УДК 621.355 **DOI 10.20535/1813-5420.4.2022.273433**

П.П. Мирутенко, аспірант **ORCID** 0000-0002-7960-0687
Л.К. Лістовщик, канд. техн. наук, **ORCID** 0000-0003-3413-1802
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»

НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ. ОСНОВНІ ТИПИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ

У статті розглянуто обладнання для зберігання енергії, як ключового елемента ланцюга електропостачання. Необхідність накопичення енергії виникла ще на початку створення енергетичних мереж і, з розвитком технологій отримання, передачі та споживання енергії, актуальність створення і раціонального використання накопичувачів зростає. Створено вже досить багато типів накопичувачів, деякі з них доволі широко використовуються, багато є таких, які ще знаходяться на стадії випробовування, але мають хороші шанси на розвиток і інтеграцію в енергосистеми різних типів. В статті зроблено спробу провести аналізування основних типів накопичувачів енергії, які відрізняються між собою способом накопичення, енергії, типом енергії, часом зберігання, накопиченою потужністю, тощо, та узагальнено їх основні характеристики з метою порівняння між собою.

Результати, які отримані в даній статті, дозволять попередньо вибрати певний тип накопичувача енергії в залежності від енергосистеми, яка проектується, що дасть можливість найбільш раціонально керувати енергопотоками в процесі передачі, накопичення енергії та її віддавання в мережу.

Ключові слова: *накопичувач енергії, акумулятор, генерування, енергосистема, енергоспоживання.*

Вступ

В останні роки в світовій практиці все більше набувають популярності системи накопичення та зберігання електричної енергії. Тільки за останні 10 років індустрія накопичення енергії зросла в десятки разів [27]. Середньорічні темпи зростання склали близько 47%. Згідно Clean Horizon Consulting, станом на 2020 рік тільки в Європі зафіксовані 1,4 ГВт діючої потужності та близько 2,3 ГВт анонсовані. За прогнозами Bloomberg NEF, до 2040 року потужності систем накопичення енергії у світі перевищать 1 ТВт. Завдання накопичувачів енергії, це оптимізація виробництва електроенергії за рахунок вирівнювання навантаження в енергомережі в періоди пікового та зниженого споживання.

Стрімке поширення відновлювальних джерел енергії стало поштовхом для розвитку накопичувачів енергії. Завдяки цьому можуть суттєво змінитись структури енергосистем, тим самим зменшити використання викопних ресурсів та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Серед лідерів по кількості реалізованих систем накопичення енергії є гідроакумулюючі електростанції, частка яких в світі становить близько 96%, але в той же час роль інших типів накопичувачів зростає [3]. До них можна віднести в першу чергу акумулятори, або цілі комплекси акумуляторних батарей, які можуть встановлюватись безпосередньо біля споживача або на підстанціях, та бути гнучким елементом в системі підтримання параметрів електромережі. Якщо врахувати, що в Україні практично вичерпані можливості по розвитку мережі гідроакумулювання, то для інших типів накопичувачів відкривається великий ринок.

Мета та завдання

Метою роботи є аналізування різного типу накопичувачів енергії та можливостей застосування накопичувачів в системі електропостачання з урахуванням умов їх експлуатації.

Відповідно до поставленої мети, повинні бути вирішені наступні задачі:

1. Узагальнення інформації про найрозповсюджені типи накопичувачів енергії, які знаходяться на різних стадіях реалізації.
2. Визначення умов та особливостей використання накопичувачів енергії різних типів та принципу дії.
3. Порівняння накопичувачів за основними характеристиками та визначення області використання за кожним типом.

Матеріал і результати досліджень

Процес експлуатації електричних мереж завжди потребує визначення раціонального співвідношення між генерацією енергії та її споживанням оскільки потрібно постійно контролювати пропозицію в залежності від попиту, тобто дві складові - попит та пропозиція повинні завжди бути максимально точно збалансовані. Попит електроенергії можна приблизно передбачити (вечір – зростання споживання, ніч – зниження), з цього виходить, що електросистеми повинні бути гнучкими. Гнучкість досягається за допомогою системних операторів, які регулюють вихідну потужність в залежності від збільшення або зменшення попиту.

Зберігання енергії можна розділити на 3 етапи:

- забирання електроенергії з мережі;

- зберігання електроенергії;
- повернення електроенергії в електричну мережу через певний час.

Вибір типів накопичувачів енергії (рис. 1) умовно можна поділити на дві групи:

Перша група – за потужністю фази заряджання та розряджання, яка визначає можливості накопичувача енергії забирати або подавати електроенергію із мережі або в мережу, друга група – за потужністю фази накопичення, яка визначає, скільки електроенергії може бути збережено і на який термін.

Рисунок 1 – Класифікація накопичувачів енергії [1]

Маховик [2] або англ. FES - Flywheel energy storage – зберігання енергії з використанням маховика. Механічна енергія накопичується і зберігається в кінетичній формі, у вигляді масивного збалансованого тіла, який обертається з великою швидкістю навколо своєї вісі обертання.

Накопичену таким чином механічну енергію можна перетворити в електричну енергію, для цього необхідно маховикову систему поєднати зі зворотною електричною машиною, яка може працювати в режимі двигуна та генератора.

Гідроакумулювання (ГАЕС) або англ. Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES) – гідроелектрична станція, принцип дії якої полягає в перетворенні електричної енергії, що отримується від інших електростанцій, в потенціальну енергію об'єму води, і при зворотному перетворенні накопичена енергія віддається в енергосистему головним чином для покриття піків навантаження.

Зазвичай гідротехнічні споруди ГАЕС складаються з двох басейнів, розташованих на різних рівнях, і сполучених водоводами. Гідроагрегати, які встановлені в будівлі ГАЕС в нижній частині водоводу, можуть бути тримашинними, такими, що складаються зі сполучених на одному валу оборотної електричної машини (двигун-генератор), гідротурбіни і насоса, або двомашинними – оборотна електромашина і оборотна гідромашина, яка залежно від напрямку обертання може працювати як насос або як турбіна [5].

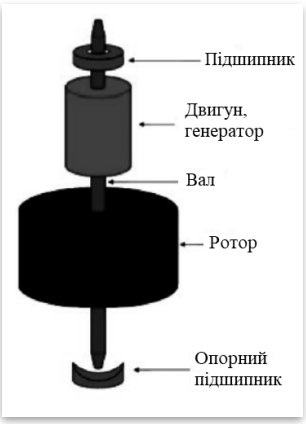

Рисунок 2 – Маховик [3,4]

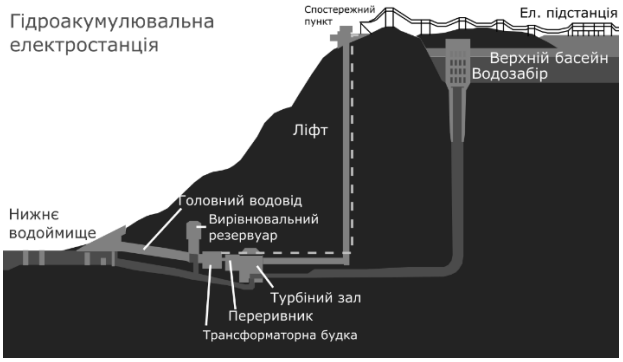

Рисунок 3 – Схема ГАЕС

Гравітація (Гравітаційний накопичувач енергії) або англ. Gravity energy storage (GES) – це накопичувач енергії, який зберігає потенціальну енергію.

Зазвичай використовують електроенергію для підняття вантажу в години низького попиту енергії, яка в свою чергу вже в пікові години вивільняється через генераторні установки для задоволення високого попиту. Також почали активно використовувати поєднання гравітаційних накопичувачів енергії разом з сонячними та вітровими установками, які вже в періоди своїх пікових генерацій (сонцестояння, потужний

вітер), скидають певну частину енергії на підйом вантажу і тим самим запасають потенційну енергію для задоволення потреб споживачів в піковий період [6].

Головною перевагою даного типу накопичувача це можливість використання в засушливих районах, де проблематичне використання води із-за геологічних обмежень.

Концепти гравітаційних накопичувачів енергії:

Технологія ARES

В Каліфорнії є спеціальна залізнична дорога, яка конструктивно спроектована і зроблена на спуск, та працює в поєднанні з вітровими і сонячними електростанціями.

Технологія ARES (рис.4) працює від джерел періодичної дії, таких як, сонячна та вітрова енергетика.

Коли генерування електроенергії велике, то вагони заїжджають в гору за допомогою електродвигунів і тим самим накопичують потенціальну енергію. Коли генерування електроенергії низьке, а споживання росте, то вагони котяться вниз, двигуни працюють в генераторному режимі і віддають електроенергію в мережу.

В технології ARES ефективність системи складає 86%, також в системі більш низька вартість життєвого циклу, аніж в акумуляторної батареї, та більш швидка реакція в порівнянні, наприклад, з ГАЕС, також для функціонування технології ARES вода не потрібна, що досить актуально для засушливих районів [7].

Гравітаційний акумулятор

Інженери з компанії Energy Vault придумали оригінальний спосіб надійно накопичувати енергію і видавати її в мережу при першій же потребі. Конструкція являє собою кран висотою 87 метрів та бетонні блоки. Принцип роботи такий же як і в технології ARES, але в даному випадку виконавчими органами є електродвигун, який працює також в режимі генератора, троси, які працюють через талевий блок.

Перевага даної конструкції перед попередньо розглянутою полягає в тому, що для повноцінного функціонування системи необхідно значно менша територія, навіть без природних нахилів. Також компанія запевняє користувачів в досить розвиненому програмному забезпеченні, яке дозволяє практично миттєво реагувати на зміни в мережі і підлаштовуватись до виконання вимог попиту [9].

Рисунок 4 – Технологія ARES (Advanced Rail Energy Storage)

Рисунок 5 – Гравітаційний акумулятор [8]

Стиснене повітря (Накопичувач енергії на стисненому повітрі) англ. Compressed air energy storage (CAES) – це спосіб зберігання енергії у вигляді стисненого повітря або газу.

Перші накопичувачі промислового масштабу були введені в дію в 1970-х роках із заявленою потужністю в понад 290 МВт. Акумуляторні електростанції зі стисненим повітрям здебільшого схожі до насосних гідроелектростанцій, але замість перекачування води, використовується навколишнє повітря або інший газ, який стискається та зберігається під тиском у підземній камері або контейнері. Коли ~~необхідна~~ виникає необхідність в додатковій генерації електроенергії, повітря під тиском нагрівається та розширюється в турбіні розширення, ~~що~~ і приводить в дію електрогенератор. Особливістю зберігання стисненого повітря є те, що повітря сильно нагрівається під час стиснення від атмосферного тиску до тиску зберігання, який може сягати 7МПа.

А в багатоступеневих повітряних компресорах використовуються проміжні та додаткові охолоджувачі для зниження температури нагнітання до 149/177 °С і зниження температури до значень в 43/49°С [23].

Існує декілька типів сховищ для такого типу акумулювання: адіабатичне, діабатичне, ізотермічне.

Адіабатичне сховище зберігає тепло, вироблене при стисненні повітря, і використовує його для підігрівання повітря, яке розширюється для генерування енергії. Дані типи сховищ перебувають на стадіях досліджень, тому не мають комерційно реалізованих проектів. При повній теплоізоляції ККД

наближається до 100%, але на практиці очікується приблизно 70%. Тепло в даному сховищі зберігається у твердому тілі (камінь) або рідкому (гаряча мінеральна олія – до 300°С, розплавлена сіль – до 600°С).

Діабатичне сховище розсіює тепло, яке отримане в результаті стиснення повітря, в атмосферу через охолоджувачі. При виході повітря зі сховища температура повітря є індикатором кількості енергії, яка залишається у сховищі. При занадто низькій температурі в сховищі, його підігрівають.

Ізотермічне сховище, температура підтримується за рахунок обміну з оточуючим середовищем. Ефективність при ідеальному теплообміні 100%, але ідеальний цикл є недосяжним, оскільки втрат тепла уникнути неможливо.

Рисунок 6 – Накопичувач енергії на стисненому повітрі [22]

Незабаром повинні з'явитися 2 накопичувачі енергії (рис.6) на стисненому повітрі, які здатні запасти до 10 ГВт енергії. В даних установках окрім стисненого повітря в резервуарах буде частково використовуватись вода для вирівнювання тиску. За планом система при штатному вивільненні енергії може працювати до 12 годин. Перший завод компанії Hydrostor повинен з'явитися у 2026 році, термін експлуатації якого становить приблизно 50 років [22].

Хімічні накопичувачі енергії

Зберігання хімічної енергії охоплює всі технології, де електрична енергія використовується для виробництва хімічних сполук, які можна зберігати та використовувати для виробництва енергії коли це необхідно. Більшість хімічних сполук, які використовуються як накопичувачі енергії, мають більш високу щільність енергії, ніж насосні гідростанції чи компресорні станції, що робить їх ідеальним середовищем для зберігання енергії. В даний час існує кілька хімічних сполук, які використовуються для накопичення енергії. Вони включають: водень, метан, вуглеводні, метанол, бутанол та етанол. Серед перерахованих, найбільше розглядається водень, який виробляється шляхом електролізу води, а всі інші сполуки (наприклад, метан, вуглеводні та метанол) можуть бути отримані з водню у присутності джерела вуглецю, такого як CO та CO2, за допомогою синтезу Фішера-Тропша [10].

Останнім часом *зберігання водневої енергії* англ. Hydrogen energy storage (HES) – одне із найбільш популярних накопичувачів хімічної енергії [11]. Водень є безпечним, транспортабельним, універсальним, ефективним та чистим енергоносієм [12]. Він також має високу щільність енергії. Як показано на рис. 6, для накопичення енергії, позапікова електроенергія використовується для електролізу води для отримання водню. Водень можна зберігати як стиснений газ, зріджений газ, гідриди металів або вуглецеві наноструктури [13].

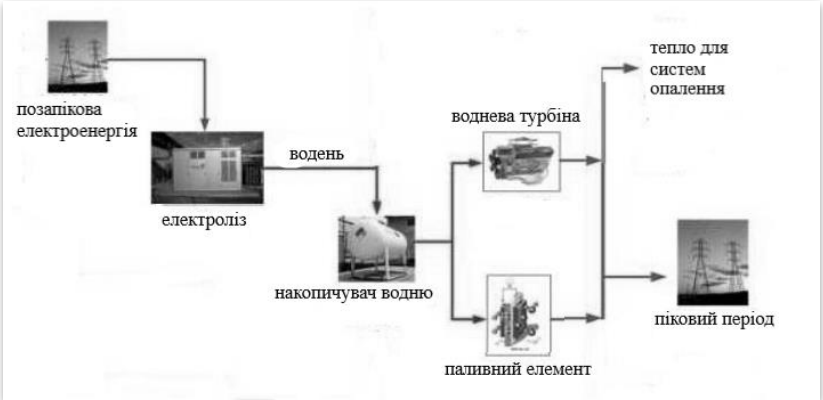

Рисунок 7 – Процес накопичення водневої енергії

Електрохімічні накопичувачі енергії

Електрохімічні накопичувачі енергії – це так звані акумулятори, які використовують електричну енергію для здійснення хімічних реакцій, перетворюють її в хімічну енергію (заряд) і повертають назад в електричну енергію (розряд). При цьому змінюється склад речовин електродів і витрачається електроліт [14].

Суперконденсатор – це конденсатор з обмеженим або необмеженим електролітом, «обкладками» в якому є в наявності подвійний електричний шар на межі розділу електрода і електроліту.

Основними перевагами суперконденсаторів є висока швидкість заряду і розряду, простота зарядного пристрою, високий ККД циклу (досягає 95%), можливість розрядження до нуля, відносно невелика вага.

Недоліками є менша питома енергія в порівнянні з акумуляторними батареями (1-3 Вт·год/кг проти 30-40 Вт·год/кг), малий термін служби (сотні годин) [15].

Акумуляторні батареї – вважаються одними з найстаріших накопичувачів електричної енергії, вони зберігають електроенергію в вигляді хімічної енергії. Акумуляторна батарея здатна транспортувати енергію до споживача в вигляді електричної енергії, використовуючи хімічну енергію, що генерується за допомогою хімічних реакцій [3].

Номінальна потужність акумуляторів від 100 Вт до декількох МВт. В залежності від робочого циклу або типу електрохімічної речовини, ефективність накопичення енергії становить близько 70%.

Виробництво та різноманіття типів акумуляторних батарей за останні роки досить швидко зросли, так як їх почали масово використовувати в різного роду побутових пристроях, починаючи з електроавтомобіля, закінчуючи портативними електронними та бездротовими системами.

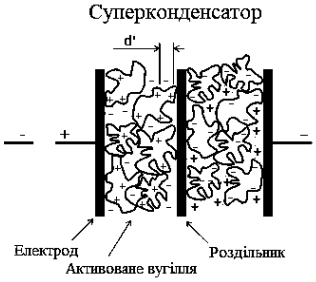

Рисунок 8 – Суперконденсатор [15]

Рисунок 9 – Акумулятор 18650

Типи акумуляторних батарей: сірчано-натрієві, натрій-нікель-хлоридні, ванадієві окисно відновні, залізно-хромові, бром-цинкові, повітряно-цинкові, свинцево-кислотні, літій – іонні, нікель – кадмієві і т.д.

Наразі популярні літій – іонні акумулятори, їх використовують зазвичай в портативній електроніці та пристроях для медицини. Дані акумулятори використовують металевий літій або сполуку літію як анод. В порівнянні з іншими акумуляторами хімічного типу, літій - іонні батареї легкі, менші за габаритами, але в той же час потужніші за інші типи батарей. Енергетична місткість сучасних літій - іонних акумуляторів сягає 100-180 Вт·год/кг та 250-400 Вт·год/дм^3, робоча напруга складає 3,5-3,7В [25].

На рис.9 зображено промисловий варіант літій-іонного акумулятора, який використовується зазвичай в потужних ліхтарях, літальних апаратах (дрони) та інших електроінструментах. Кількість циклів перезарядки складає понад 500 разів. Також використовується функція «без ефекту пам'яті», що дає можливість заряджати без попереднього розряджання [26].

Магнітні надпровідникові накопичувачі енергії (англ. Superconducting magnetic energy storage (SMES)) - використовують магнітне поле для накопичення енергії, яка кріогенно охолоджена до температури нижче критичної надпровідникової температури [3]. Процес полягає в індукуванні постійного струму в котушку з надпровідних кабелів майже нульового опору ниток, зазвичай використовують Ніобій-Титан (NbTi). Дані нитки працюють при температурі близько -260 °С [16]. Даний накопичувач складається з 3-х частин: надпровідникова котушка, система кондиціонування потужності та холодильна установка з кріогенним охолодженням [17].

Під час заряджання постійний струм збільшується, а під час розрядки – навпаки. Взагалі сама система досить енерговитратна, так як для досягнення кріогенного стану потрібно значна кількість електроенергії, також струм протікає через не надпровідникові матеріали, що спричиняє собою резистивні втрати. Тому ціна за МВт [3].

Перевагами є здатність швидко реагувати як на розрядження так і зарядку за кілька мілісекунд, великий термін служби, але головним недоліком це вартість обслуговування і ремонту даних систем.

Кріогенні накопичувачі енергії

Кріогенний накопичувач енергії (англ. Cryogenic energy storage) – це ціла система, яка використовує рідини низьких температур, такі як рідке повітря чи рідкий азот в якості накопичувача енергії. Процес

відбувається наступним чином, коли електроенергія дешева (зазвичай вночі), вона використовується на охолодження повітря із атмосфери до -195 °С за допомогою циклу Клода до точки, коли воно зріджується. Рідке повітря, яке займає набагато менше об'єму ніж в газоподібному стані, може зберігатись протягом довгого часу в вакуумній колбі при атмосферному тиску [18].

Під час великого попиту на електроенергію рідке повітря під високим тиском перекачується в теплообмінник. Повітря із атмосфери з температурою навколишнього середовища використовується для нагріву рідини і перетворює її назад в газ. Збільшення об'єму і тиску використовується для приводу турбіни, яка в свою чергу генерує електроенергію. Тертя від цієї турбіни генерує тепло, яке може бути повернуто до теплообміннику [18]. ККД таких систем складає 40-70% [3].

Накопичувач раціонального тепла (англ. Sensible heat storage)

В даній формі системи накопичення енергії матеріал накопичення не зазнає жодних форм зміни фази в межах діапазону температур, необхідного для зберігання [19]. До найбільш поширених матеріалів цієї категорії відносяться: бетон, лита кераміка та розплавлені солі. Розплавлені солі використовуються в сонячних теплових установках. Їх основний недолік полягає в тому, що більшість з них мають високу температуру замерзання (близько 100 °С), що може призвести до втрат енергії. Вони також відновлюють частину тепла, що зберігається під час процесу розрядки, завдяки незворотності в пристрої теплообмінника [3].

Накопичувач прихованого тепла (англ. Latent heat storage)

Матеріали зберігають приховане тепло, яке виникає в результаті зміни фази в носіях зберігання. Зазвичай вони відомі як матеріали зміни фази. Для використання накопичувача енергії фаза матеріалу змінюється (зазвичай з твердої в рідку) при температурі, що відповідає джерелу теплового введення [20]. Ці матеріали завжди мають високий потенціал накопичення теплової енергії, ніж аналоги без зміни фази через високу приховану теплоту, пов'язану зі зміною фази. Фазо-змінні матеріали поділяють на органічні та неорганічні. Органічні класифікуються на парафінові та непарафінові.

Парафін являє собою типовий приклад фазо-змінного матеріалу. Він виготовлений із суміші переважно прямо-ланцюгових n-алканів (CH_3-$(CH2)_n$-CH_3) [21]. Непарафіновані включають жирні кислоти, складні ефіри та гліколі. Неорганічні фазо-змінні матеріали включають гідрати солей, солі, метали та сплави. Прикладами є декагідрат сульфату натрію, гексагідрат хлориду кальцію, тіосульфат натрію тощо [3]. В порівнянні з накопичувачами раціонального тепла, в накопичувачах прихованого тепла менший діапазон робочих температур, що дозволяє ефективніше накопичувати енергію при незначних змінах температури середовища зберігання.

Термохімічне зберігання тепла

Як показано на рис.10 форма зберігання тепла передбачає оборотну реакцію, в якій тепло зберігається під час стадії ендотермічної реакції та під час екзотермічної вивільняється [24].

Під час процесу зарядження, теплова енергія використовується для дисоціації хімічного реагенту на продукти в ендотермічній реакції. Продукти зберігаються окремо та очікують потребу в енергії. Під час етапу розрядження збережені продукти змішуються разом і реагують з утворенням початкового реагенту в реакції, яка є екзотермічною. Тепло, яке виділяється під час реакції і використовують, як джерело тепла.

Даний тип зберігання тепла знаходиться на стадії дослідження та розробки з різними типами матеріалів, серед них гідриди металів (MgH2 та CaH2), карбонати (PbCO3 та CaCO3), гідроксиди (Mg(OH)2 та Ca(OH)2), оксиди (BaO2 та Co3O4), аміачну систему (NH4HSO4 та NH3), і органічні системи (CH4/H2O, CH4/CO2, C6H12) [3].

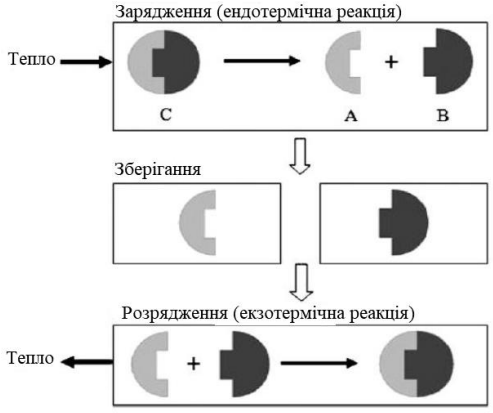

Рисунок 10– Процес термохімічного зберігання тепла [3]

Також термохімічне зберігання енергії має перевагу над системами чуттєвого та прихованого тепла, щільність енергії яких в 5-10 разів нижче термохімічних систем. Термін зберігання та транспортування

теоретично необмежений, так як при зберігання немає теплових втрат, оскільки продукти можуть зберігатись при температурі навколишнього середовища [20].

Застосування накопичувачів енергії в промисловості та побуті

Різні типи накопичувачів електроенергії використовуються для *періодичного балансування* електропостачання. Ефективність накопичувача енергії важлива при сезонних коливаннях, які можуть тривати дні та навіть місяці, а швидкість реагування важлива при миттєвих коливаннях, які можуть складати секунди. Тому для сезонних коливань підходять такі типи накопичувачів: гідроакумулювання, гравітація, стиснене повітря. А для миттєвого реагування: суперконденсатори, маховики та магнітні напівпровідникові накопичувачі.

Застосовуються накопичувачі для *арбітражу*, в період низького попиту на електроенергію, вона зберігається в накопичувачах, а в період високого попиту, вона продається в мережу за більш високу ціну. Такий тривалий тип зберігання доступний тільки для наступних накопичувачів: стиснене повітря, гравітація, гідроакумулювання.

Яскравим прикладом поєднання накопичувачів енергії з відновлювальними джерелами енергії є технологія накопичення ARES, яка дозволяє енергію вітру та сонця в періоди низького попиту зберігати в вигляді гравітаційної енергії, а при збільшенні попиту, швидко реагувати на зміни в мережі. Також таке поєднання можливо з системами гідроакумулювання, стисненого повітря.

Мобільність – характеристика, яка визначає можливість легко та швидко перемістити накопичувач енергії з одного місця в інше. Під дану характеристику підпадає категорія електрохімічних накопичувачів енергії, такі як акумулятори та суперконденсатори.

Порівняння накопичувачів енергії

Будь-які з розглянутих вище технологій накопичення енергії мають свої характеристики та функції, які в свою чергу визначають можливість застосування тих чи інших накопичувачів енергії за певних обставин. Розглянуті технічні дані накопичувачів енергії підсумовано та зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Характеристики накопичувачів енергії

Тип накопичувача	Щільність енергії (Вт·год/кг)	Потужність	Час розрядження	Термін зберігання	Термін експлуатації (років)	ККД (%)
Маховик	2,5-1200	0-250 кВт	1мс.-15хв.	1с. - 1 хв.	±15	85-95
ГАЕС (PHES)	0,5-1,5	100-5000МВт	1-24 год.	год.-місяць	40-60	66-75
Гравітація						
GES	1,06	40-150 МВт	30с. - 1 год.	год.-місяць	30+	75-80
ARES	-	100-3000 МВт	30с. - 1 год.	год.-місяць	40+	75-85
Стиснене повітря (CAES)	30-60	5-300 МВт	1-24 год.	год.-місяць	20-60	50-89
Водень (HES)	800-10000	0-50 МВт	1с. - 24+ год.	год.-місяць	5-15	20-35
Суперконденсатор	2,5-15	0-300 кВт	1мс.-60хв.	1с. - 1 год.	-	90-95
Акумулятори (Li-ion)	100-180	0-100 кВт	1хв. - 1 год.	0 - 24+ год.	-	85-90
Магнітні напівпровідникові (SMES)	0,5-5	100 кВт - 10 МВт	1 мс. - 8 с.	1 хв. - 1 год.	20+	95-98
Кріогенний	97	350 кВт - 5 МВт	1 - 24+ год.	год.-місяць	20+	50-70

Щільність енергії будь-яких накопичувачів визначається як номінальна вихідна потужність, поділена на об'єм пристрою [20]. Накопичувачі енергії з високим показником щільності енергії зазвичай використовують для пристроїв, яким потрібна висока якість електроенергії та швидкий час відгуку. Виходячи з таблиці, найбільш ефективним по щільності енергії є водневий накопичувач енергії (HES). ГАЕС, гравітація, суперконденсатори та магнітні напівпровідникові накопичувачі мають найнижчі значення щільності енергії. Інші мають середні значення.

Термін служби будь-яких накопичувачів відіграє велику роль в прийнятті рішення щодо впровадження технології на об'єкті. Якщо декілька технологій підходять по характеристикам, то з економічної точки зору, виберуть ту, яка має найбільш тривалий термін експлуатації. Згідно таблиці 1,

лідирують накопичувачі, такі як ГАЕС, гравітаційні та системи стисненого повітря, але їх термін може бути збільшений за рахунок збільшення терміну служби механічних компонентів систем,

Тривалість зберігання енергії також відіграє велику роль в виборі накопичувача енергії. Накопичувачі комерційного масштабу мають велику ємність, тому важливо зберегти енергію максимально довго і ефективно. Тому використовують накопичувачі з низьким коефіцієнтом саморозряду, до них відносяться: ГАЕС, гравітаційні та системи стисненого повітря. Наразі гравітаційні системи на стадіях розробки, але завдяки їх масштабуванню також можливо зберігати енергію тривалий час завдяки механічній частині установки. Не підходять для тривалого зберігання: маховик, суперконденсатори, магнітні напівпровідникові системи.

Ефективність (ККД) накопичувачів – це відношення електроенергії, що вивільняється із накопичувача, до електроенергії, яка надходить до пристрою. Згідно таблиці, найвищий ККД (більше 90%) мають магнітні напівпровідникові системи, маховик, суперконденсатори та літій-іонні акумулятори . Після них вже йдуть гідроакумулювання, системи стисненого повітря, кріогенні системи (ККД від 50-90%), та самий низький ККД (до 50%) має водневий накопичувач. Також слід звернути увагу на системи гравітаційних накопичувачів, їх ККД є на рівні ГАЕС, у випадку реалізації в промислових масштабах.

Висновки:

Зберігання енергії підвищує стабільність електромережі, збільшує можливості інтеграції відновлювальних джерел енергії в систему, підвищує ефективність використання елементів енергомережі, та зменшує використання викопних ресурсів, що позитивно впливає на екологічну складову під час виробництва електроенергії.

Існує багато рішень по накопиченню енергії, що ускладнює вибір однієї універсальної технології для всіх можливих випадків. Деякі накопичувачі енергії, такі як, суперконденсатори, термохімічні та гравітаційні, знаходяться на етапах представлення поодиноких дослідних зразків, тому важко оцінити їх здатність повноцінно бути інтегрованими в мережу, але роботи по дослідженню та впровадженню таких систем активно ведуться. Багато компаній активно демонструють концепти та будують як дослідні зразки так і вже інтегровані в енергомережу проекти накопичувачів з гравітаційним типом накопиченням енергії. Такі накопичувачі є прямими конкурентами гідроакумулюючих електростанцій, та, на відміну від ГАЕС, не потребують великих площ під будівництво та великих об'ємів під зберігання води. Незважаючи на це, ГАЕС все ще найрозповсюдженіші в світі накопичувач енергії завдяки можливості накопичувати енергію найбільшої потужності в порівнянні з іншими типами накопичувачів.

Розвиток альтернативних типів накопичувачів є актуальним і дозволить створювати розгалужену мережу систем накопичення, яка зможе максимально швидко і ефективно адаптуватись до змін в енергомережах, вирівнюючи процеси генерації та споживання.

Список використаної літератури

1. SBC, SBC Energy Institute Analysis based on US DOE Energy Storage Program Planning Document (2011).

2. Как устроены и работают маховичные (кинетические) накопители энергии. [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: http://electricalschool.info/energy/2334-mahovichnye-kineticheskie-nakopiteli-energii.html

3. Aneke M, Wang M. Energy storage technologies and real life applications e a state of the art review. Appl Energy 2016; 179:350-377.

4. S. Koohi-Kamali, V.V. Tyagi, N.A. Rahim, N.L. Panwar, H. Mokhlis, Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 25 (2013) 135 - 165.

5. Гідроакумулююча електростанція [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Гідроакумулююча_електростанція

6. Гравитационная батарея [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://cutt.ly/sCRKGMV

7. Гравитационные накопители энергии [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: https://habr.com/ru/post/377425/

8. Energy Vault EV1 CDU Production Bricks & Hooks 0031 [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://www.energyvault.com/photo-gallery

9. Национальная ассоциация нефтегазового сервиса [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://nangs.org/news/renewables/90-metrovyy-gravitatsionnyy-akkumulyator-reshit-problemy-alyternativnoy-energetiki

10. F. Schüth, Energy Storage Strategies, in: R. Schlögl (Ed.) Chemical Energy Storage, Hubert & Co. GmbH & Co. KG, Göttingham, Berlin, 2013, pp. 35 - 47.

11. T.M.I. Mahlia, T.J. Saktisahdan, A. Jannifar, M.H. Hasan, H.S.C. Matseelar, A review of available methods and developments on energy storage; technology update, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 33 (2014) 532 - 545.

12. J.M. Carrasco, L.G. Franquelo, J.T. Bialasiewicz, E. Galvan, R.P.C. Guisado, M.A. Prats, J.I. Leon, N. Moreno-Alfonso, Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A survey, IEEE Transactions on Industrial Electronics 53 (2006) 1002 - 1016.

13. A.S. Biris, A.R. Biris, D. Lupu, D. Buzatu, J. Darsey, M.K. Muzumder, Use of carbon nanostructures for hydrogen storage for environmentally safe automotive applications, in: Proc. 39th IEEE-IAS Annual meeting, 2004, pp. 953 - 956.

14. Электрохимические накопители энергии (аккумуляторы) и электрохимические генераторы (топливные элементы) [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: https://cutt.ly/ECRLr61

15. Іоністор [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Іоністор

16. S. Schoenung, J. Eyer, J. Iannucci, S. Horgan, Energy storage for a competitive power market, Annual Reviews of Energy and Environment, 21 (1996) 347 - 370.

17. M. Zukowski, Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating application, Energy Conversion and Management, 48 (2007) 155 - 165.

18. Криогенный накопитель энергии [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://buildwiki.ru/wiki/Cryogenic_energy_storage

19. A.I. Fernandez, M. Martinez, M. Segarra, I. Martorell, L.P. Cabeza, Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage, Sol Energy Mater Sol Cells, 94 (2010) 1723 - 1729.

20. T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y. Zeraouli, Energy storage: Application and challenges, Solar Energy Materials & Solar Cells, 120 (2013) 59 - 80.

21. H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, 19 (2009) 291 - 312.

22. This Compressed Air Grid 'Battery' Is an Energy Storage Game Changer – 2022. – Режим доступу: https://www.popularmechanics.com/science/green-tech/a36300986/compressed-air-grid-energy-storage-system/

23. Compressed Air Energy Storage (CAES) – 2022. – Режим доступу: https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/compressed-air-energy-storage-caes/

24. P. Pardo, A. Deydier, Z. Anxionnaz-Minvielle, S. Rouge, M. Cabassud, P. Cognet, A review on high temperature thermochemical heat energy storage, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 32 (2014) 591 - 610.

25. Літій – іонний акумулятор – 2022. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery

26. Акумулятор 18650 Li-on – 2022. – Режим доступу: https://rozetka.com.ua/ua/vipow_icr18650_1200mahtt/p315879427/?gclid=CjwKCAjw6fyXBhBgEiwAhhiZsig_ZU6BRKiiI33GE638O5fp14NaDrSsBiTg56Ao5DnPZZE5MaDaKBoCBbAQAvD_BwE

27. Системи накопичення енергії: чи є майбутнє в Україні? – 2022. -Режим доступу: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/sistemi-nakopichennya-energii-chi-ie-majbutnie-v-ukraini/

P. Myrutenko, graduate student **ORCID** 0000-0002-7960-0687
L. Listovshchyk, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0003-3413-1802
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ENERGY STORAGE DEVICES. MAIN TYPES AND PROSPECTS OF APPLICATION

The article considers energy storage equipment as a key element of the power supply chain. The need to accumulate energy arose at the beginning of the creation of energy networks and, with the development of technologies for the production, transmission and consumption of energy, the relevance of the creation and rational use of storage devices is growing. Quite a few types of storage devices have already been created, some of them are quite widely used, many are still at the testing stage, but have good chances for development and integration into power systems of various types. The article attempts to analyze the main types of energy storage devices, which differ from each other in the way of accumulation, energy, type of energy, storage time, accumulated power, etc. and summarizes their main characteristics in order to compare them with each other.

The results obtained in this article will allow us to pre-select a certain type of energy storage device depending on the power system that is being designed, which will make it possible to most rationally manage energy flows in the process of transmission, energy storage and its supply to the grid.

Key words: *energy storage, accumulator, generation, power system, energy consumption.*

References

1. SBC, SBC Energy Institute Analysis based on US DOE Energy Storage Program Planning Document (2011).

2. How flywheel (kinetic) energy accumulators are structured and work. [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: http://electricalschool.info/energy/2334-mahovichnye-kinetheskie-nakopiteli-energii.html

3. Aneke M, Wang M. Energy storage technologies and real life applications and a state of the art review. Apple Energy 2016; 179:350-377.

4. S. Koohi-Kamali, V.V. Tyagi, N.A. Rahim, N.L. Panwar, H. Mokhlis, Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 25 (2013) 135 - 165.

5. Hydro-accumulating power station [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Hydroaccumulative_electrical_station

6. Gravity battery [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: https://cutt.ly/sCRKGMV

7. Gravitational energy storage [Electronic resource]. – 2021. – Access mode: https://habr.com/ru/post/377425/

8. Energy Vault EV1 CDU Production Bricks & Hooks 0031 [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: https://www.energyvault.com/photo-gallery

9. National association of oil and gas service [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: https://nangs.org/news/renewables/90-metrovyy-gravitatsionnyy-akkumulyator-reshit-problemy-alyternativnoy-energetiki

10. F. Schüth, Energy Storage Strategies, in: R. Schlögl (Ed.) Chemical Energy Storage, Hubert & Co. GmbH & Co. KG, Göttingham, Berlin, 2013, pp. 35 - 47.

11. T.M.I. Mahlia, T.J. Saktisahdan, A. Jannifar, M.H. Hasan, H.S.C. Matseelar, A review of available methods and developments on energy storage; technology update, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 33 (2014) 532 - 545.

12. J.M. Carrasco, L.G. Franquelo, J.T. Bialasiewicz, E. Galvan, R.P.C. Guisado, M.A. Prats, J.I. Leon, N. Moreno-Alfonso, Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A survey, IEEE Transactions on Industrial Electronics 53 (2006) 1002 - 1016.

13. A.S. Biris, A.R. Biris, D. Lupu, D. Buzatu, J. Darsey, M.K. Muzumder, Use of carbon nanostructures for hydrogen storage for environmentally safe automotive applications, in: Proc. 39th IEEE-IAS Annual meeting, 2004, pp. 953 - 956.

14. Electrochemical energy storage (accumulators) and electrochemical generators (fuel elements) [Electronic resource]. – 2021. – Access mode: https://cutt.ly/ECRLr61

15. Ionistor [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ionistor

16. S. Schoenung, J. Eyer, J. Iannucci, S. Horgan, Energy storage for a competitive power market, Annual Reviews of Energy and Environment, 21 (1996) 347 - 370.

17. M. Zukowski, Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating application, Energy Conversion and Management, 48 (2007) 155 - 165.

18. Cryogenic energy storage [Electronic resource]. – 2022. – Access mode: https://buildwiki.ru/wiki/Cryogenic_energy_storage

19. A.I. Fernandez, M. Martinez, M. Segarra, I. Martorell, L.P. Cabeza, Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage, Sol Energy Mater Sol Cells, 94 (2010) 1723 - 1729.

20. T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y. Zeraouli, Energy storage: Application and challenges, Solar Energy Materials & Solar Cells, 120 (2013) 59 - 80.

21. H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, Progress in electrical energy storage systems: A critical review, Progress in Natural Science, 19 (2009) 291 - 312.

22. This Compressed Air Grid 'Battery' Is an Energy Storage Game Changer - 2022. - Access Mode: https://www.popularmechanics.com/science/green-tech/a36300986/compressed-air-grid-energy-storage- system/

23. Compressed Air Energy Storage (CAES) – 2022. – Access mode: https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/compressed-air-energy-storage-caes/

24. P. Pardo, A. Deydier, Z. Anxionnaz-Minvielle, S. Rouge, M. Cabassud, P. Cognet, A review on high temperature thermochemical heat energy storage, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 32 (2014) 591 - 610.

25. Lithium-ion battery - 2022. - Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery

26. Battery 18650 Li-on – 2022. – Access mode: https://rozetka.com.ua/ua/vipow_icr18650_1200mahtt/p315879427/?gclid=CjwKCAjw6fyXBhBgEiwAhhiZsig_ZU6BRKiiI33GE638O5fp14NaDrSsBiTg56Ao5DnPZZE5MaAvDaKBow

27. Energy storage systems: is there a future in Ukraine? – 2022. -Access mode: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/sistemi-nakopichennya-energii-chi-ie-majbutnie-v-ukraini/

Надійшла 27.09.2022
Received 27.09.2022