

УДК 621.311.25

І.М. БУРАТИНСЬКИЙ, ORCID: 0000-0003-2928-9621

ТОВ «Родина Інжиніринг», вул. Богатирська, 3-г, м. Київ, 04212, Україна

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ВЕЛИКИМ ОБСЯГОМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Розглянуто тенденції розвитку відновлюваних джерел енергії. Проаналізовано темпи впровадження сонячних та вітрових електростанцій у світі, акцентовано увагу на лідируючих країнах по впровадженню даних джерел електроенергії. Оглянуто роботу енергосистем з великою кількістю сонячних та вітрових електростанцій, описано проблеми, які виникають при такій роботі. Зроблено огляд існуючих систем акумулявання та описано перспективи їх подальшого розвитку. Наведено сфери застосування систем накопичення електроенергії при їх спільній роботі з сонячними та вітровими електростанціями та зроблено висновки щодо можливості їх подальшого використання в енергосистемах.

К л ю ч о в і с л о в а: відновлювані джерела енергії, сонячна електростанція, вітрова електростанція, система акумулявання електроенергії, енергосистема.

Сучасні енергетичні системи перебувають у стані трансформації генеруючих потужностей, що відбувається під впливом впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Значне здешевлення, підвищення ефективності технологій та прийняті зобов'язання щодо зменшення викидів парникових газів у навколишнє середовище призвели до стрімкого розвитку даної галузі енергетики у світі. Обсяги впровадження сонячних (СЕС) та вітрових електростанцій (ВЕС) наскільки великі, що їх робота в енергосистемі вже має вплив на її стабільність.

Прийнята в 2015 р. Паризька угода [1] має мету утримати зростання середньої світової температури до +1,5 °С від доіндустріальних рівнів та зменшити викиди парникових газів у навколишнє середовище. Країни-учасники Угоди взяли напромак на декарбонізацію енергетики, який передбачає поступову відмову від використання викопного палива і перехід на використання відновлюваних джерел енергії і, відповідно, збільшення їх частки в загальній структурі генерації електроенергії. Тому ЄС, США, Китай, Індія та багато інших країн у своїх Енергетичних стратегіях запланували збільшити частку ВДЕ (табл. 1). Про повну відмову від спалювання викопного палива і перехід на ВДЕ заявили: Данія, Швеція, Ісландія, США, Коста-Рика, Саудівська Аравія [2].

Відновлювані джерела енергії, за специфікою своєї роботи відрізняються від електростанцій,

що працюють на викопному паливі, виробництво електроенергії на них залежить від погодних умов. Збереження балансів в енергосистемі при надлишку електроенергії здійснюють за допомогою гідроакуюлюючих електростанцій (ГАЕС), однак їх будівництво обмежено природними та територіальними ресурсами. Тому, для балансування добових графіків виробництва-споживання електроенергії в умовах інтенсивного впровадження ВДЕ потрібні нові, більш компактні рішення, які мають невеликі розміри та не мають залежності від природних та географічних умов.

Метою даної статті є огляд систем акумулявання електричної енергії, аналіз їх основних типів, параметрів, можливостей, застосувань, опис переваг та недоліків різних технологій та огляд реалізованих проєктів у світі.

Важливим чинником, який обумовлює світове збільшення частки ВДЕ в загальному обсязі виробництва електроенергії, є прагнення країн збільшити свою енергетичну незалежність. Враховуючи, що сонячна радіація, яка потрапляє на земну поверхню, та вітер є невичерпними джерелами, то для підвищення своєї енергонезалежності країни беруть напромак на збільшення використання цих джерел енергії та поступову відмову від викопного палива. За прогнозами британської нафтогазової компанії British Petroleum загальна частка ВДЕ у світовій структурі виробництва електроенергії на 2040 р. становитиме не менше ніж 30%, при теперішній частці у 10%, і цей показник на той час перевищить рівень ву-

© І.М. БУРАТИНСЬКИЙ, 2019

Таблиця 1. Частка ВДЕ, %, у загальному обсязі споживання електроенергії окремих країн відповідно до їх енергетичних стратегій [2]

Країна	2010	2015	2020	2030	2040	2050
Австрія	–	30 (2014)	34	–	–	–
Данія	25 (2005)	–	33	55	68	100
Німеччина	–	12,4 (2013)	18	30	45	60
Швеція	20 (2008)	52,1 (2013)	50	100	–	–
Швейцарія	17,5	–	45	–	–	–
Індія	–	13	–	40	–	–
Китай	13	–	–	–	55	–
США (Гаваї)	–	20 (2014)	30	40	70	100 (2045)
Коста-Рика	–	100	100 (2021)	–	–	–
Ісландія	–	99 (2014)	–	–	–	–
Саудівська Аравія	–	1	–	–	100	–
ЄС	15	20	–	–	–	75

гільної генерації, яка сьогодні має тенденцію до зниження [3].

Серед усіх видів ВДЕ найбільші темпи впровадження у світі мають СЕС та ВЕС, причому серед сонячних електростанцій лідируюче місце займають фотоелектричні станції. За інформацією Міжнародної компанії з дослідження відновлюваних джерел енергії [4] за десять років сумарна потужність СЕС у світі збільшилась у 33 рази, з 15 ГВт у 2008 р. до 505 ГВт у 2018 р. Протягом 2018 р. загальносвітовий приріст частки фотоелектричних СЕС у структурі генеруючих потужностей становив 64%, що є найбільшим показником впровадження серед усіх типів електростанцій, що будуються у світі.

Лідером з будівництва фотоелектричних сонячних електростанцій є Китай. На кінець 2018 р. загальна потужність фотоелектричних СЕС у Китаї досягла 175 ГВт, лише протягом одного року в країні було побудовано 45 ГВт, що становило 26% річного приросту. Високі темпи будівництва СЕС у Китаї пов'язані з дешевою робочою силою, розвиненою промисловістю та інфраструктурою, яка дозволяє передавати вироблену електроенергію з мінімальною реконструкцією електричних мереж тощо. Крім того, країною задіяно ряд стимулювань щодо розвитку даної галузі енергетики (державні субсидії, доступність дешевих земельних ділянок, маловідсоткові кредити), які направлені на зростання конкурентоспроможності китайської продукції на міжнародному ринку [5].

Друге місце за темпами впровадження фотоелектричних СЕС займають США. На кінець 2018 р. загальна потужність даних джерел енергії у США досягнула межі у 62 ГВт, протягом року в країні було побудовано 10,6 ГВт встановлених потужностей, річний приріст становив 17%.

Третє місце займає Японія, яка також перетнула межу 50 ГВт за рівнем встановлених потужностей фотоелектричних СЕС. За глобальним статусом ВДЕ Міжнародної компанії з дослідження відновлюваних джерел енергії в топіві країни з впровадження фотоелектричних сонячних електростанцій входять: Німеччина, Індія, Італія, Велика Британія, Австралія, Франція та Корея [4].

Зростання встановлених потужностей СЕС у загальній структурі виробництва електроенергії у світі відбувається за рахунок збільшення конкурентоспроможності технологій, що обумовлено зменшенням капітальних витрат на будівництво, зменшенням вартості закупівлі основної продукції (фотомодулі, інвертори), зростанням ККД та підвищенням ефективності роботи основного обладнання тощо. Протягом восьми років середньозважена собівартість виробництва електроенергії, яка оцінюється протягом всього життєвого циклу, враховуючи всі витрати на капітальне будівництво для фотоелектричних СЕС, у світі знизилась майже у 4,5 рази, з 0,371 дол. США/кВт·год у 2010 р. до 0,085 дол. США/кВт·год у 2018 р. [6].

Наступне місце за темпами впровадження серед усіх типів нововведених генеруючих потужностей у світі займають вітрові електростанції, які споруджуються на материках. Стрімке зростання частки ВЕС у загальносвітовій структурі генерації електроенергії також пов'язане зі зменшенням середньозваженої собівартості виробництва електроенергії протягом життєвого циклу, яка у світі протягом восьми років знизилась на третину з 0,085 дол. США/кВт·год у 2010 р. до 0,056 дол. США/кВт·год у 2018 р. Зниження собівартості привело до того, що за останні 10 років потужність ВЕС у світі збіль-

шилась майже у 5 разів, з 121 ГВт у 2008 р. до 591 ГВт у 2018 р. [6].

Найбільше ВЕС будується в Європі та Австралії, це пов'язано із сприятливими природними та географічними умовами – сильні океанські вітри, довга берегова лінія тощо. Частка виробленої електроенергії з ВЕС серед усієї виробленої електроенергії у Європі протягом 2018 р. становила 14% [7]. В Австралії на кінець 2019 р. загальна потужність ВЕС досягнула значення у 4 ГВт, з річним приростом у 850 МВт [8]. За прогнозами Австралійської асоціації з відновлюваних джерел енергії до 2030 р. частка СЕС та ВЕС у Австралії повинна зайняти не менше ніж 50% у загальній структурі генеруючих потужностей [9].

В Україні стимулювання впровадження ВДЕ відбувається за рахунок прийнятого в 2009 р. «зеленого» тарифу, який діятиме до 2030 р. Однак, така система стимулювання з часом втратила свою ефективність, тому що відбулось швидке зменшення цін на технології та збільшилась конкурентоспроможність продукції, а тарифна ставка оплати виробленої електроенергії залишилась такою самою або знизилась досить мало, від чого бізнес з впровадження ВДЕ в Україні став надприбутковим. Вказані фактори та перспектива об'єднання енергосистеми України з Європейською мережею системних операторів передачі електроенергії обумовили відмову від «зеленого» тарифу та, відповідно, прийняття Закону України «Про ринок електричної енергії», згідно якого створюється конкуренція, відмінюється фіксована ставка на продаж електроенергії та вводяться аукціони, на яких відбуватиметься продаж електричної енергії [10]. Збільшенню частки ВДЕ у структурі виробництва електроенергії в Україні сприяє Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 р. [11] та Енергетична стратегія України на період до 2035 р. [12], згідно якої, частка ВДЕ у структурі первинного постачання енергії в Україні на 2035 р. має досягнути не менше ніж 25%.

У Каліфорнії в енергосистемі, що обслуговується незалежним системним оператором CAISO, відбуваються ситуації, коли на СЕС генерується великий обсяг електроенергії, через що операторам для того, щоб забезпечити стабільну роботу енергосистеми, доводиться вручну зменшувати рівень обсягів виробництва електроенергії на СЕС. Щоб не обмежувати вироблення електроенергії на СЕС, можна приєднати одну енергосистему до іншої, однак, цей спосіб є не простий, для його реалізації потрібно подолати ряд бюрократичних та технічних проблем, що ставить під сумнів економічну доцільність та раціональність таких енергетичних об'єднань.

Тому, найоптимальнішим способом балансування добового графіка із збереженням виробленої «зеленої» електроенергії є впровадження систем акумулювання електроенергії [13]. Починаючи з 2010 р., уряд Каліфорнії інтенсивно впроваджує заходи, які стимулюють будівництво систем акумулювання електроенергії. Вже на початок 2017 р. у Каліфорнії було встановлено таких систем сумарною потужністю 475 МВт. У подальших цілях енергетичної стратегії штату вказано, що для забезпечення стабільної роботи енергосистеми загальна частка систем акумулювання має становити не менше ніж 1% від загального обсягу виробництва електроенергії [14].

Неконтрольоване введення великої кількості СЕС та ВЕС в енергосистему України може погіршити її стабільність та призвести до недопустимих відхилень частоти, стабілізація якої може бути забезпечена шляхом впровадження систем акумулювання [15, 16].

Дефіцит маневрених потужностей, що спостерігається в об'єднаній енергосистемі України, та подальші тенденції щодо збільшення обсягів приєднання ВЕС та СЕС за прогнозами НЕК «Укренерго» можуть призвести до значних проблем із забезпечення надійної роботи енергосистеми [17]. Збільшення частки СЕС до рівня 3,3 ГВт і ВЕС до 4,2 ГВт у складі ОЕС України можливе лише за допомогою впровадження систем акумулювання електроенергії, встановленою потужністю не менше ніж 500 МВт до 2025 р. [18].

Основними типами систем акумулювання електроенергії (САЕ) є: механічні (сховища енергії на стисненому повітрі, зберігання енергії за допомогою маховиків, гідроакумулюючі станції ГАЕС); теплові (термохімічні накопичувачі, технології збереження тепла) та електрохімічні системи [19]. ГАЕС та зберігання енергії за допомогою маховиків на сьогоднішній день є вже достатньо освоєними технологіями. При виборі конкретної технології для застосування в енергосистемі потрібно враховувати багато факторів: технічну зрілість, ступінь готовності до використання, масштаби та перспективи подальшого розвитку на ринку електроенергії тощо.

Останнім часом у світі інтенсивно впроваджуються електрохімічні системи акумулювання електроенергії, які працюють на базі акумуляторів. За типом акумуляторів, що використовуються в них найпоширенішими є: акумулятори на основі рідкого електроліту, свинцево-кислотні, літій-іонні, сірчано-натрієві та метало-повітряні акумулятори. Перевагами електрохімічних систем акумулювання над іншими системами є: малі габаритні розміри, короткі терміни будівництва, можливість ство-

рення систем великої потужності на їх основі тощо. Літій-іонні системи потужністю 3 МВт та ємністю розрядження 1,2 МВт·год, включаючи акумуляторні батареї, обладнання для перетворення, всю систему управління, прилади кондиціонування, вентиляції та освітлення вміщуються в невеликі контейнери з габаритними розмірами всього 6,0×2,5×3,0 м та вагою близько 20 т. При потребі більшої потужності чи ємності розряду передбачається встановлення декількох таких контейнерів тощо.

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики IRENA за десять років сумарна встановлена потужність електрохімічних САЕ у світі збільшилась у 16 разів, з 100 МВт у 2006 р. до 1600 МВт у 2016 р. [20]. Основні характеристики електрохімічних систем акумулявання залежать від типу акумуляторних батарей, що в них використовуються (табл. 2).

Серед розглянутих електрохімічних систем акумулявання найкращу енергетичну щільність та ефективність мають системи акумулявання на базі літій-іонних акумуляторів. Вони широко впроваджуються в енергосистемі Європейського Союзу і займають 59% серед усіх типів побудованих систем акумулявання в Європі. Так, станом на 2017 р. сумарна встановлена потуж-

ність літій-іонних систем у світі досягнула межі 1,2 ГВт [22].

Зростання кількості електрохімічних систем акумулявання у світі, як і у випадку з фотоелектричними СЕС, відбувається через зростання конкурентоспроможності даних технологій та збільшення їх доступності на ринку. Дослідження фінансової компанії Bloomberg показали, що протягом останніх років відбулось значне здешевлення літій-іонних акумуляторів, вартість закупівлі яких з кожним роком зменшується в середньому на 20%. Так, протягом восьми років середня вартість літій-іонної системи акумулявання електроенергії у світі зменшилась у 6,5 разів, з 1160 дол. США/кВт·год у 2010 р. до 176 дол. США/кВт·год у 2018 р. та очікується і подальше зменшення вартості закупівлі даних технологій до 100 дол. США/кВт·год у 2023 р. [23].

Класифікація літій-іонних акумуляторів проводиться за типом хімічної реакції, яка розрізняється за ключовими матеріалами, що беруть участь у реакції та використовуються в якості катода і анода (табл. 3).

Системи акумулявання, що використовуються для інтеграції ВДЕ в енергосистемах, повинні забезпечувати досить різні технологічні функції, тому їх можна поділити на дві групи: швидко-

Таблиця 2. Основні характеристики електрохімічних систем акумулявання [21]

№	Тип акумулятора	Енергет. щільн., Вт год/кг	Ефект. заряд-розряд, %	Термін служби, роки	Переваги	Недоліки
1	Літій-іонний (Li-ion)	150–250	95	10–15	<ul style="list-style-type: none"> висока гнучкість та маневреність; здатність швидко заряджатися і розряджатися; велика питома потужність 	<ul style="list-style-type: none"> низька глибина розряду; самовільна корозія; саморозрядження; зниження ефективності з часом
2	Сірчано-натрієвий (NaS)	125–150	75–85	10–15	<ul style="list-style-type: none"> велика питома енергоємність; дешеві робочі матеріали 	<ul style="list-style-type: none"> працюють при високій температурі; потребують спеціальної інфраструктури; небезпека загорання
3	На основі рідкого електроліту (Flow)	60–80	70–75	20–25	<ul style="list-style-type: none"> можливість створення потужних агрегатів; дешеві робочі матеріали 	<ul style="list-style-type: none"> займають великі площі; мають низьку ефективність, порівняно з іншими
4	На основі нікелю (Ni-Cd)	40–60	60–80	20–25	<ul style="list-style-type: none"> можна повністю розряджати; забезпечує високу надійність; мають високу калорійність 	<ul style="list-style-type: none"> токсичні матеріали; мала питома потужність, значно менша ніж у Li-ion; саморозрядження; ефект пам'яті
5	Свинцево-кислотний (Lead-acid)	30–50	60–70	3–6	<ul style="list-style-type: none"> достатньо вивчена технологія; простий спосіб виготовлення 	<ul style="list-style-type: none"> токсичні матеріали; небезпека загорання; довгий час зарядки короткий період життєвого циклу

Таблиця 3. Класифікація літій-іонних акумуляторів різних за типом хімічної реакції [21]

Скорочена назва матеріалу	NMC	LMO	NCA	LFP	LTO
Катод	LiNixMnyCo1-x-yO2	LiMn2O4	LiNiCoAlO2	LiFePO4	Будь-який з перелічених
Анод	Графіт С	Графіт С	Графіт С	Графіт С	Li4Ti5O12
Енергетична щільність, Вт год/кг	120–140	80–95	120–160	85–105	80–95
Термін служби, циклів	800–2000	2000–25000	800–5000	200–2000	2000–25000
Переваги	<ul style="list-style-type: none"> • велика потужність; • висока енергетична щільність; • стабільність; • можливість працювати при високих температурах 	<ul style="list-style-type: none"> • дешеві матеріали, за рахунок дешевого марганцю; • термостійкість; • досить велика потужність 	<ul style="list-style-type: none"> • висока енергетична щільність; • велика потужність; • тривалий термін експлуатації 	<ul style="list-style-type: none"> • чудові термічні показники; • велика потужність; • дешеві матеріали; • тривалий термін експлуатації 	<ul style="list-style-type: none"> • чудові термічні показники; • висока швидкість розряду; • тривалий термін експлуатації
Недоліки	<ul style="list-style-type: none"> • проблеми з патентами в деяких країнах 	<ul style="list-style-type: none"> • мала енергетична щільність; • короткий термін експлуатації 	<ul style="list-style-type: none"> • існує мінеральна термостабільність при зарядженому стані, що створює підвищені вимоги до безпеки; • при температурах вище “+”40°C відбувається процес саморозрядження 	<ul style="list-style-type: none"> • мала енергетична щільність 	<ul style="list-style-type: none"> • дорога вартість титану; • мала робоча напруга окремих елементів; • мала енергетична щільність

діючі системи (час реакції яких мілісекунди, секунди) та повільнодіючі (час реакції – хвилини, години) [24]. Швидкодіючі систем використовують, в основному, для забезпечення належної якості електроенергії (регулювання та підтримка частоти, напруги, потужності) та забезпечення надійності електропостачання. Повільнодіючі системи використовуються для балансування добового графіка споживання електричної енергії (зміщення та вирівнювання піків), управління попитом тощо, вони ще носять назву – електроакумулюючі станції. Характеристика основних застосувань, які виконують системи акумулювання при інтеграції ВДЕ в енергосистеми, представлено у табл. 4.

Для інтеграції ВДЕ в енергосистеми, в основному, використовуються літій-іонні та сірчано-натрієві системи акумулювання електроенергії. При однаковій потужності з літій-іонними системами сірчано-натрієві забезпечують більшу енергетичну ємність, тому їх використовують там, де потрібні великі ємності електроенергії та віддача її протягом тривалого часу, тому вони підходять для балансування енергосистеми (управління попитом, зміщення та згладження піків). Літій-іонні системи за-

безпечують більш широкий діапазон застосувань, порівняно з іншими системами акумулювання, в них видача енергії в мережу за рахунок великої потужності системи може відбуватись досить швидко, це пов'язано з високою енергетичною щільністю даних систем, тому їх використовують там, де потрібне швидке розрядження чи зарядження, тобто для забезпечення належної якості електроенергії (регулювання, підтримки та відновлення частоти у мережі, регулювання напруги).

Протягом останніх років у світі через значні обсяги впровадження ВДЕ та їх нестабільну роботу в енергосистемах почалось інтенсивне впровадження систем акумулювання електроенергії, в табл. 5 показано найбільші проекти, що використовуються при інтеграції ВЕС та СЕС.

Найбільшу літій-іонну систему накопичення виробництва Tesla встановлено у Південній Австралії, її встановлена потужність становить 100 МВт та ємність розрядження 129 МВт·год, планується подальше збільшення потужності і ємності даної системи на 50%. Будівництво Powerpacks Hornsdale Power Reserve потужністю 100 МВт було завершено менш ніж за 100 днів [27]. Дослідження Австралійської Кліма-

Таблиця 4. Основні застосування систем акумулювання електроенергії [25]

Найменування	Характеристика
Забезпечення якості електроенергії	<ul style="list-style-type: none"> • регулювання напруги у мережі; • регулювання, підтримка та відновлення частоти
Забезпечення надійності електропостачання	<ul style="list-style-type: none"> • можливість повного покриття навантаження при тимчасовому вимкненні енергосистеми; • забезпечення стабільної роботи мережі
Створення гарячого резерву	<ul style="list-style-type: none"> • акумуляція енергії протягом коротких періодів, що створюються в результаті хмарності, або різкого зменшення сонячного випромінювання
Енергетичний арбітраж	<ul style="list-style-type: none"> • управління часом використання електричної енергії; • закупівля електроенергії в період низьких цін та віддача в період високих цін
Управління попитом	<ul style="list-style-type: none"> • керування попитом навантаження
Зміщення та вирівнювання піків	<ul style="list-style-type: none"> • забезпечення видачі необхідної потужності в часи пікових навантажень; • згладжування та вирівнювання піків навантаження

Таблиця 5. Успішно реалізовані проекти систем акумулювання електроенергії [26]

№	Назва	Місце розташування	Тип	Потужність, МВт	Ємність, МВт·год	Об'єкт інтеграції	Застосування
1	Laurel Mountain	США	Li-ion	32	8	ВЕС – 98 МВт	Зміщення та згладження піків
2	Anchorage Area BESS	США, Аляска	Li-ion	25	14	СЕС, ВЕС	Балансування та зміщення піків
3	Tesla Powerpacks Terhills	Бельгія	Li-ion	18,2	23,5	СЕС, ВЕС	Регулювання частоти, напруги
4	Tesla Powerpacks Hornsdale Power Reserve	Південна Австралія	Li-ion	100	129	СЕС, ВЕС	Надійність електропостачання, гарячий резерв
5	Saft Batteries Intensium Max	США, Гаваї	Li-ion	6	4,63	СЕС – 12 МВт	Регулювання частоти, напруги
6	Saft Batteries Intensium Max	Фарерські острови	Li-ion	2,3	0,7	ВЕС – 12 МВт	Регулювання частоти, напруги
7	Wind-to-Battery Minn Wind Project	США, Мінесота	NaS	1	7	ВЕС – 11 МВт	Регулювання частоти, напруги
8	PG&E Vaca Battery Energy Storage CAISO	США, Каліфорнія	NaS	2	14	СЕС, ВЕС	Зміщення та згладження піків
9	NGK Insulators Terna SpA	Південна Італія	NaS	34,8	250	СЕС, ВЕС	Енергетичний арбітраж, зміщення та згладження піків
10	NGK Insulators Futumata	Японія, Футумата	NaS	34	245	ВЕС – 51 МВт	Управління попитом та зміщення піків
11	NGK Insulators Kyusyu	Японія, Фукуока	NaS	50	300	СЕС	Управління попитом та зміщення піків
12	Kahuku Wind Farm	США, Гаваї	Lead acid	15	3,7	ВЕС – 30 МВт	Підтримка напруги

тичної комісії Climate Council [28], показують, що для успішної роботи енергосистеми, з великою кількістю ВДЕ сумарна встановлена потужність всіх систем акумулювання повинна бути не менше ніж 20% від встановленої потужності СЕС та ВЕС [29].

Дослідження, проведені компанією Energy and Environmental Economics, показали, що для енергетичного вузла, який знаходиться під управлінням компанії Tampa Electric Company (TECO) в штаті Флорида США, можливі чотири сценарії роботи фотовольтаїчні СЕС у складі енергосистеми: «Обов'язкове приймання», коли енергомережа приймає весь об'єм виробленої електроенергії з СЕС; «Часткове обмеження» – відключення частини генеруючих потужностей; «Повне припинення» – відключення всіх генеруючих потужностей; «Повна маневреність» – маневреність електростанції з використанням систем акумулювання. Режим «Обов'язкове приймання» можливий лише при частці виробленої електроенергії з СЕС в загальній структурі виробництва електроенергії менше 14%, при досягненні більшої частки виникає надлишок електричної енергії, який потрібно передавати до сусідніх енергосистем або переходити до другого чи третього сценарію. Однак, такі сценарії, як «Часткове обмеження» та «Повне припинення» є парадоксальними, оскільки в них відбувається обмеження «зеленої» електроенергії. Подальше збільшення частки СЕС до обсягів більше ніж 20% в структурі виробництва електроенергії призводить до повного відключення сонячної генерації від мережі в періоди максимального сонячного випромінювання, або перехід до четвертого сценарію «Повна маневреність» з обов'язковим використанням системи акумулювання електроенергії, які можуть забезпечити повну маневреність СЕС [30].

ВИСНОВКИ

1. У сучасних умовах відбувається трансформація енергосистем зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії в загальній структурі генерації електроенергії, що відбувається через зобов'язання, які взяли на себе країни направлені на скорочення викидів парникових газів у навколишнє середовище. Ще важливим фактором збільшення частки ВДЕ є прагнення країн підвищити свою енергонезалежність та підвищення конкурентоспроможності технологій, зменшення їх собівартості, підвищення ефективності тощо.

2. Стан сучасних енергосистем при великих обсягах сонячних та вітрових електростанцій не дозволяє забезпечити необхідну маневреність та

гнучкість, тому у світі інтенсивно впроваджуються системи акумулювання електроенергії, які здатні регулювати ключові параметри в енергосистемі та балансувати її.

3. Для інтеграції ВДЕ у світі найширше використовуються електрохімічні системи акумулювання, які працюють на базі акумуляторних батарей, вони володіють великою енергетичною щільністю, мають високу швидкість заряджання та розряджання, забезпечують достатню ефективність та надійність, мають тривалий термін служби, малі габаритні розміри, є мобільними та будуються за короткі терміни в порівнянні з іншими системами акумулювання.

4. Світова практика з впровадження електрохімічних систем акумулювання показує, що найкращими при інтеграції ВЕС та СЕС є літій-іонні та сірчано-натрієві системи. Літій-іонні системи в основному використовуються для забезпечення належної якості електроенергії та стабілізації параметрів мережі, а сірчано-натрієві там де потрібне перенесення великих об'ємів електроенергії з часом, балансування енергосистеми, управління попитом тощо.

1. Паризька угода: Закон України №1469-VIII від 14.07.2016. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161 (дата звернення: 10.09.2019).
2. Гелетуша Г.Г., Железна Т.А., Праховнік А.К. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлювальних джерел енергії. *Біоенергетична асоціація України*. 2015.
3. BP Energy Outlook. BP – 2019. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf> (дата звернення: 01.09.2019).
4. Renewables 2019 Global Status Report. REN21 – 2019.
5. Chen Gang. China's Solar PV Manufacturing and Subsidies from the Perspective of State Capitalism. *The Copenhagen Journal of Asian Studies*. 2015. 33(1).
6. Renewable Power Generation Costs in 2018. International Renewable Energy Agency. IRENA, 2019.
7. Wind energy in Europe in 2018. Trends and statistics. Wind Europe, 2019.
8. Parkinson G. Wind generation hits peak output of more than 4,000MW in Australia. *Renew economy. Clean Energy News and Analysis*. Renew economy – 2019. URL: <https://reneweconomy.com.au/wind-generation-hits-peak-output-of-more-than-4000mw-in-australia-29145/> (дата звернення: 01.09.2019).
9. Clean energy council. Clean energy Australia report – 2019. URL: <https://assets.cleanenergycouncil.org.au/documents/resources/reports/clean-energy-australia/clean-energy-australia-report-2019.pdf> (дата звернення: 01.09.2019).

10. Про ринок електричної енергії: Закон України №2019-VIII від 25 квіт. 2019. URL: (дата звернення: 10.09.2019).
11. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року. URL: (дата звернення: 01.09.2019).
12. Енергетична стратегія України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентноспроможність”. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245239554> (дата звернення: 01.09.2019).
13. Energy storage. Perspectives from California and Europe. Discussion Paper – October – 2019. URL: (дата звернення: 01.09.2019).
14. California Energy Commission – Tracking Progress. URL: <http://apps.psc.wi.gov/pages/viewdoc.htm?docid=364982> (дата звернення: 01.09.2019).
15. Кулик М.М., Дрьомін І.В., Згуровець О.В. Дослідження режимів роботи об’єднаних енергосистем з потужними вітровими електростанціями та акумуляторними батареями. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 2(53). С. 15—20. <https://doi.org/10.15407/pge2018.02.015>
16. Кулик М.М., Дрьомін І.В., Згуровець О.В. Можливості використання великих накопичувачів електроенергії для стабілізації частоти в об’єднаних енергосистемах з потужними сонячними електростанціями. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 3(54). С. 6—14.
17. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей (доопрацьований). НЕК Укренерго. 2018. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/04/ZvitAdekvatnostiGenPotuzhnoziej_31_03_2019.pdf (дата звернення: 10.09.2019).
18. Аналітичний звіт до питання розвитку ВЕС та СЕС в складі ОЕС України (за результатами досліджень проблем та перспектив прискореного зростання потужностей ВЕС та СЕС в ОЕС України). *НЕК Укренерго*. 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/06/ANALITYCHNYJ-ZVIT-2.pdf> (дата звернення: 10.09.2019).
19. Lazard’s levelized cost of storage analysis – version 4.0. *LAZARD – 2018*.
20. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. *IRENA – 2017*.
21. Handbook on battery energy storage system. Asian development bank – 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>.
22. European Energy Storage Technology Development Roadmap. *European Energy Research Alliance – 2017*.
23. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. Bloomberg NEF – 2019. URL: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/> (дата звернення: 01.09.2019).
24. Ghavi M. Energy storage for micro- and mini-grids in urban and rural Africa. *ABB – 2017*.
25. Schmidt O., Melchio S., Hawkes A., Staffell I. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*. 2019. Vol. 3. P.1–20.
26. DOE Global Energy Storage Database. Sandia National Laboratories. *United States Department of Energy*. URL: <https://energystorageexchange.org/> (дата звернення: 01.09.2019).
27. Tesla ввремя завершает свою гигантскую австралийскую батарею Powerpack. URL: <https://www.engadget.com/2017/11/23/tesla-australia-powerpack-100-day-bet/> (дата звернення: 01.09.2019).
28. Stock A., Bourne G., Brailsford L. and StockFully Charged P. Renewables and Storage Powering Australia. *Climate Council – 2018*.
29. Hayward J., Graham P. Electricity generation technology cost projections: Australia: CSIRO – 2017.
30. Investigating the Economic Value of Flexible Solar Power Plant Operation. *Energy and Environmental Economics – 2018*.

Надійшла до редколегії: 22.11.2019