

УДК 621.311(477)

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.131>

© Я.В. Ярошенко¹, О.В. Бобров², Д. Ципленков¹, В.Ю. Кузнецов³, О.В. Саввін³

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Фаховий коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського Національного університету імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

³ Український університет науки та технологій, Дніпро, Україна.

СИСТЕМИ АКУМУЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

© Ya. Yaroshenko¹, O. Bobrov¹, D. Tsyplenkov¹, V. Kuznetsov³, O. Savvin³

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Rocket-and-Space Engineering College of Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

³ Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS

Мета. Аналіз стану систем накопичення енергії у світі, визначення перспектив їх розвитку та порівняння методів акумуляції електроенергії.

Методика. Теоретичне обґрунтування і порівняння систем накопичення електроенергії з урахуванням реальних показників енергосистеми України станом на кінець 2021 року.

Результати. Показують, що існує потреба в теоретичному і практичному підході до впровадження акумуляційних потужностей задля підтримання балансу електроенергетичної системи. В результаті проведеного огляду найбільш поширених накопичувачів електроенергії, було виділено особливості їх в цілому. Всі вони володіють як перевагами так і недоліками. Проте, в комплексному підході до їх просування, можна отримати найбільший результат з очікуваних. Найперспективнішим, з точки зору ланцюга: екологічність – вартість – актуальність – необхідність, є – водень.

Наукова новизна. Полягає у тому, що розглядається можливість комбінованого використання різнотипових акумуляторних систем з різними характеристиками.

Практичне значення. Можливість впроваджувати на промисловому рівні акумуляторні потужності задля більш ефективної децентралізації енергетичного сектору держави. На сьогодні, без необхідної інфраструктури, переоснащень існуючих енергоприймаючих і розподіляючих станцій, широкомасштабних інвестицій, водень не може стати ефективним, настільки, наскільки здатен, адже, енергія має рухатися від дроту до газу, а потім знову до дроту. Тобто існує певний вектор енергії який постійно перебуває в «перехідному» положенні. Саме тому зараз, енергоефективність на кожному з рівнів перетворення водню в електроенергію падає. Ефективність, за звичайних, нормальних умов «вчорашнього» дня в даному випадку складе близько 80%. Для транспортування водню, необхідно його стиснути і охолодити. На цей процес йде до 10-15% енергії. Для подальшого перетворення в електричну енергію, витрачається тепла енергія, і, в результаті з ККД в ~65-70% можна отримати електроенергію.

Ключові слова: електроенергетика, відновлювальні джерела енергії, електростанція, електропостачання, альтернативна енергетика, рентабельність, маневреність, коефіцієнт, акумуляція, водень.

Вступ. Піковий період будівництва та впровадження потужностей відновлюваної енергетики в 2015-2019-х роках на території України, що були у більшості своїй виражені в якості генерації енергії з сонячного світла приніс нові виклики разом з інноваційним на той момент підходом до генерації електроенергії. На заміну питання стосовно кількості генерації електроенергії, прийшло питання стосовно її зберігання і використання в найбільш необхідний момент. Ситуація з масштабним підключенням до енергомережі України новоутворених об'єктів відновлюваної енергетики поширив прояв цікавості в питаннях проблематики з маневреністю енергомережі, які почали з'являтися у зв'язку зі зростанням кількості проблем з перевантаженнями, транспортуванням електроенергії застарілими магістралями, збільшенням кількості споживачів енергії та іншими, менш помітними ситуаціями.

Однією з найбільш важливих частин програми 12-го Українського енергетичного форуму в 2021 році [1], була Сесія №1 та її сегмент присвячений плану дій в енергетичній галузі в цілому. На її продовженні в 2022 році, на 13-му енергетичному форумі, повинні були [2] представлені оновленні програми розвитку енергетичного сектору України [3], процесу декарбонізації, диверсифікації та впровадження нових технологій в галузі альтернативної енергетики [3]. Одним з можливих технологічних рішень на серйозному рівні розглядалося введення в енергомережу значної кількості акумуляційних об'єктів. Таким чином, можна спостерігати планомірний розвиток з часу введення в дію «Енергетичної стратегії 35» [4] від 18 серпня 2017 р. до моменту початку повномасштабної війни України та Росії, яка, слід зазначити, спонукала в більш короткий проміжок часу, завершити процес інтеграції української енергосистеми з системою країн ЄС. Повертаючись до «ЕС-35», фундаментом якої можна вважати Український енергетичний форум 2016-2017 років, потрібно зауважити, що гаслом того часу було: «Системи акумуляції електроенергії, один з варіантів швидкого вирішення проблем відсутності впровадження додаткових потужностей для послуг ОЕС України» [4]. Отже, при вищезгаданому, можна зробити певний висновок, що для створення «подушки безпеки» в рамках енергосистеми, можна використовувати акумуляційні потужності, про різновиди і можливості яких піде далі мова.

Основна частина

Енергетична система та її маневреність. В традиційному розумінні енергетична система являє собою комплекс об'єднаних електроенергетичних пристроїв, котрі працюють у синхронізованому алгоритмі задля вироблення, передачі, розподілення та споживання електроенергії [5]. В Україні також діє таке поняття, як – Об'єднана енергетична система України, згідно до затвердженої програми Кабінету Міністрів України від 12.09.2011 р. (з урахуванням всіх чинних норм та змін), котра включає в себе весь комплекс енергосистеми який перерахований вище.

У своїй «базовій» комплектації, енергосистема не враховувала наявність акумуляторних потужностей, і, основну роль у балансуванні та відповідно акумулюванні [6] відігравали комплекси ГЕС та ГаЕС. З позитивних опцій згаданих

об'єктів зазвичай прийнято виділяти високу маневреність потужностей гідроелектростанцій та високий рівень екологічності при експлуатації. Коли мова йде про маневреність, слід розуміти, що це означає – можливість в повному обсязі контролюючи ситуацію, в певних проміжках часу змінювати кількість виробництва електроенергії. Наприклад, зменшити її виробництво в період з 11:00 до 15:00 і, навпаки, збільшити з 15:00 до 22:00. Основна проблема даного технічного моменту полягає в тому, для більшості енергосистем у світі (і для української в тому числі) характерний принцип одномоментності виробництва [7], тобто, в один проміжок часу виробляється рівно стільки енергії, скільки її потрібно спожити всім приймачам в цей самий проміжок часу. Отже, виробники електроенергії повинні в залежності від вимог диспетчера регулювати свої потужності. Основним каскадом добового регулювання кількості виробленої електроенергії в Україні були і залишаються теплові електростанції. Адже частка ГЕС та ГАЕС в українському енергетичному секторі доволі низька (рис. 1) – це трохи більше 7%, а атомні електростанції у своєму сучасному становищі не здатні виконувати подібні функції.



Рис. 1. Структура виробництва електроенергії в Україні

У спробі знайти відповіді на запитання можливості покращення акумуляційних можливостей ОЕС України, звернемося до роботи [8], де автори А.В. Івахнов, О.П. Лазуренко та С.О. Федорчук дали короткий огляд своїм працям над питаннями щодо можливостей та використання систем акумуляції електроенер-

гії. Проаналізувавши дану роботу, слід погодитися, що для більш детального розгляду можливостей покращення і дослідження питання акумуляції необхідно розробити відповідну комп'ютерну модель та математичну структуру. Також, слід здійснити перегляд такого алгоритму, як «Енергоринок», адже в його нинішній структурі немає місця широкому використанню нових видів накопичувачів електроенергії. Проте, сучасний стан справ в Україні, з урахуванням повномасштабної війни, не дозволяє зосереджуватися на питаннях розробки нових методів розрахунку потужності балансування, практичного встановлення різного роду накопичувачів у різних вузлах розподілення та інших, важливих моментів для переходу на новий, більш якісний та високий рівень маневреності.

Саме тому, далі пропонується теоретичне обґрунтування і порівняння систем накопичення електроенергії з урахуванням реальних показників енергосистеми України до кінця 2021 року.

Системи накопичення електроенергії. Отже, повертаючись до існуючих систем накопичення електроенергії, ГЕС та ГаЕС, слід внести розуміння стосовно того, що основною проблемою даного виду акумулюючих та маневруючих потужностей – є складність вибору майданчика для будування. Процес будування гідроелектростанцій також несе за собою такі ситуації, як: затоплення великих площ придатних до обробки та родючих земель, процес деривації [9]; також питання викликає і підхід до маневреності, адже в умовах України, станом на кінець 2021 року, (див. рис. 1) потужності ГЕС та ГаЕС недостатньо для регулювання миттєвих стрибків потужності в енергосистемі, а з урахуванням постійного зростання потреб населення в електроенергії, вищезгадані проблеми з будівництвом не дозволяють використовувати ГЕС як основне джерело маневруючих потужностей.

Проте в балансуванні енергосистеми може прийняти участь будь-який виробник електроенергії (будь-яка електростанція), проте існує велика кількість обмежень щодо участі через специфіку роботи, тощо.

В таблиці 1 наведено порівняння можливостей участі в регулюванні різних типів електростанцій в Україні.

Різновиди сучасних систем накопичення електроенергії. Системи накопичення електроенергії або ж – акумулювання, повинні вирішувати питання стабільного енергозабезпечення від малих домогосподарств до рівня цілої держави. На законодавчому рівні, цей вектор розвитку, було прийнято в рамках стратегії «ЕС-35». Далі, цитата: «Положення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», згідно розпорядження КМУ № 497-р від 06.06.2018 «Про затвердження плану заходів з реалізації етапу «Реформування енергетичного сектору (до 2020 року)» повинна забезпечити досягнення основної мети – підвищення ефективності освоєння енергії відновлюваних джерел та підвищення стабільності енергосистеми України за рахунок впровадження систем акумулювання [10, 11]. Проте, 2020 рік минув, а суттєвих зсувів в рамках даної фрази не відбулося.

Таблиця 1

Можливості регулювання електростанцій різних типів [12]

Вид електростанції	Час входження в режим повної потужності, годин		Мінімум навантаження, % Співвідношення номінальної потужності, відносно мінімально допустимої	Діапазон регулювання, %
	З гарячого стану	Після зупинки		
АЕС	60	390-660	90-85	10-15
ТЕС	20-50	90-180	80-70	20-30
ГТУ	0,5	15-30	0	100
ГЕС	0,25-0,5*	1-2	0	100
ГаЕС	0,25-0,5*	1-2	0	200**

Примітка: *0,25-0,5 – в момент роботи при холостому обертанні;

**200 % - через те, що ГаЕС працюють в двох режимах

Акумуляція електроенергії, в даному випадку, потрібна задля того аби нівелювати нерівномірність вироблення та споживання електроенергії в сезонних та добових природних/неприродних умовах [11], а також з урахуванням розташування генеруючих потужностей. На сьогодні процес акумуляції також важливий з точки зору етапу децентралізації в Україні. Також після завершення війни в Україні, слід очікувати новий виток цікавості до відновлюваних джерел енергії. Саме, з міркувань перерахованих раніше, виникає необхідність розглянути перспективи використання певного списку основних різновидів систем накопичення електроенергії:

Електромагнітні та електростатичні накопичувачі.

Механічні накопичувачі.

Електрохімічні накопичувачі.

Розглянемо їх особливості.

Електромагнітні та електростатичні накопичувачі. Підвид накопичувачів, такий клас як електромагнітні або електростатичні накопичувачі, включає в себе можливість довготривалого накопичення, так звані “SIES” [12]. До цього типу акумуляторів можна віднести:

- конденсатор (електричний),
- суперконденсатор (іоністор), [в деяких випадках вважається і електрохімічним джерелом накопичення],
- магнітний акумулятор.

Як вказано вище, здатні накопичувати електричну енергію в довготривалій перспективі, проте, через їх вартість використання даного типу акумуляторів на промисловому рівні поки що не є рентабельним. Також, через проблематику ви-

бору алгоритмів функціонування накопичувачів та складність лінійного характеру розряду, що не дозволяє використати всю накопичену електроенергію, широкого вжитку даний вид акумуляторів поки що не знайшов.

Механічні накопичувачі. До механічних накопичувачів окрім всім відомих гідроакумуляуючих електростанцій відносяться ще такі:

- супермаховики [13];
- пневмоакумулятори [14];
- гідроакумуляуючі електростанції.

Принцип роботи супермаховика майже не відрізняється від маховика звичайного, в якому момент обертання передається по конструкції до первинного диска, котрий взаємодіє з пружинним елементом всередині. За єдиною відмінністю, супермаховик [14] має здатність накопичити більше енергії за рахунок конструктивного виконання магнітних підшипників та розташуванню частини, що обертається у вакуумі.

Що стосується пневмоакумуляторів [14] – це накопичувачі стислого повітря (або іншого робочого газу) котрі під певним тиском можуть привести в рух, наприклад – пневмопривід.

ГаЕС є традиційним джерелом накопичення електроенергії. Принцип роботи ГаЕС подібний до роботи ГЕС і обумовлений використанням перепаду рівнів води. Єдина різниця полягає в тому, що верхній б'єф це басейн, а гідроагрегати мають два режими роботи: *генерування* – у якості турбіни, що обертається водою з басейна; *накопичення* – у якості насоса, що заповню басейн водою. Прикладом ГаЕС можна назвати, Дністровську ГаЕС, що знаходиться в Україні і розташована на р. Дністер. В планах, після завершення останньої черги будівництва, ця станція буде найпотужнішою в Європі та однією з найбільших у світі. Сьогодні ж можна говорити про потужність в 972 МВт в генераторному режимі та 1265 МВт в насосному (три основні агрегати), а в серпні 2021 року, було запущено 4-й агрегат, який дає можливість у генераторному режимі отримати ще 324 МВт [15, 16]. Будівництво Дністровської ГАЕС є невід'ємною складовою Енергетичної стратегії держави до 2035 року [4].

Електрохімічні накопичувачі. Основою електрохімічних елементів є речовини, здатні змінювати свій агрегатний стан. Це ключова особливість, яка дозволяє використовувати такі речовини, як, наприклад сульфат натрію, для акумуляції теплової енергії. Більш детально процеси в електрохімічних акумуляторах розглянуті в [11].

Накопичувачі електроенергії.

Загальні принципи роботи та основні різновиди електрохімічних накопичувачів (акумуляторів) є такими:

- суперконденсатори;
- паливні комірки [14];
- редокс-акумулятори [14];
- акумуляторні батареї [11, 14];
- системні накопичувачі електроенергії [11, 14].

Кожен зі згаданих видів накопичення електроенергії є унікальним в порівнянні з іншими. Кожен має свої особливості.

На підставі відкритих даних [6, 8, 11, 14] накопичувачі електроенергії розглянемо позитивні та негативні сторони використання накопичувачів електроенергії. Переваги:

- можливість швидкого встановлення і введення в експлуатацію;
- майже відсутність часу переходу між режимами розряд/заряд (в основному залежить від швидкості комутації інших пристроїв), може сягати навіть 0,1 с.;
- новітні технології дозволяють вже зараз використовувати накопичувачі, що практично не шкодять навколишньому середовищу;
- переваги в модульності конструкції, які дозволяють швидко додавати нові елементи, транспортувати заряджені модулі, та ін.;
- відсутність рухомих частин;
- автоматизованість робочих режимів, що зменшує вплив фактору людини.

До негативні сторони:

- фактично відсутні промислові можливості утилізації. Сам по собі процес утилізації це дуже тривале питання, особливості якого в основному впираються в шкоду навколишньому середовищу та екологічні небезпеці;
- частина акумуляторів, з певними хімічними структурами та фактором використання є токсичними не лише для навколишнього середовища, а й для людини взагалі, що погіршує умови експлуатації та ризики використання;
- обмежена кількість циклів заряду/розряду.

Одним із найголовніших чинників будь-якого джерела накопичення електроенергії є співвідношення тривалості розряду до потужності, що джерело здатне видати/накопичити. Спеціалісти фірми «Siemens» провели повний аналіз всіх з вище перерахованих джерел, і, на основі їх даних можна побудувати діаграму, наведену на рисунку 2.

Візуально, можна зрозуміти, що ГаЕС мають найбільш потужні показники і саме тому, саме гідроелектростанції (акумуляторні) відіграють найбільш важливу роль в системі промислової акумуляції електроенергії. Та поруч з ними, як не дивно, розташувались водневі акумулятори. Щоб більш детально побачити наскільки вони дійсно знаходяться поруч, пропонується до розгляду графік (рис. 3).

В житті практично кожної людини присутні представники електрохімічних накопичувачів. Це можуть бути різного роду акумулятори для телефонів, музичних пристроїв та взагалі всі елементи котрі живлять портативні прилади. Звичайно, з точки зору електроенергетики в промислових масштабах це системи накопичення електроенергії з зовсім іншими параметрами, характеристиками, з набагато більшими ємнісними показниками, тощо.



Рис. 2. Співвідношення тривалості розряду до потужності



Рис. 3. Графік співвідношення тривалості розряду до потужності

Найбільш уживаними за градацією електроліту прийнято вважати такі акумуляторні батареї [11, 14-16]: кислотно-лужні, залізно-нікелеві (NiFe), нікель-кадмієві (NiCd), нікель-водневі (NiH₂), нікель-металогібридні (NiMH), літій-йонні (Li-ion), натрій-сульфатні (NaS), срібло-цинкові (AgZn), натрій-йонні (Na-ion). В цей перелік звичайно можна було включити ще, щонайменше 10 різних типів акумуляторів, проте зупинимося на найбільш поширених. Слід зазначити, що за функціями (акумуляування електроенергії) дані накопичувачі хоч і схожі, та от

за параметрами і сферою застосування – відрізняються. В табл. 2 вищезгадані елементи відсортовані по факторах використання [17].

Таблиця 2

Використання накопичувачів електроенергії

Промислова електроенергетика	Теоретичні дослідження	Сфера побуту
Ліній-іонні АК	Гібридно-метальні	Кислотно-лужні
Нікель-кадмієві	Нікель-водневі	Залізо-нікелеві
Натрій-іонні	Срібло-цинкові	

Отже, очевидно, що кожен з представлених видів накопичувачів володіє як своїми перевагами, так і недоліками. Проте, використання технологій зберігання електроенергії, особливо комбінуючи їх з використанням ВДЕ, може подарувати таку омріяну незалежність людству від викопного палива. В 2016 році, фахівці з міжнародного агентства з питань відновлюваної енергетики «Irena», провели дослідження [18] у співробітництві з Державним департаментом енергетики США, стосовно використання подібних технологій зберігання електроенергії на різних етапах вироблення, транспортування та аварійних питаннях в області електроенергії.

За допомогою аналізу подібної інформації можна зробити висновок про можливість і перспективи використання тих чи інших накопичувачів в умовах сучасного становища енергосистем (табл. 3). Звичайно, після закінчення повномасштабної війни України проти російських загарбників, наша держава повинна стати дуже інвестиційно привабливою, включно з енергетичним комплексом. Тому, слід вже зараз розуміти які перспективи у встановленні накопичувачів електроенергії.

Таблиця 3

Можливості використання технологій зберігання електроенергії в різних сегментах енергосистеми

Технологія накопичення	ВДЕ (промисловий сектор)	Традиційна енергетика	ВДЕ, Приватний сектор	Передача електроенергії	Розподіл електроенергії
ГаЕС	Розвивається	Впроваджено	Неможливо	Можливо	Розвивається
ПАЕС	Розвивається	Впроваджено	Неможливо	Можливо	Розвивається
Електрохімічні	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Можливо	Можливо
Електромагнітні	Розвивається	Неможливо	Розвивається	Можливо	Можливо
Хімічні	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Неможливо
Теплові	Розвивається	Впроваджено	Розвивається	Розвивається	Розвивається

Звичайно, в певних умовах ця інформація може трохи відрізнятись від реальності, проте, слід розглядати ці дані як фрагмент для ознайомлення. Кольорова сегментація дає зрозуміти, що велика кількість розробок та пошуків нових методів впровадження та покращення вже існуючих накопичувачів найближчим часом зможе спричинити справжній фурор в енергетичному секторі. Особливо, увагу слід звернути на електрохімічні та хімічні технології, адже при правильному використанні і раціональному підході, вони внесуть велику кількість екологічно-чистих, швидкодіючих, безпечних технологій в наше з вами життя. Вже сьогодні створені автомобілі на базі водневого двигуна, і, саме ця речовина – водень, вважається найбільш перспективною з точки зору розвитку нових технологій накопичення та заміні традиційним носіям енергії. Саме тому, пропонується огляд сегменту який включає себе воднева енергетика.

Водень. Водневе акумулювання. Воднева енергетика.

Зберігання енергії можливо з використанням різних фізичних принципів перетворення електричної енергії для її акумулювання, які детально були розглянуті в попередніх розділах. Найбільш перспективним представляється використання водневої енергетики. Адже,

– по-перше: агрегатний стан водню, відноситься до категорії газоподібних, а це означає, що можна виконувати велику кількість маніпуляцій з ним, стискати, спалювати, охолоджувати, тощо;

– по-друге, водень відноситься до найбільш перспективних накопичувачів, згідно до таблиці 3. Ці та інші фактори роблять водневу енергетику в цілому однією з найбільш привабливих галузей в майбутньому.

Воднева енергетика – це сукупність технологій виробництва, транспортування, акумулювання і використання універсального вторинного енергоносія – водню.

У концепції водневої енергетики - водень доповнює собою найважливіший вторинний енергоносіє – електроенергію, енергетичне використання водню визначається можливістю екологічно чистого отримання електроенергії і тривалого зберігання без втрат. Проблема використання водню, як перспективного екологічно чистого та універсального енергоносія і акумулятора енергії в різних галузях народного господарства, була сформульована ще на початку 70-х років минулого століття після першої нафтово-паливної кризи. Зрозуміло, що необхідна розробка нових екологічно безпечних енергетичних технологій, заснованих на використанні відновлюваних джерел енергії, атомної енергії, вугілля та універсальних екологічно чистих енергоносіїв, здатних замінити невідновлювані енергоресурси в міру їх виснаження і подорожчання [3, 4].

Водень, в якості вторинного енергоносія знаходить своє місце в глобальній стратегії сталого енергетичного розвитку в 21-му столітті, яка протистоїть викликам незворотних змін клімату, нестійкому виробництві нафти і забрудненню навколишнього середовища. Водень може грати ключову роль в відстанях середньої протяжності і магістральних перевезеннях автомобільним і залізничним транспортом, в прибережному і міжнародному судноплаванні, в авіаційних пере-

везеннях, а також в довгостроковому і сезонному зберіганні електроенергії в мережах, належних в основному на локальні поновлювані джерела енергії і місцеву сировину. Себто, безпосередньо вплинути як на локальні проблеми з електропостачанням, так і на глобальні.

В поєднанні з ВДЕ, водень, може використовуватися як ланцюг збереження, транспортування і використання акумульованої енергії в подальшому. Подібна система розглядається в якості буфера між електричною мережею і ВДЕ і призначена не тільки для довготривалого зберігання енергії, а й для згладжування суттєвих пульсацій, пов'язаних зі змінним характером ВДЕ [6, 19]. Сьогодні, коли ми чуємо поєднання слів водень і ВДЕ в одному реченні, і, якщо в його контексті присутнє поняття акумуляції, то зазвичай мова йде про – електроліз. Це розкладення речовин на декілька інших шляхом пропускання через них постійного електричного струму. Саме постійний електричний струм, до його перетворення на інверторі є основним носієм енергії на СЕС.

Зростання інтересу до водневих енергетичних технологій останнього часу в великій мірі пов'язані з успіхами в розробці і створенні електрохімічних генераторів (паливних елементів), що перетворюють водень і кисень повітря в електричну енергію з високим ККД. Проте, разом з тим - водень – найбільш поширений елемент на землі та поза нею. У чистому вигляді його майже немає, тож видобувати його потрібно через хімічні реакції. Відповідно, електроліз для цього нам і потрібен.

Потім використання його може бути абсолютно різне, адже якщо водень, перетворити у теплову або електричну енергію, буде мало або жодних прямих викидів діоксиду вуглецю або інших забрудників в атмосферу. Саме тому водень почали порівнювати із нафтою, газом або іншим типом палива. Це не означає, що воднем будуть закривати кожну потребу в енергетиці. Мова перш за все про процеси, які важко піддаються електрифікації, наприклад у металургії чи важкому автотранспорті [20]. Що стосується інвестицій, то в липні 2020 року Європейський союз прийняв власну «Водневу стратегію». За цією стратегією Україні відводиться місце пріоритетного партнера у виробництві та експорті водню, зокрема до Німеччини. Для Німеччини Україна приваблива, перш за все, як експортер водню. Воднева стратегія ЄС передбачає будівництво 40 ГВт електролізерів за межами союзу, а саме у Північній Африці та Україні [20], отже вже сьогодні, ми бачимо перспективи водневої енергетики в Україні та світі загалом.

Тому, ґрунтуючись вищевказаної інформацією, пропонується виділити основні властивості пов'язані з воднем, як акумулятором та носієм енергії:

- водень, можна використовувати в якості портативних джерел живлення;
- можна використовувати, в якості систем очищення водню різного походження, наприклад біоводню, в автономних системах енергозабезпечення або когенераційних (виробництво електроенергії, тепла і водню);
- можна використовувати, в якості джерела збереження електроенергії для стаціонарних та автономних енергоустановок на основі сонячної і вітрової енергій.

Також до переваг слід відносити:

- менші інвестиції в будівництво, за рахунок розподілення енергії та потужності збільшення ефективності системи, і як наслідок якість електричної енергії;
- збільшення терміну зберігання енергії та терміну роботи системи, за рахунок оптимізації роботи та зниження динамічного напруження;
- можливість використання комбінованих систем накопичення електроенергії в поєднанні з воднем / іншим, тощо. Схожі поєднання застосовуються в автомобільній техніці – «суперконденсатор/акумулятор».

Так як водень можна запасати в балонах, то представляється можливість акумулювати енергію у вигляді пального водню, який за необхідністю, повинен бути витрачений на роботу теплового двигуна. На сьогодні технології одержання водню: парова конверсія метану або його часткове окиснення, газифікація вугілля, піроліз, електроліз є енергозатратним. Для широкого поширення виробництва водню електролізом необхідна дешева електроенергія, яку можна отримувати від нетрадиційних джерел, а також з ТЕС і АЕС в години провалу навантаження. Проте, звичайно, з точки зору «Водневої стратегії», та Стратегії сталого розвитку – екологічність виходить на перший план, тому, використання об'єктів. Водень є оптимальною сировиною для паливних комірок, адже в них, відбувається пряме перетворення хімічної енергії в без значних втрат, пов'язаних з необхідністю віддавати частину підведеної теплоти в навколишнє середовище за другим законом термодинаміки, тому паливні комірки мають високий ККД. При їх роботі практично не відбувається забруднення навколишнього середовища. За принципом дії робота паливних комірок, до речі, протилежна електролізу води.

Висновок. В результаті проведеного огляду найбільш поширених накопичувачів електроенергії, було виділено особливості їх в цілому. Всі вони володіють як перевагами так і недоліками. Проте, в комплексному підході до їх просування, можна отримати найбільший результат з очікуваних. Найперспективнішим, з точки зору ланцюга: екологічність – вартість – актуальність – необхідність, є – водень.

На сьогодні, без необхідної інфраструктури, переоснащень існуючих енергоприймаючих і розподіляючих станцій, широкомасштабних інвестицій, водень не може стати ефективним, настільки, наскільки здатен, адже, енергія має рухатися від дроту до газу, а потім знову до дроту. Тобто існує певний вектор енергії який постійно перебуває в «перехідному» положенні. Саме тому зараз, енергоефективність на кожному з рівнів перетворення водню в електроенергію падає. Наприклад, 1000 Вт електроенергії, що виробить СЕС, може бути перетворена на водень шляхом електролізу. Ефективність, за звичайних, нормальних умов «вчорашнього» дня в даному випадку складе близько 80%. Якщо ми маємо потім транспортувати цей водень, необхідно його стиснути і охолодити. На цей процес піде ще 10-15% енергії. Потім, щоб перетворити його знову в електричну енергію, ми знову витратимо якусь кількість теплової, і, з коефіцієнтом в ~65-70% зможемо отримати електроенергію.

Отже, ми бачимо, що існують як плюси, так і мінуси акумуляування електроенергії шляхом перетворення її у водень. Проте, серед позитивних рис, окрім вже згаданих, які спонукають розвивати дану тему, слід виділити такі, як:

- після електролізу ми отримуємо низький вміст горілих речовин і кисню (менше 2%);
- широкий діапазон потужності створених експериментальних моделей (від 20 кВт до 50 МВт);
- можливість роботи як на газоподібних, так і на рідких компонентах окислювача;
- в порівнянні з іншими акумуляторами, не мають жодних викидів, адже результатом роботи водневих є електроенергія, вода та тепло.
- можуть бути використаними в якості паливних комірок (див. вище) як для маленьких електронних пристроїв так і в якості великих систем накопичення електроенергії.

Перелік посилань

1. 12-й Міжнародний Український енергетичний форум Інституту Адама Сміта» (n.d.). Retrieved July 22, 2022, from: <https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/novyny-rynku/12-j-mizhnarodnyj-ukrayinskyj-energetychnyj-forum-instytutu-adama-smita/>
2. Український енергетичний форум. (n.d.). Retrieved July 22, 2022, from: <https://chamber.ua/wp-content/uploads/2022/02/UEF22-prohrama.pdf>
3. Проект розробки «Української енергетичної стратегії до 2050 року». (n.d.). Retrieved July 22, 2022, from: <https://home.kpmg.ua/uk/home/media/press-releases/2021/07/kpmg-v-ukrayini-vyhrala-proyekt.html>
4. Українська енергетична стратегія 2035. (n.d.). Retrieved July 22, 2022, from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>
5. ДСТУ 3440–06, «Системи Енергетичні» (2006). Державний стандарт України.
6. Бондаренко, В. І. (2005). *Енергетика: історія, сьогодення і майбутнє. Том №3*.
7. Журахівський, А. В., Кінаш, Б.М., & Пастух, О.Р. (2012). *Надійність електричних систем і мереж. Навч. посіб.* Вид-во Львів. Політехніки.
8. Івахнов, А. В., Лазуренко, О.П., & Федорчук, С.О. (2018). Системи акумуляування електроенергії, аналіз можливостей та їх поєднання для застосування в енергосистемі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика надійність та енергоефективність, 10 (1286). 53-59.
9. Сидоров, В. І. (2016) *Технології гідро- та вітроенергетики*. Черкаси.
10. Кудря, С.О. (2020) *Відновлювані джерела енергії*. Інститут відновлюваної енергетики НАНУ.
11. Гребенюк, А.М. (2014) Способи акумуляції електроенергії з нетрадиційних джерел. *Гірнична електромеханіка та автоматика*, 91, 131-136.
12. Andrijanovits, A., Hoimoja, H., & Vinnikov, D. (2012). Comparative Review of Long-Term Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems. *Electronics and Electrical Engineering*, 118(2). <https://doi.org/10.5755/j01.eee.118.2.1168>
13. Wolsky, A. M. (2002). The status and prospects for flywheels and SMES that incorporate HTS. *Physica C: Superconductivity*, 372–376, 1495–1499. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)01057-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01057-2)
14. Akhil, A., Swaminathan, S., & Sen, R. K. (1997). *Cost analysis of energy storage systems for electric utility applications*. <https://doi.org/10.2172/453759>

15. *Стратегічно важливі об'єкти для енергетики та світу. ГЕС та ГаЕС.* (n.d.). Retrieved July 22, 2022, from: https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny_/strategichno-vazhlivi-obekti-dlya-energetiki-ta-ekonomiki-naybilshi-gaes-svitu
16. *Дністровська ГаЕС. Запуск агрегатів.* (n.d.). Retrieved July 22, 2022, from: <https://web.archive.org/web/20210817132640/https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3299147-na-dnistrovskij-gaes-zapustili-cetvertij-agregat.html>
17. Шелест, М. Б., & Гайда, П. І (2014). *Основи будови та експлуатації акумуляторних батарей : навч. посіб.* Сум. держ. ун-т
18. *The International Renewable Energy Agency (IRENA).* (n.d.) Retrieved July 22, 2022, from: <http://www.irena.org/publications/2016/Sep/Innovation-OutlookRenewable-mini-grids>.
19. Скорохода, В.В., & Солоніна, Ю.М. (2015). *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях.* Видавництво «КІМ».
20. *Воднева енергетика: чому про неї так багато говорять і до чого тут Україна.* (n.d.). Retrieved July 22, 2022, from: <https://ucap.io/vodneva-energetyka-chomu-pro-neyi-tak-bagato-govoryat-i-do-chogo-tut-ukrayina/>

ABSTRACT

Purpose. Analysis of the state of energy storage systems in the world, determination of prospects for their development and comparison of electricity storage methods.

Research methodology. Theoretical justification and comparison of electricity storage systems taking into account the real indicators of the energy system of Ukraine as of the end of 2021.

The results. show that there is a need for a theoretical and practical approach to the implementation of storage capacities in order to maintain the balance of the electric power system. As a result of the review of the most common electricity storage devices, their features as a whole were highlighted. All of them have both advantages and disadvantages. However, in a comprehensive approach to their promotion, it is possible to obtain the greatest expected result. The most promising, from the point of view of the chain: environmental friendliness - cost - relevance - necessity, is – hydrogen.

Scientific novelty. Is that the possibility of combined use of various types of battery systems with different characteristics is being considered.

Practical value. The possibility of introducing battery capacities at the industrial level for more effective decentralization of the state's energy sector. Today, without the necessary infrastructure, re-equipment of existing energy-receiving and distribution stations, large-scale investments, hydrogen cannot become effective, as much as it is capable, because energy must move from the wire to the gas, and then back to the wire. That is, there is a certain vector of energy that is constantly in a "transitional" position. That is why the energy efficiency at each of the levels of converting hydrogen into electricity drops. Efficiency, under normal, normal conditions of "yesterday's" day in this case will be about 80%. To transport hydrogen, it is necessary to compress and cool it. This process takes up to 10-15% of energy. For further transformation into electrical energy, thermal energy is consumed, and as a result, electricity can be obtained with an efficiency of ~65-70%.

Keywords: *electric power industry, renewable energy sources, power plant, power supply, alternative energy, profitability, maneuverability, coefficient, accumulation, hydrogen.*