

УДК 621.31+62-69

ТЕХНОЛОГІЇ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ У СКЛАДІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Фіалко Н.М., член-кореспондент НАН України, Тимченко М.П., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

Наводяться результати аналізу основних технологій накопичення енергії (ТНЕ) у перспективних інтелектуальних (на основі *Smart Grid*) системах енергозабезпечення. Представлено дані огляду ряду сучасних проектів цих технологій. Запропоновано декілька класифікацій ТНЕ за такими ознаками, як технологічно-комерційна «зрілість», витрати на впровадження з урахуванням ризиків, ємність накопичувачів, час їхньої реакції тощо.

Приводяться результати аналізу основних технологій накоплення енергії (ТНЭ) в перспективних інтелектуальних (на основі *Smart Grid*) системах енергозабезпечення. Представлены данные обзора ряда современных проектов этих технологий. Предложено несколько классификаций ТНЭ по таким признакам, как технологически коммерческая «зрелость», затраты на внедрение с учетом рисков, емкость накопителей, время их реакции и т.д.

The outcome of the analysis of the main energy storage technologies (EST) for perspective intelligent (based on Smart Grid) energy supply systems are presented. More than 1600 projects of the EST were reviewed. A number of the EST classifications according to technologically commercial "maturity", costs of implementation, risks, capacity of storage devices, time of their response and discharge, etc. are proposed.

Бібл. 29, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: енергозабезпечення, інтелектуальні мережі, технології накопичення енергії, енергетика з низьким рівнем вуглецю.

N – кількість проектів;
 P – потужність

Індекси:

вст – встановлена;
 Σ – сумарна

Скорочення:

АБ – акумуляторна батарея;
ВЕС – вітрова електростанція;
ГАЕС – гідроакумуляційна електростанція;
ГВ – гаряче водопостачання;
ЄС – Європейський Союз;
ІСЕЗ – інтелектуальна система енергозабезпечення;
НВДЕ – нетрадиційні та відновлювані джерела енергії;
НДР – науково-дослідна робота;
ОЕС – Об'єднана енергетична система;
ПЕР – первинні енергетичні ресурси;

СЕС – сонячна електростанція;

СнПГ - синтетичний природний газ;

ТНЕ – технології накопичення енергії;

CAES – Compressed Air Energy Storage (накопичувач енергії стисненого повітря);

DoE – Міністерство енергетики США;

ENTSO-E – Electricity Network Transmission System Operators (electricity);

LAES – Liquid Air Energy Storage (накопичувач енергії зрідженого повітря);

P2G – Power to Gas;

P2P – Peer-to-Peer;

SDB-DoE – DoE Global Energy Storage Database;

SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage (надпровідниковий магнітний акумулятор енергії);

VPS – Virtual Power Stations (віртуальна електростанція).

Вступ

Завдання переходу на безкарбонову енергетику на базі НВДЕ, основу яких складають джерела з природно зумовленим переривчастим надходженням первинної енергії (сонячні, вітрові установки), потребують впровадження засобів накопичення енергії у масштабі потужностей того ж порядку, що і сама генерація. З огляду на це технології накопичення енергії (ТНЕ) набувають ключового значення при скільки-небудь помітних частках ВЕС, СЕС у енергобалансі країни.

При цьому заміщення традиційних (вертикально структурованих) способів генерації і розподілу масштабною децентралізованою генерацією потребує розвитку так званих інтелектуальних (на основі концепції *Smart Grid*) систем енергозабезпечення [1-9]. В Україні керування генерацією здійснюється поки що за командами диспетчерської служби, яка складає баланс потужності енергосистеми згідно з пропозиціями енергогенеруючих компаній та енергозбутових організацій, проводить резервування потужності, складає графіки генерації електроенергії, веде облік виробленої та спожитої

електроенергії, розраховує вартість виробленої енергії¹ та ін. (рис. 1) [10]. Очевидно, що таке регулювання попиту/пропозиції електроенергії, по-перше, не відповідає економічній суті універсальної економічної моделі «попиту/пропозиції», яка описує процес ціноутворення на ринку. По-друге, урівноважування попиту/пропозиції «на добу вперед», що відповідає описаній схемі керування генерацією, є неефективним енергетично і економічно.

Ефективно інтегрувати зростаючі потужності децентралізованої генерації з різнорідними НВДЕ можливо на основі ІСЕЗ. Така інтеграція потребує надання кінцевим споживачам енергії функцій активного споживача. При цьому існуючі енергетичні системи, у тому числі електричні і теплові мережі, об'єднуються в межах інтелектуальних енергетичних систем.

При створенні в Україні ІСЕЗ, що безпосередньо пов'язано з інтеграцією до ЄС, слід враховувати ряд положень. По-перше, інтегруватися (наприклад, ОЕС України до ENTSO-E) доведеться не в сучасні (рис. 1а),

а в майбутні (з горизонтом від п'яти років) енергетичні інфраструктури ЄС (рис. 1б) з домінуючою роллю ІСЕЗ. Сьогодні їх профіль тільки визначається і перед вітчизняним розробником постає завдання передбачити як характер, так і наслідки прийдешніх масштабних змін енергетики Заходу і розвинутого Сходу. При цьому структура енергетики в техніко-технологічному аспекті має бути перебудована. На рис. 1б наведена спрощена схема гнучкої енергетичної системи на базі третього покоління *Smart Grid*. Відповідно з даними С.П. Денисюка [6], *Smart Grid 3.0* базується не тільки на принципі децентралізованого керування, а ще й на принципі *peer-to-peer* (P2P), тобто рівноправності у контексті ІСЕЗ споживача і постачальника та інших учасників енергетичного ринку, що дозволить реалізувати так званий роумінг енергії, продаж/закупівлю енергії у будь-якого виробника, а виробнику продавати свою енергію будь-якому споживачу. У такий спосіб реалізується закон економіки про урівноваження «попиту та пропозиції».



Рис. 1. Схеми енергозабезпечення у загальному вигляді:

- а) – традиційна схема енергозабезпечення ОЕС України (за [10]) та ENTSO-E, початок 21 століття;
 б) одна із вірогідних схем енергозабезпечення ENTSO-E на базі ІСЕЗ *Smart Grid 3.0* та множин активних споживачів;
 1 – магістральні та розподільчі мережі; 2 – засоби телекомунікацій;
 3 – інфраструктура, яка реалізує архітектуру ІСЕЗ (за [2-4, 6-8]).

По-друге, при модернізації національної енергосистеми слід виходити із сучасних і перспективних особливостей структури генерації енергії, енергоспоживання і енергетичного балансу саме України, а не інших (нехай і розвинутих) країн.

По-третє, при модернізації енергопостачання (енергопостачання у широкому сенсі – теплопостачання й електропостачання) слід засвоїти закордонний досвід. При цьому на особливу увагу заслуговує аналіз розвитку ТНЕ, як ключової складової ІСЕЗ.

Метою даної роботи є аналіз існуючих (комерційно «зрілих») та перспективних технологій накопичення енергії для потреб компенсації нерівномірності добового графіка навантажень енергетичної системи і розвитку

безкарбонової енергетики, в балансі якої велика частка генерації належить нетрадиційним відновлюваним джерелам, що характеризуються переривчастим надходженням первинної енергії та стохастичною поведінкою на тлі добових і сезонних циклів, а також генерацією, розподілом і споживанням енергії в рамках концепції інтелектуальних енергетичних систем.

Основна частина

Стан питання. Характерною рисою сучасної енергетики є зростання частки децентралізованої генерації і, як наслідок, потреба в акумулюванні різних видів енергії (механічної, теплової, електричної, хімічної, електрохімічної, термохімічної, кінетичної, потенційної тощо) та в деяких випадках в її «ітераційній»

¹Тарифна політика не входить до сфери компетенції диспетчерської структури. Ця обставина є одним із інституціональних бар'єрів при впровадженні в Україні майбутніх ІСЕЗ.

трансформації. В країнах з високою часткою НВДЕ-генерації (наприклад, в Данії, Німеччині, Австрії) формуються окремі галузі високотехнологічних накопичувачів енергії.

У США ємність накопичувальних станцій щорічно подвоюється протягом останніх чотирьох років (рис. 2). За даними DoE (Міністерства енергетики США), світова сумарна потужність накопичувачів енергії досягла приблизно 200 ГВт. У ряді країн ресурс накопичувачів енергії (зокрема, їх потужність та сумарна ємність) є помітною часткою електроенергобалансу.

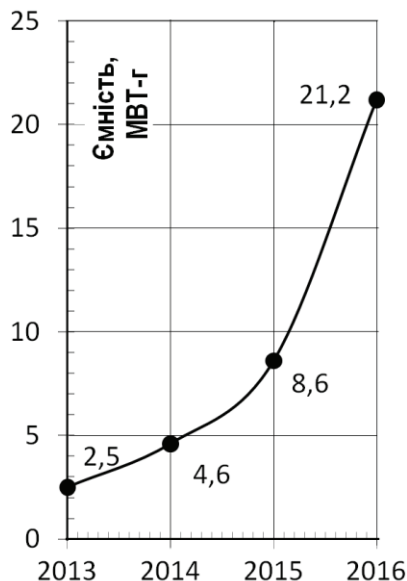


Рис. 2. Динаміка загальної ємності накопичувальних пристроїв у США згідно з [15].

В табл. 1 наведено список найбільш важливих технологій накопичення енергії, упорядкований за ступенем їх поточної технологічно-комерційної готовності («зрілості», доступності) до впровадження. Усі перераховані у таблиці технології перебувають на різних фазах життєвого циклу НДР – на дослідній, впроваджувальній, натурній, демонстраційній, комерційній. Перелік ТНЕ в табл. 1 починається з ГАЕС – найбільш відомих та потужних засобів акумуляції, і закінчується пошуковою технологією термохімічного накопичення¹. Остання ще не вийшла за рамки поодиноких малопотужних і відносно дешевих лабораторних установок. Стадії розробок усіх інших технологій зберігання енергії, що розглядаються, розташовуються у діапазоні між вказаними технологіями.

Щодо аналізу ТНЕ, то на особливу увагу заслуговує підхід, згідно з яким вказані технології відображаються параметричною кривою в площині двох комплексних параметрів – «комерційно-технологічна зрілість» та «потреба у капітальних витратах, помножених на ри-

Таблиця 1. Основні технології і засоби накопичення енергії за [14-24]

1	ГАЕС
2	Акумуляторні батареї Pb-кислотні
3	"Ямні" накопичувачі
4	Накопичення холодної води
5	Підземні накопичувачі
6	Побутові нагрівачі з накопичувачами ГВ
7	Накопичення енергії стиснутого повітря (CAES)
8	Акумуляторні батареї Na-S
9	Накопичення льоду
10	Маховики низькошвидкісні
11	Розплавлена сіль
12	Акумуляторні батареї на основі Li
13	Акумуляторні батареї проточні
14	Маховики високошвидкісні
15	Іоністори (суперконденсатори)
16	Надпровідниковий магнітний акумулятор (SMES)
17	Адіабатичний накопичувач енергії стисненого повітря (CAES)

зики». Даний підхід було нещодавно запропоновано Б. Декурром, Р. Дебарре [16-17] при систематизації численних технологій одержання, накопичення Гідрогену та його подальшого розподілення і енергетичного споживання. Цей підхід поширився на всі види ТНЕ і застосовується в межах даної роботи.

Технології накопичення енергії: загальна інформація та її джерела.

Створення ТНЕ та їх впровадження є, як вже відмічалось, пріоритетним завданням сучасних енергетичних секторів промисловості. Велику увагу цьому питанню приділяє міністерство енергетики США (DoE), яке підтримує проект «DoE Global Energy Storage Database» (далі SDB-DoE) [15], що є докладним і мабуть єдиним з певного погляду виданням. На серпень 2017 року SDB-DoE містила відомості про 1636 проектів і діючих об'єктів ТНЕ зі встановленою потужністю 193,293 ГВт із 76 країн та Антарктиди. База включає добре структуровані за 107 ознаками дані про кожний проект або об'єкт накопичення енергії. В SDB-DoE розглядаються п'ять основних типів накопичувальних технологій: електрохімічна, електромеханічна, накопичення теплоти, накопичення Гідрогену і гідроакумулювальна електростанція (ГАЕС). Вказана база даних регулярно, але нерівномірно оновлюється.

На рис. 3 згідно з базою даних SDB-DoE показано ранжування за убаванням потенціалу ТНЕ перших

¹ Під технологією термохімічного накопичення тут і далі розуміється технологія використання оборотних хімічних реакцій у таких природних та штучних речовинах, як силікагелі, цеоліти та гібридні матеріали [25].

20 країн із загального списку. За наведеними даними першим трьом країнам списку (КНР, Японія, США) належить майже половина світової ємності акумуляції (43,6 %), а першим 16 країнам (≈ 20 % країн списку) відповідає майже 80 % усього потенціалу акумуляції. Останнє співвідношення відображає принцип (емпіричне правило) Парето, згідно з яким для багатьох явищ ≈ 80 % наслідків спричиняються ≈ 20 % причин.

У табл. 2 наведено оглядові дані щодо характе-

ристик проектів технологій акумуляції тимчасових надлишків енергії на електростанціях, у тому числі VPS – віртуальних електростанцій, згідно з SDB-DoE. В представлених матеріалах враховано накопичувачі основних видів енергії: електричної, теплової, хімічної, гравітаційної, потенційної, кінетичної енергії (у тому числі на основі супермаховиків Гуліа) та енергії стисненого повітря.

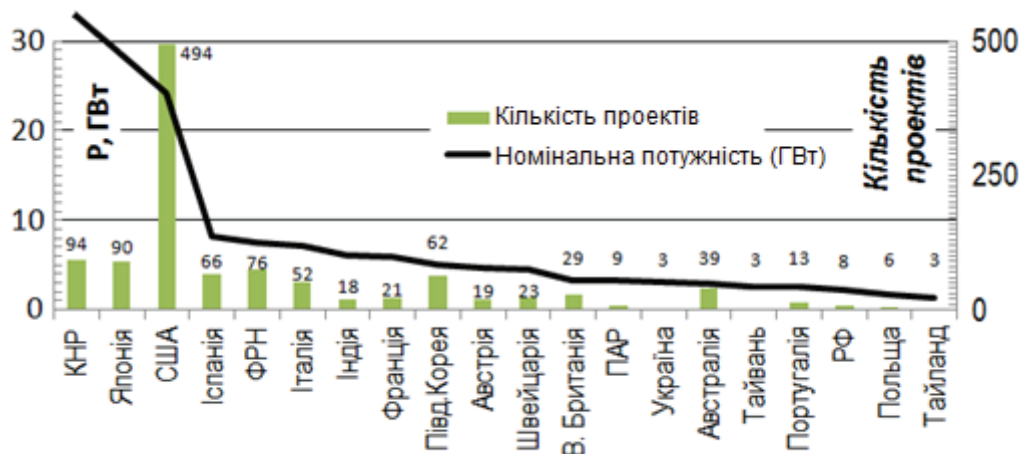


Рис. 3. Ранжування країн за величиною номінальної потужності накопичувальних пристроїв та відомості про кількість проектів з накопичення енергії згідно з SDB-DoE [14].

Таблиця 2. Технології накопичення енергії та встановлена потужність відповідних накопичувачів (за даними SDB-DoE)¹

Тип або приклад		Кількість проектів N		Встановлена потужність P _{вст}	
		N	N/N _Σ , %	P _{вст} , МВт	P _{вст} /P _Σ , %
1.	Електрохімічна (Li-іонна, Pb-кислотна, Na-S,...)	993	60,7	3279	1,7
2.	Гідроакумулявальна (на базі ГАЕС)	352	21,5	183800	95,1
3.	Накопичення теплоти (холоду)	206	12,6	3622	1,9
4.	Електромеханічна (стиснене повітря, маховики)	70	4,3	2616	1,3
5.	Накопичення рідкого H ₂	13	0,8	18	0,0
6.	Накопичення рідкого повітря	2	0,1	5	0,0
Разом		N_Σ=1636	100	P_Σ=193340	100,0

До недавнього часу вважалося, що в енергетиці найефективнішою технологією накопичення енергії є гідроакумулявальна. У світі лівова (95,1 %) частка енергії, що акумуляується, належить ГАЕС. В

перспективі ситуація може кардинально змінитися у зв'язку з розвитком децентралізованої генерації на базі НВДЕ і відповідним зростанням децентралізованих засобів накопичування енергії. В період 2013-2016 років

¹ У базі даних наводяться відомості про проекти, які побудовані або будуть. При цьому не враховано бізнес-проекти, число яких стрімко зростає

у США не було побудовано жодної ГАЕС і весь приріст накопичувальної ємності було одержано виключно за рахунок новітніх високотехнологічних станцій акумулявання. Сьогодні, як можна бачити з табл. 2, бурхливого розвитку набувають технології електрохімічного акумулявання енергії (на базі Li-іонних, Na-S та інших акумуляторів).

Велику увагу аналізу проблеми ТНЕ приділяє відомий центр з вивчення ринку інновацій Блумберга (США) [26-28]. В Євросоюзі останнім часом питаннями розвитку ТНЕ опікується Європейська асоціація накопичення енергії. В середині травня 2017 року асоціація повідомила про початок реалізації проекту «Варіанти трансформації та накопичення» тривалістю 2,5 роки з загальним бюджетом 11,8 млн. євро [29]. Однією з його фокусних точок є пошук інноваційних методів і засобів накопичення енергії та визначення сучасної ролі накопичувачів енергії в системах її передачі.

В даний час майже у кожній європейській країні є центри з розробки та впровадження ТНЕ. В Німеччині – це платформа Agora, у Франції таку функцію виконує Інститут енергії (IE), заснований Schlumberger Business Consulting (SBC) [16-17], тощо.

Класифікації технологій накопичення енергії

Класифікації ТНЕ внаслідок їх складної структури можуть будуватися за багатьма ознаками і запитами. Вдалою, як відомо, вважається систематизація за формалізованими причинно-наслідковими зв'язками. Цьому принципу систематизації відповідає вищезгадане упорядкування сучасного спектру ТНЕ за двома комплексними факторами, запропонованими Б. Декурором і Р. Дебарре.

Перший фактор – фактор «технологічно-

комерційної зрілості», виражає готовність розробки до впровадження. Слід зазначити, що вказана «Оцінка рівня готовності» ТНЕ є не тільки показником її технологічної «зрілості», але й рентабельності використання. На рис. 4. по горизонтальній осі основні ТНЕ (в кількості 20) розміщуються згідно зі ступенем їх завершеності й відповідно їх технологічно-комерційної здатності до впровадження. За цим фактором здійснювалося також упорядкування ТНЕ, наведене в табл. 1.

На вертикальній осі рис. 4 відображаються капітальні інвестиційні витрати на впровадження ТНЕ з врахуванням ризиків різної природи. Тобто на цій осі представлено скориговані фактором ризиків приведені капітальні витрати. Саме вказані витрати слугують певним інтегрованим індикатором при дослідженні, розробці, випробуванні, атестуванні та доведенні розробки до впровадження.

Як видно з рис. 4, крива «зрілості» має дзвіноподібну форму, на якій виділяються три зони, позначені римськими цифрами. Зона I (позиції за номерами 13-20, табл. 1) відповідає фазі науково-дослідних робіт та перевірці принципів дії ТНЕ. Вартість технологій, які відповідають першій зоні, визначається витратами на створення лабораторного або експериментального обладнання, моделювання та проведення комплексу досліджень. В цій зоні налічуються вісім ТНЕ, а саме: технології термохімічного накопичення, синтезу природного газу (СнПГ), накопичення Гідрогену як продукту електролізу, адіабатичного накопичення енергії стисненого повітря (CAES), надпровідникового магнітного акумулявання (SMES), технології на базі іоністорів (суперконденсаторів), високошвидкісних маховиків та проточного акумулятора.



Рис. 4. Крива «зрілості», або розподіл технологій накопичення енергії в площині двох факторів – фактору «комерційно-технологічної зрілості» (вздовж осі «Оцінка рівня готовності») та фактору капітальних витрат і ризиків (вісь ординат), за [16-17, 19-20]:

- АБ – акумуляторна батарея; ВШ та НШ – високо- та низькошвидкісні (маховики);
 СнПГ – синтетичний природний газ; CAES (Compressed Air Energy Storage) – накопичувач енергії стисненого повітря;
 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) – надпровідниковий магнітний акумулятор;
 I – зона ТНЕ, які знаходяться у фазі НДР і ще не тестовані на предмет практичного використання в реальних умовах;
 II – зона ТНЕ, які знаходяться у фазі тестування на демонстраційних та пілотних проектах;
 III – зона ТНЕ, які мають комерційне застосування;
 ○ – ТНЕ з накопиченням теплової енергії; ● – ТНЕ з накопиченням електричної енергії.

Згідно з даними, наведеними на рис. 4, в межах зони I більшому рівню готовності технології відповідають більші потреби у витратах, скориговані фактором ризику. Дійсно, технології з низьким рівнем готовності перебувають на стадії дослідження та лабораторних випробувань, що здійснюються відносно невеликим коштом. Більш високий рівень готовності ТНЕ (область зони I, наближена до максимуму кривої «зрілості» проектів) характеризується значними витратами, які сягають максимуму на межі зон I і II. Це пов'язано з тим, що вартість робіт за такими проектами з їх наближенням до стадії виготовлення натурних та промислових зразків суттєво зростає.

За результатами робіт на цьому етапі (зона I на рис. 4) приймаються рішення щодо подальших планів за проектом. А саме, робиться висновок відносно переведення проекту на стадію промислової апробації в реальних умовах, стадію його удосконалення або консервації. Тобто в решті решт приймаються рішення щодо перспектив комерціалізації проектів.

У цілому технології зони I характеризуються відносно високими ризиками і порівняно невеликою інноваційною привабливістю. При цьому в межах даної зони кількість інноваційних пропозицій зменшується в напрямку від максимуму кривої «зрілості» до мінімального значення готовності проекту на початку даної зони. Так, за даними SDB-DoE, наведеними в табл. 2, в світі налічується 13 проектів щодо технології одержання Гідрогену і лише два проекти щодо одержання синтетичного природного газу. Звертає на себе увагу технологія термохімічного накопичення, що відповідає початку зони I на рис. 4. Перспективи її практичного використання стримуються надто високою вартістю відповідного демонстраційного проекту та невизначеністю майбутньої прибутковості. Слід однак зазначити, що розробка науково-технічних засад даної технології привертає увагу наукової громадськості, про що свідчить значна кількість публікацій [25].

У зоні III (рис. 4) розташовані «зрілі» та відлагоджені ТНЕ. Їх відмінною рисою є те, що вони вже мають широке розповсюдження і сталий комерційний інтерес, тобто характеризуються не тільки технологічною, а ще і «бізнесовою зрілістю». Ризики щодо цих технологій відносно невеликі, питома вартість їх впровадження не перевищує середньогалузевих для енергетики значень, термін окупності є цілком прийнятним, а фінансування проектів – доступним не тільки для державних, але й для інвестиційних фондів.

Зона II за основними ознаками є перехідною між зонами I та III. Її утворюють ТНЕ, які вже перебувають на стадії непоодиноких демонстраційних та пілотних проектів і реалізовані в виробничих умовах. За певних обставин вони можуть приносити відчутний прибуток. Успішні ТНЕ зони II відрізняються тим, що їх питома вартість у часі падає, а відтак, доступність зростає. Відповідно на рис. 4 положення цих технологій зміщується вправо вздовж осі «Оцінка рівня готовності». Яскравим прикладом таких успішних технологій є Li-іонні акумулятори батарей. Їх застосу-

вання у багатьох сферах носить серійний або навіть масовий характер. Так, масовим є використання Li-іонних батарей у інформаційно-технологічному секторі – ноутбуках, стільниковому зв'язку тощо. Наприклад, за першу половину 2017 року телефонів iPhone 6 вироблено вже 10 млн. штук. Їх сумарна постійна потужність впродовж стандартного навантаження, яке тестується протягом 15 хвилин, оцінюється ≈ 280 МВт. Ще одним прикладом застосування Li-іонних батарей є електромобілі. Лнійка електромобілів вже нараховує 5...6 серійних брендів, а на кінець 2016 року їх загальне виробництво досягло 2 млн. При середній ємності автомобільної батареї 50 кВт·год, їх сумарна постійна потужність впродовж 15 хвилин для наявного автопарку відповідає 400 ГВт. Тим не менш спроби створити Li-іонну батарею, прийнятну для енергопотреб домогосподарства, поки що не стали успішними. Обіцяна у 2015 році I. Маском «Гігафабрика», призначена для масового випуску 7-10 кВт·год «Тесла» – подібних акумуляторів для домогосподарств, не тільки не працює, а її будівництво навіть не перейшло до активної фази. Очевидно, ціни на такі батареї при відносно малому терміні їх працездатності, все ще не конкурентні у порівнянні з традиційними засобами енергозабезпечення домогосподарств.

З аналізу даних, наведених на рис. 4, випливає також, що більшу частину розроблюваних технологій становлять технології прямого накопичення електричної енергії – 13 з 20 технологій. Щодо технологій накопичення теплової енергії, то на кривій «технологічної зрілості» їх налічується лише 7. При цьому майже всі технології, пов'язані з накопиченням теплової енергії, відповідають зонам II і III кривої «зрілості», тобто перебувають на стадії практичної реалізації. Переважну ж більшість технологій, що відповідають зоні I даної кривої, тобто пошуковим НДР, становлять розробки електроакумуляторів.

Загальне уявлення про спектр найбільш досліджених ТНЕ надає рис. 5. За принципами накопичення енергії звичайно виділяють п'ять типів технологій, які в свою чергу розподіляються на дві категорії. Першу з них складають технології прямого накопичення електричної енергії з можливістю її подальшого використання. До даної категорії входить два типи технологій: електрохімічна технологія, яка включає класичні та новітні технології акумуляування енергії електрохімічної природи – свинцево-кислотні, Li-іонні, натрієво-сірчані акумулятори, проточні редокс-акумулятори тощо, та електрична технологія, в якій енергія накопичується безпосередньо в іоністорах (суперконденсаторах), в надпровідникових магнітних акумуляторах SMES та ін.

До другої категорії – непрямого накопичення електричної енергії – відносяться інші три типи ТНЕ – механічні, хімічні та термічні. Тут тимчасові надлишки електричної енергії утилізуються шляхом їх перетворення в інші форми енергії, наприклад, у теплоту, хімічну енергію горючих речовин тощо. В деяких випадках можливе рекурентне одержання електричної енергії (наприклад, в ГАЕС).

В технологіях накопичення енергії механічного

типу «надлишкова» енергія використовується для таких цілей: а) накопичення потенціальної енергії шляхом перекачування води до верхнього басейну ГАЕС; б) стиснення повітря (CAES – Compressed Air Energy Storage), у тому числі в адіабатичному варіанті, або його зрідження (LAES – Liquid Air Energy Storage); в) акумулювання кінетичної енергії при розкрутці супермаховиків.

Щодо ТНЕ хімічного типу, то тут йдеться про такі технології, як накопичення Гідрогену, одержаного при електролізі води, а також синтетичного метану, аміаку, метанолу тощо з їх подальшим паливним або іншим використанням.

Технології накопичення енергії термічного типу характеризуються акумулюванням безпосередньо теплової енергії у явній формі (гаряча вода, високотемпературні рідини, розплави солей тощо) або у прихованому вигляді (теплота фазового переходу, гідратація, розчинення та ін.). До технологій даного типу відносяться технології, що базуються на використанні оборотних хімічних реакцій з яскраво вираженим термічним ефектом.

Як вже зазначалося, згідно з базою даних SDB-DoE в світовій енергетичній практиці нараховується понад 1600 проєктів, що стосуються різних типів акумулюван-

ня енергії. Вони складають ринок технологій зберігання енергії, який можна упорядкувати на три групи за ємністю і часом реакції. Крім того можна виділити дві області застосування цих технологій (рис. 6).

Акумуляторні батареї, іоністори та маховики утворюють групу короткотермінових накопичувачів енергії. Їх призначення гасити коливання та флуктуації частоти генерації електроенергії.

Групу середньотермінових накопичувачів складають акумуляторні батареї, зокрема, проточні редокс-акумулятори, ГАЕС, а також термохімічні накопичувачі. Вони беруть участь у стабілізації добових циклів енергопостачання. До групи довготривалих відносяться теплові накопичувачі та перетворювачі електроенергії в горючі гази (Гідроген, P2G та ін.). Як приклад теплових накопичувачів даної групи можна навести сезонні акумулятори ямного типу об'ємом до 100 тис. м³, будівництво яких характерно для Данії, де значною є частка ВЕС.

На завершення слід відзначити, що наведений аналіз та класифікації ТНЕ покликані сприяти орієнтації в їх широкому спектрі та допомагати в обґрунтованому виборі необхідних технічних рішень.

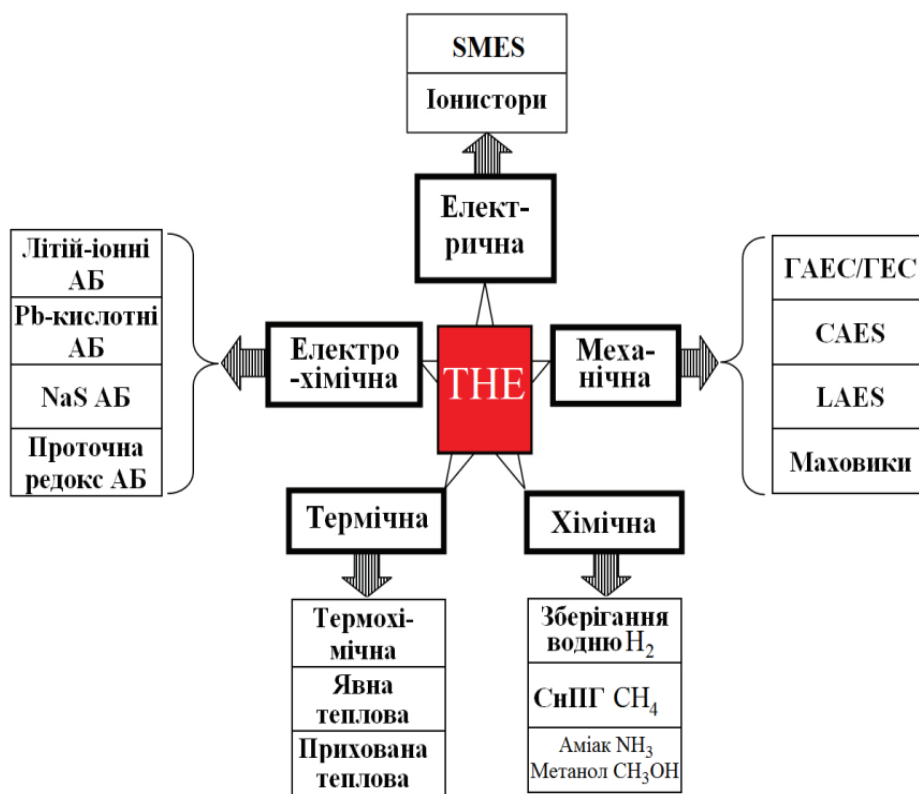


Рис. 5: Основні технології накопичення енергії: АБ – акумуляторна батарея; СнПГ – синтетичний природний газ; CAES (Compressed Air Energy Storage) – накопичувач енергії стиснутого повітря; LAES (Liquid Air Energy Storage) – накопичувач енергії зрідженого повітря; SMES (Superconducting Magnetic Energy storage) – надпровідниковий магнітний акумулятор.

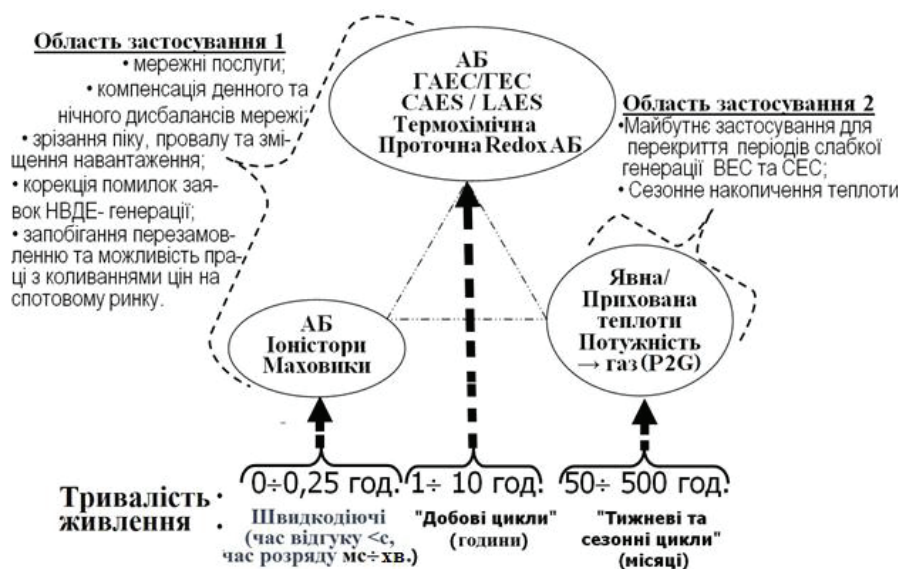


Рис. 6. Часові характеристики та області застосування трьох груп технологій і засобів накопичення енергії.

Висновки

1. Виконаний аналіз технологій накопичення енергії свідчить про те, що даний клас технологій є важливим інструментом розвитку низькокарбонної енергетики на базі НВДЕ та необхідною умовою створення інтелектуальних систем енергозабезпечення.

2. Огляд наявних проектів технологій акумуляції тимчасових надлишків енергії згідно з базою даних SDB-DoE (понад 1600 проектів) показав, що останнім часом найбільш бурхливо розвиваються технології електрохімічного акумуляції (60,7% проектів); стійкий інтерес викликають гідроакумуляційні технології (21,5 % проектів); значна увага приділяється також технологіям накопичення теплоти (12,6 %).

3. Виконано класифікацію технологій накопичення енергії за двома факторами: «технологічно-комерційна зрілість» та інвестиційні витрати на впровадження з урахуванням ризиків різної природи. У вказаних факторах-координатах побудовано так звану криву «зрілості», в якій виділено три основні зони за рівнем готовності технологій. Проведено аналіз характерних особливостей технологій накопичення для кожної зони.

4. Розглянуто спектр традиційних та перспективних технологій накопичення енергії, що поділяються на п'ять типів (електрохімічна, електрична, механічна, хімічна та термічна) з відповідними підтипами. Наведено дані про розподіл розглянутих технологій на дві категорії – прямого та непрямого накопичення електроенергії.

5. Наявні технології накопичення енергії упорядковано у три групи за ємністю та часом реакції: швидкодіючі з тривалістю живлення від часток секунди до кількох десятків хвилин, а також ті, що беруть участь у більш тривалих добових та сезонних циклах енергозабезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кириленко О.В., Якименко Ю.І., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Перетворювачі параметрів електроенергії в Smart системах енергетики // Спец. випуск Праць Ін-ту електродинаміки НАН України (Матеріали І Міжн.і наук.-техн. конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС'10») – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – С. 17–23.
2. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка. 2010, № 6. – С. 44–50.
3. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Баталов А.Г., Денисюк С.П. Технологічний базис інтелектуальної об'єднаної енергетичної системи України // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. Спец. випуск. Ч. 1 – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – С. 20–31.
4. Денисюк С.П. Формування технологічного базису модернізації розподільних електричних мереж на основі концепції SmartGrid // Енергетика: економіка, технології, екологія, 2012, № 1. – С. 90–97.
5. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. // Техн. Електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52–67.
6. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – №1(35). С. 7–21.
7. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы / Под общ. ред. А. В. Кириленко. К.: ІЕД НАН України, 2014. – 409 с.
8. Интеллектуальні електричні мережі: елементи та режими / За заг. ред. О.В. Кириленко. К.: ІЕД НАН України, 2016. – 400с.

9. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Танкевич С.С., Базюк Т. М. Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2016, № 1. – С. 29-34.
10. Сотник М.І., Хованський С.О. Організаційні основи енергозабезпечення підприємств. Суми: Вид-во СумДУ, 2009. - 132 с.
11. *Енергоощадна технологія електро-теплоаккумуляційного обігріву в житлово-комунальному та аграрно-промисловому комплексах України.* / Ред. Д.Й. Розинський. Авт.: Д.Й. Розинський, В.Д. Іоргачов, С.Я. Меженний, М.М. Меркулов, В.В. Оксак, М.П. Тимченко, С.М. Тітенко – К.: Видавництво Купріянова О.О. – 2007. – 272 с.
12. *Сучасний стан і основні напрямки застосування електричної енергії для теплопостачання в Україні* / Ред. А.А. Долінський, Д.Й. Розинський. Авт.: А.А. Долінський, М.П. Тимченко, Д.Й. Розинський. – К.: Видавництво Купріянова О.О. – 2009. – 252 с.
13. *Тепловые режимы помещений при экологически чистом теплоаккумуляционном напольном отоплении* /Л.Ф. Черных, Н.М. Фиалко, Д.И. Розинский, В.И. Савенко. – Киев: София-А, 2014. – 416 с.
14. *The DOE Global Energy Storage Database* [електронний ресурс] <http://www.energystorageexchange.org>
15. *U.S. Energy storage monitor* [електронний ресурс] <http://energystorage.org/energy-storage/us-energy-storage-monitor>
16. *Decourt B., Debarre R. Carbon Capture and Storage: Bringing Carbon Capture and Storage to Market.* / Series: Leading the energy transition. SBC, Institute Energy, Paris, 2013. – 59 p.
17. *Decourt B, Debarre R. Electricity Storage: Factbook.* Schlumberger Business Consulting Energy Institute, Paris, 2013. – 98 p.
18. *The future role and challenges of Energy Storage. DG ENER Working Paper*//European Commission Directorate-General For Energy/ - 36 p. [електронний ресурс] https://ec.europa.eu/energy/-sites/ener/files/energy_storage.pdf.
19. *Technology Roadmap: Energy Storage.* International Energy Agency, Paris, 2014. – 64 p.
20. *Розкладка Дорожньої карти "Energy Storage"* [електронний ресурс] https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/foldout/FOLDOUT_TechnologyRoadmapEnergyStorage_2014.pdf
21. *Landry M., Gagnon Y. Energy Storage: Technology Applications and Policy Options* / In: *Energy Procedia* 2015, 79.- p.315 – 320.
22. *E-storage: Shifting from cost to value wind and solar applications* 2016. World Energy Council, 2016 – 27 p.
23. *World Energy Resources Full report.* World Energy Council, 2016 – 1028 p.
24. *Storing energy: With special reference to renewable energy sources* / Letcher T.M. (Ed.). Amsterdam: Elsevier, 2016 – 590 pp.
25. *Lele F. A. Thermochemical Heat Storage System for Households,* Springer International Publishing AG, 2016 – 225 p.
26. *Liebreich M. Bloomberg: New Energy Finance Summit, New York, 14 April 2015* [електронний ресурс] <https://sitecstatement.files.wordpress.com/2016/02/44-bloomberg-new-energy-finance-april-2015-bloomberg-new-energy-finance-summit.pdf>.
27. *Liebreich M. Bloomberg: New Energy Finance Summit, New York, 5 April 2016* [електронний ресурс] <http://www.bbhub.io/bnef/sites/4/2016/04/BNEF-Summit-Keynote-2016.pdf>
28. *Liebreich M. Bloomberg: New Energy Finance Summit, New York, 25 April 2017/* [електронний ресурс] <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/04/2017-04-25-Michael-Liebreich-BNEF-Summit-Keynote.pdf>.
29. *Прес-реліз 11.05.2017. Energy Storage to Play a Key Role in the Biggest Project Funded by the Connecting Europe Facility (CEF) Fund 2016* [електронний ресурс] <http://energystorage.org/news/esa-news/energy-storage-play-key-role-biggest-project-funded-connecting-europe-facility-cef>.

ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES WITHIN THE INTELLECTUAL ENERGY SUPPLY SYSTEMS

N.M. Fialko, M.P. Timchenko

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Zhelyabov str., Kyiv, 03680, Ukraine

The wide variety of available energy storage technologies (EST) in the entire world have been reviewed in terms of technical characteristics, research, application, and deployment. It was showed the EST is urgently required for both the current conventional energy supply (needs of great power plants, centralized distribution network of passive end-customer) and future distributed generation into low-carbon systems on the base of renewable clear energy supply systems which can be realized only within framework of intelligent energy supply systems (IESS).

The outcome of the analysis of the main energy storage technologies for perspective intelligent (based on Smart Grid) energy supply systems are presented. More than 1600 projects of the EST were reviewed. A number of the EST classifications according to technologically commercial "maturity", costs of implementation, risks, capacity of storage devices, time of their response and discharge, etc. are proposed.

There is the great potential and need for EST applications in Ukraine.

References 29, tables 2, figures 6.

Key words: energy supply; intelligent networks; energy storage technologies; low-carbon energy

1. *Kyrylenko O.V., Yakimenko Yu.I., Zhuikov V.J., Denysyuk S.P.* Inventors of parameters of electricity in Smart power systems. Pratsi Institutu Elektrodynamiki of NAS of Ukraine. Spets. Vypusk. Kiev: IED NAS (Proceedings of the International scientific conference "Intelligent Energy Systems - IES'10"). Kiev: IED NAS. 2010. P. 17-23. (Ukr)

2. *Stohnij B.S., Kyrylenko O.V., Denysyuk S.P.* Intelligent electrical network power systems and their technological support. Tekhnicheskaja elektrodinamika. 2010. № 6. P. 44-50. (Ukr)

3. *Stohnij B.S., Kyrylenko O.V., Batalov A.G., Denysyuk S.P.* The technological basis of intelligent united power system of Ukraine. Pratsi Institutu Elektrodynamiki of NAS of Ukraine. Spets. Vypusk. Kiev: IED NAS. 2011. P. 20-31. (Ukr)

4. *Denysyuk S.P.* Formation of the technological basis of modernization of electrical distribution networks based on the Smart Grid concept. Enerhetyka: ekonomika, tehnolohiyi, ekolohiya. 2012. № 1. P. 90- 97. (Ukr)

5. *Stohnij B.S., Kyrylenko O.V., Prakhovnik A.V., Denysyuk S.P.* The evolution of intelligent electrical networks, and their prospects in Ukraine. Tekhnicheskaja elektrodinamika. 2012. № 5. P. 52-67. (Ukr)

6. *Denysyuk S.P.* Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in power systems Enerhetyka: ekonomika, tehnolohiyi, ekolohiya. 2014. No.

1 (35). P. 7-21. (Ukr)

7. *Intelligent power systems: elements and regimes.* Ed. A.V. Kyrylenko. Kiev: IED NAS. 2014. 409 p. (Rus)

8. *Intelligent electricity networks: elements and regimes.* Ed. O.V. Kyrylenko. 2016. 400 p. (Ukr).

9. *Kyrylenko O.V., Denysyuk S.P., Tankevych S.E., Bazyuk T.N.* Information and regulatory support organization multiagent control power system with active consumers. Informatsiyi tekhnolohiyi ta komp'yuterna inzheneriya. 2016. No. 1. P. 29-34. (Ukr)

10. *Sotnik M.I., Khovansky S.O.* Organizational fundamentals of the energy supply of enterprises. Sumy: Publishing of the SumState University. 2009. 132 p.

11. *Energy-saving technology of storage electroheating at housing and communal and agrarian-industrial complexes of Ukraine.* Ed. D.J. Rozinsky. Authors: D.Y. Rozinsky, V.D. Ihorachev, S.Ya. Mezhenyyi, M.M. Merkulov, V.V. Oksak, M.P. Tymchenko, S.M. Titenko. Kyiv: Publishing house of Kupriyanova O.O. 2007. 272 p. (Rus)

12. *Current state and main directions of application of electric energy for the heat supply in Ukraine.* Ed. A.A. Dolinsky, D.Y. Rozinsky. Authors: A.A. Dolinsky, M.P. Tymchenko, D.J. Rosinsky. Kyiv: Publishing house of Kupriyanova O.O. 2009. 252 p. (Ukr)

13. *Thermal regimes of apartments with ecologically clean heat storage floor electric heating.* L.F. Chernyh, N.M. Fialko, D.I. Rozinsky, V.I. Savenko. Kyiv: Sofia-A. 2014. 416 p. (Rus)

14. *The DOE Global Energy Storage Database* [electronic source] <http://www.energystorageexchange.org> (Rus)

15. *U.S. Energy storage monitor* [electronic source] <http://energystorage.org/energy-storage/us-energy-storage-monitor> (Rus)

16. *Decourt B., Debarre R.* Carbon Capture and Storage: Bringing Carbon Capture and Storage to Market. Series: Leading the energy transition. SBC. Institute Energy. Paris. 2013. 59 p. (Rus)

17. *Decourt B., Debarre R.* Electricity Storage: Factbook. Schlumberger Business Consulting Energy Institute. Paris. 2013. 98 p. (Rus)

18. *The future role and challenges of Energy Storage.* DG ENER Working Paper. European Commission Directorate-General For Energy. 36 p. [electronic source] https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy_storage.pdf. (Rus)

19. *Technology Roadmap: Energy Storage.* International Energy Agency, Paris, 2014. 64 p. (Rus)

20. *Foldout of the "Roadmap "Energy Storage"* [electronic source] https://www.iea.org/media/free-publications/technology_roadmaps/foldout/FOLDOUT_Technology_Roadmap_Energy_storage_2014.pdf (Rus)

21. *Landry M., Gagnon Y.* Energy Storage: Technology Applications and Policy Options. In: Energy Procedia. 2015. 79. P. 315- 320. (Rus)

22. *E-storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications 2016.* World Energy Council. 2016. 27 p. (Rus)

23. *World Energy Resources Full report.* World Energy

Council. 2016. 1028 p. (Rus)

24. *Storing energy*: With special reference to renewable energy sources. Letcher T.M. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. 2016. 590 p. (Rus)

25. *Lele F. A.* Thermochemical Heat Storage System for Households. Springer International Publishing AG. 2016. 225 p. (Rus)

26. *Liebreich M.* Bloomberg: New Energy Finance Summit. New York. 14 April 2015 [electronic source] <https://sitecstatement.files.wordpress.com/2016/02/44-bloomberg-new-energy-finance-april-2015-bloomberg-new-energy-finance-summit.pdf>. (Rus)

27. *Liebreich M.* Bloomberg: New Energy Finance Summit, New York, 5 April 2016 [electronic source]

<http://www.bbhub.io/bnef/sites/4/2016/04/BNEF-Summit-Keynote-2016.pdf> (Rus)

28. *Liebreich M.* Bloomberg: New Energy Finance Summit. New York. 25 April 2017. [electronic source] <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/04/2017-04-25-Michael-Liebreich-BNEF-Summit-Keynote.pdf>. (Rus)

29. *Press release 11.05.2017.* Energy Storage to Play a Key Role in the Biggest Project Funded by the Connecting Europe Facility (CEF) Fund 2016 [electronic source] <http://energystorage.org/news/esa-news/energy-storage-play-key-role-biggest-project-funded-connecting-europe-facility-cef>. (Rus)

Получено 18.09.2017

Received 18.09.2017