на водне середовище річки. Вплив на якість поверхневих вод під час будівництва зазвичай є відносно вищим для проєктів з відкритим контуром, ніж для проєктів із закритим циклом, що використовують поверхневі води, оскільки будівництво проєкту потребує перегородження природних водних об'єктів, щоб створити нижній резервуар (замість будівництва штучного нижнього резервуара, як із замкнутим циклом). Така споруда дамби може затопити велику територію землі та негативно вплинути на якість води в ґрунтових водах [11].

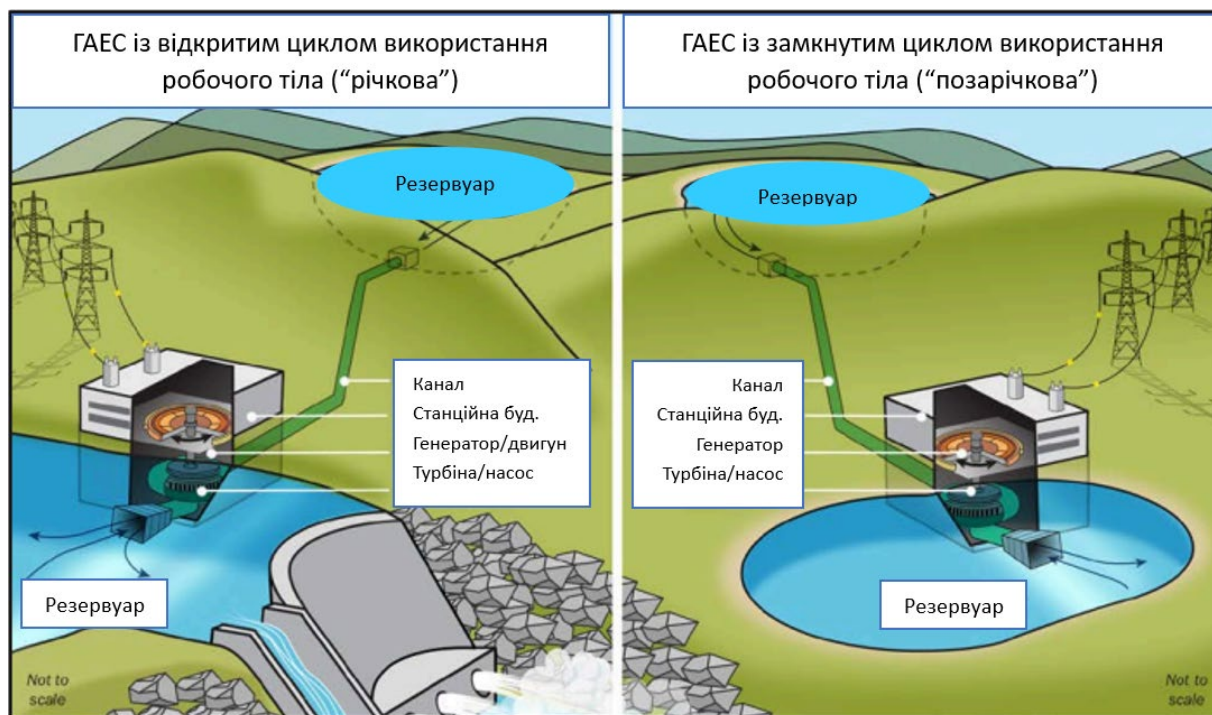


Рис. 1. Структурна схема ГАЕС із відкритим та закритим циклом використання робочого тіла [11]

Fig.1. Structural diagram of the open and closed pumped storage power plant [11]

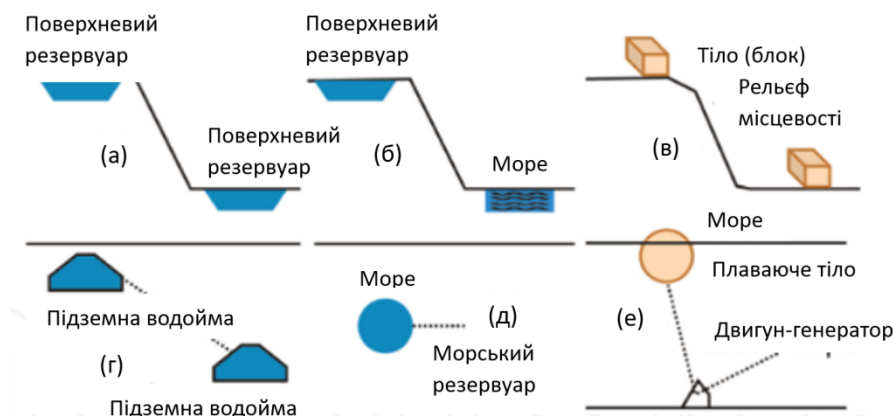


Рис. 2. Топології гравітаційних систем акумулювання енергії I [16]

Fig. 2. Topologies of gravitational energy storage systems I [16]

Б. Морська ГАЕС. З 1999 року в Японії пропонується використовувати верхній поверхневий резервуар і море як нижній резервуар, щоб уникнути проблеми землекористування та бути поблизу центрів електричного споживання. Однак знайти приморську скелю з відповідним напором поблизу крупних електроспоживачів є складною інженерною задачею. Крім того, таке рішення є проблематичним через сольову корозію обладнання. А при застосуванні матеріалів, стійких до корозії, втрачається рентабельність технології. В Австралії дослідники дійшли висновку, що встановлення опріснювальної установки для забезпечення системи прісною водою набагато дешевше, ніж використання корозійностійких матеріалів або використання обладнання для активного захисту від корозії [17].

В Японії на острові Окінава у 1999 році було реалізовано успішний проект такої станції (рис. 3). При віддаленості від берега близько 600 м та розрахунковому напорі 152 м вона розвиває потужність 31,4 кВт. Для протидії корозії була використана антикорозійна фарба для статичних елементів із вуглецевої сталі, а обертові елементи були виготовлені з антикорозійної сталі. Для протидії корозії при пошкодженні фарби на станції застосовано катодний захист [18]. Однак недоліком такого способу є зростання втрат системи в міру її експлуатації, адже що довше система працює, то більших пошкоджень покриттів зазнає. Враховуючи географічні особливості Японії та успіх проекту позарічкової ГАЕС, з того часу тут було детально досліджено та оцінено потенціал морських ГАЕС на рівні 55 000 ГВт [19], а основним джерелом енергії для них слугуватимуть офшорні ВЕС та ФЕС.



Рис. 3. Вид з висоти пташиного польоту на гідроакмулювальну електростанцію з морською водою, Окінава, Японія. Восьмикутна форма показує верхню дамбу. Море — нижня водойма. Вихідний отвір хвостової частини оточений тетраподами для захисту від хвиль [18]

Fig. 3. Aerial view of a seawater pumped-storage hydro station, Okinawa, Japan. The octagonal shape shows the upper dam. The sea is a lower reservoir. The outlet of the station is surrounded by tetrapods to protect against waves [18]

Виходячи з діаграми споживання-генерація (рис. 4) основна ставка у балансуванні джерел ВДЕ покладена на морські ГАЕС. Варто зауважити, що морські ГАЕС подібно до материкових ГАЕС закритого типу мають мінімальний вплив на навколишнє водне середовище та значно більше потенційних місць для їх побудови.

В. Гравітаційний накопичувач енергії з використанням твердого тіла. Замість використання води для передачі енергії, як потенційного носія енергії, можуть бути запропоновано важкі тверді блоки. Оскільки густина землі або бетону майже втричі більша, ніж густина води, такі блоки несуть більшу густину енергії (рис. 5). У США компанія Асотрану почала тестування вдосконаленої залізничної системи зберігання енергії, яка використовує спеціальні рейки для переміщення багатотонних блоків угору для

накопичення енергії [20]. Система може видавати 10 МВт потужності під час руху вниз. При цьому швидкість опускання блока сягає 20 м/с. Згідно з примітками компанії, очікувана вартість електроенергії становитиме 1200 дол./кВт порівняно з 600–8000 дол./кВт для ГАЕС. Ризики для таких систем відносно добре вивчені та розглянуті під час експлуатації надземного демонстратора потужністю 250 кВт протягом 2021 року. Деякі з ключових технічних ризиків пов'язані з великими масами, необхідними для зберігання достатньої кількості енергії. Інтеграція систем у шахтні вертикальні тунелі несе в собі певні ризики, пов'язані з доступом людини до шахт. Але сучасні можливості повної автоматизації дозволяють мінімізувати необхідний доступ людини до шахти.

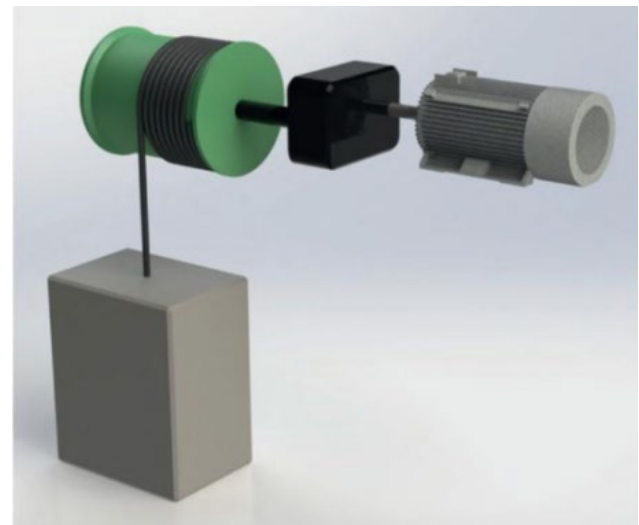


Рис. 5. Схема основних елементів гравітаційного накопичувача енергії з використанням твердого тіла: підвішений вантаж (сірий), підйомний трос (вугільний), барабан лебідки (зелений), редуктор (чорний) і двигун-генератор (сірий) [21]

Fig. 5. Diagram of the main elements of a gravity energy storage using a solid body: suspended load (grey), lifting cable (charcoal), winch drum (green), gearbox (black) and motor-generator (grey) [21]

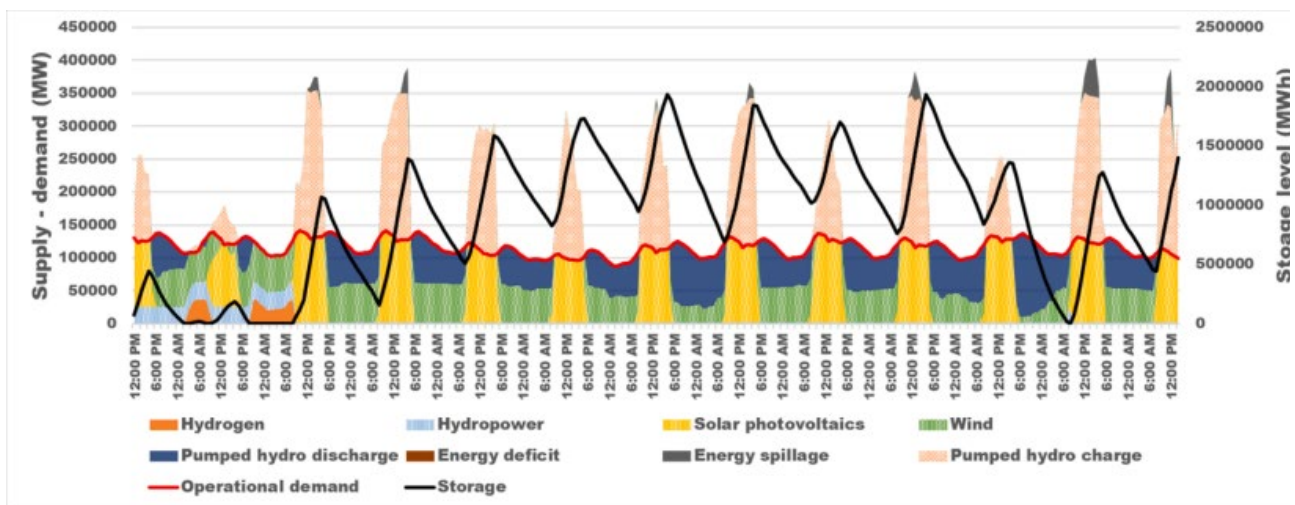


Рис. 4. Профілі погодинного навантаження та генерації протягом типових періодів для загальної енергосистеми Японії [18]

Fig. 4. Profiles of hourly load and aeneration duringa typical periods for the aeneral power svstem of Japan [18]

Інша компанія запропонувала використання великого циліндра, встановленого в земній товщі, в який занурено поршень для зберігання енергії [22, 23]. Вода закачується в циліндр за допомогою насоса, при цьому на товщу води тисне важкий поршень. Під час періодів зростання попиту на енергію стиснена поршнем вода прокачується через гідротурбину для генерації електроенергії. Вартість енергії прогнозується на рівні 120–380 дол./кВт-год.

Г. ГАЕС з підземним резервуаром. Патент на підземне зберігання енергії належить Р. А. Фессендену, який першим записав ідею «розташувати нижній резервуар не на поверхні землі, а під землею, щоб мати високий негативний гравітаційний потенціал» [24]. На сьогоднішній день діючих станцій такого типу не збудовано, але існує кілька дослідницьких проєктів по всьому світу, спрямованих на переоцінку покинутих кар'єрів або шахт. На початку 1980-х років було проведено попереднє геологічне дослідження, щоб знайти підходящу ділянку в Нідерландах, орієнтуючись на вапнякову скелю Південного Лімберга з резервуаром на глибині приблизно 1000 м [25]. В іншому дослідницькому проєкті у Сінгапурі гранітний кар'єр Bukit Timah було оцінено як нижній резервуар для підземної ГАЕС потужністю 370 МВт, який визнали економічно порівнянним з заводом, що працює на нафті на той час [26].

У межах установки підземної ГАЕС не всі типи ґрунту мають відповідні характеристики. М'які відкладення та крихкі породи не можуть протистояти ерозії, спричиненій циклами генерування-накачування установок підземних ГАЕС, тому пористі породи непридатні як резервуари для підземних вод [27]. А от вугільні та металодобувні шахти, такі як кар'єри сланцю та чорного мармуру, можуть бути взяті до уваги з огляду на стійкість породи. Взаємодія підземних вод і коливання в п'єзометричних напорах під впливом гідравлічної провідності навколишнього водоносного горизонту можливі, але обмежені [28], оскільки зміна напору значною мірою залежить від швидкості потоку, що викачується з або закачується в порожнину. Pujades E. та ін. позитивно оцінили обмін ґрунтових вод, оскільки вони пом'якшують зміну напору внаслідок регулярної роботи турбомашин [29]. Середній час роботи шахти становить не більше 50–100 років, після чого виробництво починає скорочуватися аж до повного закриття. Сьогодні в світі залишилася дуже велика кількість покинутих шахт і кар'єрів. Нове використання цих підземних порожнин може стати шансом для посилення потужності зберігання енергії. Структурна схема подібної установки наведена на рис. 6. У ній вода з галерей шахти, об'єднаних основним стовбуром, перекачується насосом до верхнього резервуару; потім відбувається зворотний процес, коли вода з верхнього резервуару повертається в шахту, при цьому обертає гідравлічну турбину. Пари насос-двигун та турбіна-генератор розміщуються в станційній споруді та гідравлічно зв'язані з нижнім рівнем у шахті та верхнім резервуаром за допомогою каналів.

Варто зазначити, що робочий напір визначається не глибиною залягання станційної споруди, а різницею висот між фактичним рівнем води в шахті та у верхньому резервуарі. Різниця висот між галереями шахт може сягати сотень метрів, а тому на відміну від наземних ГАЕС станційна споруда підземних ГАЕС може бути значно нижче за робочий рівень води нижнього резервуара, що може потягнути додаткові капіталовкладення при реалізації проєкту та потребує ретельного прорахунку морфометричних характеристик нижнього резервуара та визначення оптимальної глибини розташування станційної споруди.

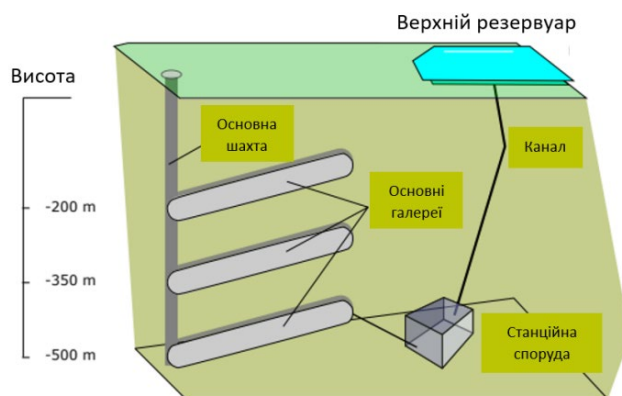


Рис. 6. Схема основних елементів ГАЕС з підземним резервуаром [31]

Fig. 6. Scheme of the main elements of the PSH with an underground reservoir [31]

Підземна ГАЕС є цікавим рішенням, оскільки існують тисячі законсервованих шахт, з яких вже дістали більшу частину копалин. Будівельна складова є найскладнішою діяльністю для цього способу, однак вартість значно знижується, якщо під землею вже існують природні або штучні порожнини. Деякі автори вже пропонували використовувати як резервуари списані шахтні камери [30, 31]. Крім того, один підземний резервуар може бути з'єднаний з наземним резервуаром.

Д. Море – морський резервуар. Ця конфігурація дозволяє уникнути використання поверхні суходолу шляхом створення сферичної порожнини для зберігання в морському дні як нижнього резервуара та використання моря як верхнього резервуара. Дослідженнями встановлено, що така конфігурація є економічно ефективною на глибині від 200 до 800 м [32, 33, 34]. Проте через велику масу бетону, який використовується для сфери (понад 2 м завтовшки, понад 30 м в діаметрі), встановлення є таким же складним, як і розмір системи. Дрібномасштабні прототипи були випробувані в Європі та США, однак наразі жодного комерційного підтвердження концепції через складність та високу вартість системи не було реалізовано. Для офшорних і прибережних ВЕС та ФЕС відомі також пропозиції створення низьконапірних ГАЕС морського базування [35] за наявності відповідних природних умов.

Е. Плаваючий накопичувач енергії є ще однією формою гравітаційного акумулятора. У цій системі об'єкт із низькою густиною (наприклад, повітряна куля) занурюється у воду. В цей час на нього діє підйомна виштовхувальна сила, що дорівнює масі витісненої води. Трос, прикріплений до генератора, дозволяє опускати та піднімати об'єкт для операції заряджання-розряджання. Опускаючи тіло завдяки намотуванню троса двигуном відбувається процес «зарядки» акумулятора. Дослідники рекомендують закріплення станційної споруди на глибині понад 3000 м, щоб отримати витрати на енергію в діапазоні 50–100 дол./кВт-год [36]. Основна проблема таких установок полягає у вимогах до жорсткості кріплення нижнього обладнання до морського дна, щоб утримувати кулю, яка має доволі повільно рухатися ($<0,1$ м/с). Мінімізація швидкості необхідна для зменшення втрат опору. Прототип повітряної кулі об'ємом 25 м^3 на глибині 2 м уже випробувано. Однак система має низьку ефективність, на рівні 19,8, через її малий масштаб [37]. Тому все ще потрібні додаткові дослідження та розробки, щоб вивести систему на комерційний рівень.

Як зазначалося вище, вплив на навколишнє водне середовище проєктів ГАЕС, а також залежність від режиму річки є найвагомішими їх недоліками. Проаналізовані вище ГАЕС морського типу, які використовують море та штучну водойму, позбавлені цих недоліків. Однак вони складніші в будівництві, через те що морська вода є значно агресивнішою до металевих елементів системи. Варіанти Г, Д, Е є доволі цікавими, однак залишаються недослідженими низка проблем та нерозв'язаними низка конструкторських задач. Варіант з твердотільним гравітаційним акумулятором є альтернативою ГАЕС, однак його вартість та особливості, ймовірно, сприятимуть його поширенню на територіях із сухим тропічним кліматом, або ж де існує проблема із прісною чи солоною водою. ГАЕС морського типу є ідеальним варіантом для островних держав. Такими прикладами можуть бути Японія, Канарські острови (Іспанія, проєкт морської ГАЕС з ВЕС [38]), узбережжя Криму (Україна, [6]). Для переважної частини материкових територій ГАЕС є все ще перспективним варіантом акумуляування електричної енергії.

Розглянемо ГАЕС із замкнутим контуром. Вплив на навколишнє середовище проєктів ГАЕС із замкнутим контуром зазвичай нижчий, – більш локалізований і менш тривалий. Це пов'язано з тим, що ГАЕС із замкнутим контуром: (1) розташовані «поза течією», що потенційно мінімізує вплив на водне та наземне середовище (4), і часто мають більшу гнучкість розміщення, ніж проєкти ГАЕС з відкритим контуром. Однак, певні конкретні впливи систем із замкнутим циклом можуть бути вищими, ніж впливи систем із відкритим контуром, особливо для геології, ґрунтів і підземних вод. Це може бути пов'язано, наприклад, з необхідністю будівництва двох надземних резервуарів замість одного або з впливом забору чи циркуляції підземних вод.

Існує один тип ГАЕС відкритого циклу, де вплив може бути таким же низьким, як і в ГАЕС із замкнутим контуром: проєкти відкритого циклу, де нижнє водосховище вже було побудовано для інших цілей, а верхнє водосховище було додано пізніше. Для такої електростанції з відкритим циклом початковий вплив будівництва буде меншим, ніж вплив будівництва ГАЕС із замкнутим циклом, оскільки потрібно побудувати лише одне нове водосховище. З іншого боку, експлуатаційні наслідки, ймовірно, будуть вищими, ніж для проєкту із замкнутим циклом, оскільки нижня водойма все ще постійно з'єднана з природною річковою водоймою, яка була перегороджена під час початкової конструкції, і може впливати на неї. Варто зазначити, що хоча в цій роботі обговорюється вплив на навколишнє середовище як проєктів ГАЕС із відкритим контуром, так і проєктів ГАЕС із закритим циклом, це не означає, що проєкти відкритих ГАЕС мають вплив на навколишнє середовище, який неможливо пом'якшити. Крім того, багато проєктів ГАЕС замкнутого циклу, що розробляються, мають свої власні унікальні характеристики, наприклад будуються в уже існуючій шахті чи кар'єрі або в інший спосіб використовують переваги існуючої інфраструктури. У всіх випадках вплив будь-якого конкретного об'єкта необхідно розглядати окремо. У зв'язку з підвищенням інтересом до розробки ГАЕС із замкнутим циклом розробники проєктів, регулятори, агентства, що займаються ресурсами, та інші зацікавлені сторони повинні розуміти, що існує вплив систем із замкнутим контуром на навколишнє середовище, а також передбачати заходи щодо уникнення, мінімізації та пом'якшення впливу і включити їх в екологічну експертизу будь-якого запропонованого проєкту.

Висновки. В статті проведено аналіз гідроакумулювальних систем із замкнутим циклом робочого тіла, який показав, що ГАЕС такого типу порівняно з класичними ГАЕС потребують меншої кількості робочого тіла для забезпечення тієї самої потужності, що досягається за рахунок створення більшого напору, до 600 м. Розрахункова ємність закритої ГАЕС з напором 600 м та ємністю резервуару $0,5 \times 10^6 \text{ м}^3$ становить 717 МВт год. Споживання води від природних водойм обумовлене лише втратами системи та випаровуванням води. Також наголошено на зменшенні екологічних впливів, адже установка потребує меншої території відчуження, а можливість використання тунелів і підземних станцій мінімізує вплив на поверхню. Встановлено, що кількість потенційних місць для розміщення ГАЕС закритого типу – понад 615 тис. по всьому світу із сумарним потенціалом акумуляування 23,1 млн ГВт-год. Це, а також екологічність, низьке споживання води від зовнішнього джерела ($<10\%$), висока ефективність (70...75%), низька вартість (600–8000 дол./кВт) робить ГАЕС із замкнутим циклом використання робочого тіла більш доцільним рішенням порівняно з іншими установками для акумуляування енергії від ВДЕ.

ПОСИЛАННЯ

1. Renewable energy statistics 2023 (978-92-9260-537-7). (2023). International Renewable Energy Agency.
2. Lim, S. C., Huh, J. H., Hong, S. H., Park, C. Y., & Kim, J. C. (2022). Solar Power Forecasting Using CNN-LSTM Hybrid Model. *Energies*, 15(21), 8233. <https://doi.org/10.3390/en15218233>
3. Kim, J. G., Kim, D. H., Yoo, W. S., Lee, J. Y., & Kim, Y. B. (2017). Daily prediction of solar power generation based on weather forecast information in Korea. *IET Renewable Power Generation*, 11(10). Pp. 1268-1273. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0698>
4. Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bauer, Z. A. F., Goodman, S. C., Chapman, W. E., Cameron, M. A., Bozonnat, C., Chobadi, L., Clonts, H. A., Enevoldsen, P., et al. (2017). 100% Clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *The Electricity Journal*. Vol. 31. Issue 2, March 2018, Pp. 78-80. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.011>
5. Pleßmann, G., Erdmann, M., Hlusiak, M., and Breyer, C. (2014). Global energy storage demand for a 100% renewable electricity supply. *Energy Procedia* 46. Pp. 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.154>
6. Васько П. Ф., Вербовий А. П., Ібрагімова М. Р., Пазич С. Т. Гідроакмулювальні електростанції – технологічна основа інтеграції потужних вітро- та фотоелектричних станцій до складу електроенергетичної системи України. *Гідроенергетика України*. 2017. (1-2). С. 20–25.
7. Васько В. П., Васько П. Ф. Динамика нагрузочных режимов работы ветроэлектрической установки, обусловленная порывами скорости ветра. *Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури*. 2001. Т. 1. Вип. 4. С. 140–144.
8. Васько П. Ф., Васько В. П., Даниленко О. І., Долюк В. В. Експериментальні дослідження режимів генерування та споживання реактивної потужності серійною вітроелектричною установкою з асинхронним генератором. *Відновлювана енергетика*. 2008. № 1. С. 34–38.
9. Vasko, P. F., Ibragimova, M. R., & Pazych, S. T. (2014). Seawater pumped-storage hydroelectric power stations are the technological basis of large-scale use of wind and solar energy in Crimean electric power system. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, (15), Pp. 38-49.
10. Головка В., Семененко Р. Автономна гідроакмулююча електростанція. *Енергетика і автоматика*, (2). С. 116–128.
11. Stocks, M., Stocks, R., Lu, B., Cheng, C., & Blakers, A. (2021). Global atlas of closed-loop pumped hydro energy storage. *Joule*, 5(1), Pp. 270-284. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.11.015>
12. Saulsbury, J. W. (2020). A comparison of the environmental effects of open-loop and closed-loop pumped storage hydropower (No. PNNL-29157). Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States).
13. Menéndez, J., Fernández-Oro, J. M., Galdo, M., & Loredó, J. (2020). Efficiency analysis of underground pumped storage hydropower plants. *Journal of Energy Storage*, 28, 101234.
14. Menéndez, J., Schmidt, F., & Loredó Pérez, J. L. (2020). Comparing subsurface energy storage systems: underground pumped storage hydropower, compressed air energy storage and suspended weight gravity energy storage. In *E3S Web of Conferences*, 162.
15. Нефедов, Ю. И. (2014). Гидроударная система отопления без потребления энергии от внешних источников. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, (4 (122)), 2-5.
16. Twaróg, B. (2023). Modelling a pumped storage power plant on the example of the Porąbka Żar power plant. *Technical Transactions*, e2023001. <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2023001>
17. Ouedraogo, K. E., Ekim, P. O., & Demirok, E. (2023). Prospection of Neighborhood Megawatthours Scale Closed Loop Pumped Hydro Storage Potential. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110100>
18. Ruiz, R. A., De Vilder, L. H., Prasasti, E. B., Aouad, M., De Luca, A., Geisseler, B., ... & Goseberg, N. (2022). Low-head pumped hydro storage: A review on civil structure designs, legal and environmental aspects to make its realization feasible in seawater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112281. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112281>
19. Fujihara, T., Imano, H., & Oshima, K. (1998). Development of pump turbine for seawater pumped-storage power plant. *Hitachi Review*, 47(5), Pp. 199-202.
20. Cheng, C., Blakers, A., Stocks, M., & Lu, B. (2022). 100% renewable energy in Japan. *Energy Conversion and Management*, 255, 115299.
21. Cava, F., Kelly, J., Peitzke, W., Brown, M., & Sullivan, S. (2016). Advanced rail energy storage: Green energy storage for green energy. In *Storing Energy*. Pp. 69-86. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00004-X>
22. Franklin, M., Fraenkel, P., Yendell, C., & Apps, R. (2022). Gravity energy storage systems. In *Storing Energy*. Pp. 91-116. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-1.00023-4>
23. Botha, C. D., & Kamper, M. J. (2019). Capability study of dry gravity energy storage. *Journal of Energy Storage*, 23. Pp. 159-174. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2019.03.015>
24. Gravity Storage - a new technology for large scale energy storage. Available from: <https://heindl-energy.com>
25. Fessenden, R. A. (1917). U.S. Patent No. 1,247,520. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

26. Min, A. P. N. (1984). Ondergrondse Pomp Accumulatie Centrale: effectiviteitsverbetering dmv verschillende pomp-turbinevermogens.
27. Wong, I. H. (1996). An underground pumped storage scheme in the Bukit Timah granite of Singapore. *Tunneling and Underground Space Technology*, 11(4). Pp. 485-489.
28. Bear, J., & Cheng, A. H. D. (2010). *Modeling groundwater flow and contaminant transport* (Vol. 23, pp. 89-103). Dordrecht: Springer.
29. Bodeux, S., Pujades, E., Orban, P., Brouyère, S., & Dassargues, A. (2017). Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach. *Engineering Geology*, 217. Pp. 71-80.
30. Pujades, E., Orban, P., Bodeux, S., Archambeau, P., Erpicum, S., & Dassargues, A. (2017). Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency?. *Applied Energy*, 190. Pp. 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.093>
31. Kitsikoudis, V., Archambeau, P., Dewals, B., Pujades, E., Orban, P., Dassargues, A., ... & Erpicum, S. (2020). Underground pumped-storage hydropower (UPSH) at the Martelange Mine (Belgium): Underground reservoir hydraulics. *Energies*, 13(14), 3512. <https://doi.org/10.3390/EN13143512>
32. Morabito A. (2022). Underground cavities in pumped hydro energy storage and other alternate solutions. *Encyclopedia of Energy Storage*. Pp. 193-204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00145-1>
33. Dick, C., Puchta, M., & Bard, J. (2021). StEnSea – Results from the pilot test at Lake Constance. *Journal of Energy Storage*, 42, 103083. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.103083>
34. Dubbers, D. (2021). Comparison of underwater with conventional pumped hydro-energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 35, 102283. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102283>
35. Slocum, A. H., Fennell, G. E., Dundar, G., Hodder, B. G., Meredith, J. D., & Sager, M. A. (2013). Ocean renewable energy storage (ORES) system: Analysis of an undersea energy storage concept. *Proceedings of the IEEE*, 101(4). Pp. 906-924. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2242411>
36. Vasko P., Verboviy A., Moroz A., Pazykh S., Ibragimova M., Sahno L. Concept of accumulation of energy from photovoltaic and wind power plants by means of seawater pumped hydroelectric energy storage. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE. 2019. Pp. 188-191. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764167
37. Hunt, J. D., Zakeri, B., de Barros, A. G., Leal Filho, W., Marques, A. D., Barbosa, P. S. F., ... & Farenzena, M. (2021). Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression. *Journal of Energy Storage*, 40, 102746. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102746>
38. Bassett, K., Carriveau, R., & Ting, D. S. K. (2016). Underwater energy storage through application of Archimedes principle. *Journal of Energy Storage*, 8. Pp. 185-192. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2016.07.005>
39. Bueno, C., & Carta, J. A. (2006). Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands. *Renewable and sustainable energy reviews*, 10(4). Pp. 312-340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.005>

REFERENCE

1. Renewable energy statistics 2023 (978-92-9260-537-7). (2023). International Renewable Energy Agency.
2. Lim, S. C., Huh, J. H., Hong, S. H., Park, C. Y., & Kim, J. C. (2022). Solar Power Forecasting Using CNN-LSTM Hybrid Model. *Energies*, 15(21), 8233. <https://doi.org/10.3390/en15218233>
3. Kim, J. G., Kim, D. H., Yoo, W. S., Lee, J. Y., & Kim, Y. B. (2017). Daily prediction of solar power generation based on weather forecast information in Korea. *IET Renewable Power Generation*, 11(10), Pp. 1268-1273. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0698>
4. Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bauer, Z. A. F., Goodman, S. C., Chapman, W. E., Cameron, M. A., Bozonnat, C., Chobadi, L., Clonts, H. A., Enevoldsen, P., et al. (2017). 100% Clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *The Electricity Journal*. Vol. 31. Issue 2, March 2018, Pp. 78-80. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.011>
5. Pleßmann, G., Erdmann, M., Hlusiak, M., and Breyer, C. (2014). Global energy storage demand for a 100% renewable electricity supply. *Energy Procedia* 46, Pp. 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.154>
6. Vasko P.F., Verboviy A.P., Ibragimova M.R., Pazykh S.T. Hydro-storage power plants are the technological basis for the integration of powerful wind and solar power plants into the power system of Ukraine. *Hidroenergetyka Ukrainy*. 2017. (1-2). Pp. 20-25. [in Ukrainian]
7. Vasko V., Vasko P. Dynamics of load modes of operation of a wind power plant, caused by gusts of wind speed. *Bulletin of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2001. Vol.1. (4). Pp. 140-144. [in Russian]
8. Vasko P., Vasko V., Danylenko O., Doliuk V. Experimental studies of the modes of generation and consumption of reactive power by a serial wind-driven installation with an asynchronous generator. *Vidnovlyuvana energetika*. 2008. 1. Pp. 34-38. [in Ukrainian]

9. Vasko, P. F., Ibragimova, M. R., & Pazych, S. T. (2014). Seawater pumped-storage hydroelectric power stations are the technological basis of large-scale use of wind and solar energy in Crimean electric power system. *Alternative Energy and Ecology (ISIAEE)*, (15), Pp. 38-49.
10. Golovko, V., & Semenenko, R. Autonomous pumped-storage power plant. *Enerhetyka i avtomatyka*, (2), Pp. 116-128. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya2\(66\).2023.116](http://dx.doi.org/10.31548/energiya2(66).2023.116) [in Ukrainian]
11. Stocks, M., Stocks, R., Lu, B., Cheng, C., & Blakers, A. (2021). Global atlas of closed-loop pumped hydro energy storage. *Joule*, 5(1), Pp. 270-284. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.11.015>
12. Saulsbury, J. W. (2020). A comparison of the environmental effects of open-loop and closed-loop pumped storage hydropower (No. PNNL-29157). Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States).
13. Menéndez, J., Fernández-Oro, J. M., Galdo, M., & Loredó, J. (2020). Efficiency analysis of underground pumped storage hydropower plants. *Journal of Energy Storage*, 28, 101234.
14. Menéndez, J., Schmidt, F., & Loredó Pérez, J. L. (2020). Comparing subsurface energy storage systems: underground pumped storage hydropower, compressed air energy storage and suspended weight gravity energy storage. In *E3S Web of Conferences*, 162.
15. Nefedov, Yu. I. (2014). Hydroelectric heating system without energy consumption from external sources. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, (4 (122)), 2-5. [in Russian]
16. Twaróg, B. (2023). Modelling a pumped storage power plant on the example of the Porąbka Żar power plant. *Technical Transactions*, e2023001. <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2023001>
17. Ouedraogo, K. E., Ekim, P. O., & Demirok, E. (2023). Prospection of Neighborhood Megawatthours Scale Closed Loop Pumped Hydro Storage Potential. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110100>
18. Ruiz, R. A., De Vilder, L. H., Prasasti, E. B., Aouad, M., De Luca, A., Geisseler, B., ... & Goseberg, N. (2022). Low-head pumped hydro storage: A review on civil structure designs, legal and environmental aspects to make its realization feasible in seawater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112281. <https://doi.org/10.1016/j.RSER.2022.112281>
19. Fujihara, T., Imano, H., & Oshima, K. (1998). Development of pump turbine for seawater pumped-storage power plant. *Hitachi Review*, 47(5), Pp. 199-202.
20. Cheng, C., Blakers, A., Stocks, M., & Lu, B. (2022). 100% renewable energy in Japan. *Energy Conversion and Management*, 255, 115299.
21. Cava, F., Kelly, J., Peitzke, W., Brown, M., & Sullivan, S. (2016). Advanced rail energy storage: Green energy storage for green energy. In *Storing Energy*. Pp. 69-86. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00004-X>
22. Franklin, M., Fraenkel, P., Yendell, C., & Apps, R. (2022). Gravity energy storage systems. In *Storing Energy*. Pp. 91-116. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-1.00023-4>
23. Botha, C. D., & Kamper, M. J. (2019). Capability study of dry gravity energy storage. *Journal of Energy Storage*, 23, Pp. 159-174. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2019.03.015>
24. Gravity Storage - a new technology for large scale energy storage. Available from: <https://heindl-energy.com>
25. Fessenden, R. A. (1917). U.S. Patent No. 1,247,520. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
26. Min, A. P. N. (1984). Ondergrondse Pomp Accumulatie Centrale: effectiviteitsverbetering dmv verschillende pomp-turbinevermogens.
27. Wong, I. H. (1996). An underground pumped storage scheme in the Bukit Timah granite of Singapore. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(4). Pp. 485-489.
28. Bear, J., & Cheng, A. H. D. (2010). Modeling groundwater flow and contaminant transport (Vol. 23, pp. 89-103). Dordrecht: Springer.
29. Bodeux, S., Pujades, E., Orban, P., Brouyère, S., & Dassargues, A. (2017). Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach. *Engineering Geology*, 217, Pp. 71-80.
30. Pujades, E., Orban, P., Bodeux, S., Archambeau, P., Ericum, S., & Dassargues, A. (2017). Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency? *Applied Energy*, 190, Pp. 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.093>
31. Kitsikoudis, V., Archambeau, P., Dewals, B., Pujades, E., Orban, P., Dassargues, A., ... & Ericum, S. (2020). Underground pumped-storage hydropower (UPSH) at the Martelange Mine (Belgium): Underground reservoir hydraulics. *Energies*, 13(14), 3512. <https://doi.org/10.3390/EN13143512>
32. Morabito A. (2022). Underground cavities in pumped hydro energy storage and other alternate solutions. *Encyclopedia of Energy Storage*. Pp. 193-204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00145-1>
33. Dick, C., Puchta, M., & Bard, J. (2021). StEnSea – Results from the pilot test at Lake Constance. *Journal of Energy Storage*, 42, 103083. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.103083>
34. Dubbers, D. (2021). Comparison of underwater with conventional pumped hydro-energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 35, 102283. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102283>

35. Slocum, A. H., Fennell, G. E., Dundar, G., Hodder, B. G., Meredith, J. D., & Sager, M. A. (2013). Ocean renewable energy storage (ORES) system: Analysis of an undersea energy storage concept. *Proceedings of the IEEE*, 101(4). Pp. 906-924.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2242411>
36. Vasko P., Verbovij A., Moroz A., Pazych S., Ibragimova M., Sahno L. Concept of accumulation of energy from photovoltaic and wind power plants by means of seawater pumped hydroelectric energy storage. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE. 2019. Pp. 188-191.
DOI: 10.1109/ESS.2019.8764167
37. Hunt, J. D., Zakeri, B., de Barros, A. G., Leal Filho, W., Marques, A. D., Barbosa, P. S. F., ... & Farenzena, M. (2021). Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression. *Journal of Energy Storage*, 40, 102746.
<https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102746>
38. Bassett, K., Carriveau, R., & Ting, D. S. K. (2016). Underwater energy storage through application of Archimedes principle. *Journal of Energy Storage*, 8. Pp. 185-192.
<https://doi.org/10.1016/J.EST.2016.07.005>
39. Bueno, C., & Carta, J. A. (2006). Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands. *Renewable and sustainable energy reviews*, 10(4). Pp. 312-340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.005>