

## СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ: АСПЕКТИ БЕЗПЕКИ І ОПТИМІЗАЦІЇ

*Здійснено огляд систем зберігання енергії (СЗЕ) в контексті аспектів безпеки, захисту та оптимізації їхньої роботи. Оскільки однією з основних функцій СЗЕ є забезпечення надійності, безпеки та стійкості систем виробництва енергії, особливо в умовах розвитку відновлюваних джерел генерації енергії (ВДЕ), їх потрібно розглядати як важливий засіб оптимізації режимів роботи енергосистеми. Практичне використання СЗЕ є відносно новим процесом, потенціал розвитку систем залежить від докладного вивчення притаманних їм недоліків і ризиків. Наведено класифікацію СЗЕ, перелічено відомі ризики, що їм притаманні. Наприкінці статті наведено опис задачі оптимізації вибору, потужності і розташування модулів СЗЕ в енергетичній мережі. Це важливо для розробки оптимальних рішень планування завантаження/проектування енергостанцій.*

**Ключові слова:** системи зберігання енергії, безпека та надійність, оптимізація.

### Вступ

З розвитком і розповсюдженням ВДЕ (відновлюваних джерел енергії) в загальному обсязі генеруючих потужностей, а також поступовим переходом від централізованої системи енергопостачання до розподіленої посилюється увага до надійності, безпеки та стійкості електричних систем. Однією із загроз стабільної роботи електромережі може бути надмірне коливання потужності та існування автономного джерела живлення, пов'язаного з використанням великої кількості змінних ВДЕ. З іншого боку, оскільки споживання електро- і теплоенергії зростає, то пропорційно зростає і потреба в її додаткових запасах, яка може бути непередбаченою. Як наслідок, зміна напруги та неможливість збалансувати коливання пропозиції і попиту енергії можуть спричинити зрив у постачанні енергії, призвести до неефективного використання енергії та генераторів, нездатності використовувати ВДЕ та зменшити залежність від викопного палива, неможливість ефективного планування виробництва енергії тощо. Одним із варіантів розв'язання таких ситуацій є системи зберігання (накопичення, акумулювання) енергії – технології для перетворення електричної енергії в інші її форми, придатні для зберігання, в періоди відносно високого виробництва та низького попиту з подальшим її перетворенням знову у форму електричної енергії і віддачею в електромережу для подальшого використання в періоди низького виробництва або більш високого попиту [5].

Історично СЗЕ відігравали такі три основні ролі: зменшення витрат на енергію шляхом її

зберігання протягом непікових періодів, коли її ціна нижча, для використання в пікові години замість купівлі за більш високими цінами; для підтримки споживачів енергії у разі несправностей в енергетичній мережі (наприклад, через стихійні лиха або війни); для підтримки та поліпшення якості, частоти і напруги живлення [12].

Для України, окрім згаданого вище, роль СЗЕ є важливою з огляду на велику частку атомної генерації (60 %) та потребу енергосистеми України у збільшенні регулюючих потужностей. Отже, Україна повинна мати достатню генеруючу потужність для того, щоб задовольняти середній попит на електроенергію, а не пікові потреби. Україна є експортером електроенергії до європейських країн, тому впровадження таких проектів забезпечить рівномірність електропостачання. Оскільки система енергопостачання належить до критичної інфраструктури (КІ) [2; 23], Україна повинна мати розуміння європейських практик її захисту та надійності, як-от СЗЕ, тому що загроза її функціонуванню є загрозою національній безпеці.

У статті здійснено огляд СЗЕ з акцентом на можливі збої, які можуть бути характерними для різних технологій зберігання енергії, а також способи оптимізації їхньої роботи.

**Огляд літератури.** Оскільки зацікавленість у розширеному застосуванні різних систем СЗЕ (не беручи до уваги ГАЕС) з'явилася лише наприкінці першого десятиліття XXI ст. (в результаті тиску, викликаного дерегуляцією економіки та екологічними питаннями [10]), питання їх безпеки та оптимізації роботи висвітлено в літературі дуже стисло. Велика кількість літератури

зосереджена здебільшого на перевагах, а не на недоліках використання СЗЕ, акцентуючи увагу на здатності систем зменшувати коливання ВДЕ [7], їхніх економічних та технічних характеристиках [17]. Багатокритеріальний аналіз оцінки та порівняння ФЕ (фотоелектричних) СЗЕ вказує на те, що літій-іонні (Li-ion) акумулятори (батареї) є найкращим рішенням для зберігання сонячної енергії, оскільки вони здатні не тільки стримувати швидкі зміни напруги, але й пом'якшувати зміни напруги в мережі, викликані підключенням СЕС (сонячних електростанцій) [19]. Основні недоліки СЗЕ, про які йдеться в літературі, – це неможливість керування надмірним зарядом та розрядом, можливість випадкової втрати накопиченої енергії, висока вартість технологій тощо (наприклад, CAES, свинцево-кислотні (Lead-Acid) акумулятори) [16; 22].

Останні дослідження з оптимізації СЗЕ пов'язані з такими питаннями, як визначення оптимальної потужності технологій СЗЕ, методи прогнозування попиту на електроенергію з боку житлових домогосподарств для планування графіка навантажень, ефективність графіка навантажень відповідно до різних схем ціноутворення та ін. [1; 3; 4].

Питання оптимізації функціонування систем СЗЕ розкрито в контексті контрольних схем, коли можна належним чином регулювати рівні заряду (SOC) під час зміни потужності [14; 21]. Евристична оптимізація та нечіткі схеми згладжування є дуже популярними типами моделювання для таких завдань. Інший напрям літератури досліджує багатоцільову конфігурацію оптимізації гібридної системи накопичення енергії (HESS), щоб максимізувати стійкість згенерованої енергії вітру за мінімізованого інвестування в HESS. Для вирішення проблеми застосовано комбінацію методів багато- та монооб'єктної оптимізації [11]. Лінійне програмування було використано під час вивчення питання оптимальної потужності та кількості встановлених одиниць СЗЕ [6].

**Новизна.** Цю статтю присвячено порівняльному аналізу СЗЕ з погляду агрегації їх типів і висвітлення аспектів безпеки їхньої роботи, можливостей оптимізації їх функціонування та перспектив застосування в Україні. Результати дослідження можуть бути корисними енергогенеруючим компаніям під час ухвалення рішень щодо планування виробництва електро- чи теплоенергії, урядам країн під час розроблення енергетичних та екологічних стратегій.

**Класифікація СЗЕ.** Найпростіша класифікація СЗЕ порівнює системи за двома критеріями: функція та форма [10]. З погляду функції СЗЕ

поділяють на такі, основне призначення яких полягає в забезпеченні безперебійного енергопостачання (здебільшого на рівні домогосподарств), та такі, що призначені для так званого енергоменеджменту (переважно в промисловості), що дозволяє клієнтам «відкладати» попит на енергію з одного дня на інший для зниження витрат.

Класифікація СЗЕ за формою зберігання енергії є найпопулярнішою. Виокремлюють хімічні, електричні, магнітні та механічні системи. Хімічні системи покривають акумулятори та зберігаючі елементи на основі водню. Електромагнітні системи включають надконденсатори та надпровідники. Механічні системи можна розділити на накопичувачі кінетичної енергії, включаючи флюїди, та накопичувачі потенційної гідроенергії та стиснутого повітря (CAES). Зберігання теплової енергії (ЗТЕ) передбачає зберігання низькотемпературної енергії (накопичення холодної енергії, сховища криогенної енергії (CES)) та зберігання високотемпературної енергії (чутливі теплові системи (пари або акумулятори з гарячою водою), графіт, гарячі породи та бетон, системи латентного тепла (матеріали фазової зміни)) [5; 6; 12]. Температурна класифікація ЗТЕ залежить від того, чи робоча температура матеріалу зберігання енергії є вищою за температуру приміщення: з огляду на це ТЕС можна розділити на промислові охолодження (нижче ніж 18 °C), охолодження будівлі (за температури від 0 до 12 °C), опалення будівлі (за 25–50 °C) та промислове зберігання тепла (вище за 175 °C) [10].

Інша класифікація [19] розрізняє СЗЕ за масштабом/виходом енергії: великомасштабні електричні (гідроакумуляуючі станції, CAES, маховики), великогабаритні теплові (підземні сховища теплової енергії (UTES), розплавлені солі), малогабаритні електричні (акумулятори) і малогабаритні теплові (зберігання льоду, резервуари для гарячої та холодної води).

Що стосується типів електростанцій, то ГАЕС (гідроакумуляуюча станція), найбільш розповсюджена великомасштабна СЗЕ, пов'язана з гідроелектростанціями та вітровими електростанціями (ВЕС). CAES, ще одна єдина комерційно доступна технологія (крім ГАЕС), що здатна забезпечити надзвичайно велике зберігання і постачання енергії, працює на базі звичайних газових турбін та ВЕС. Енергетичні установки на ВЕС (вітер, сонячна енергія, енергія хвилі) можуть бути доповнені СЗЕ типу акумулятора NaS (натрієво-сірчана батарея) та паливними елементами (fuel cells). Зберігання енергії маховиками (Flywheel energy storage)

розглядається як підтримка ВЕС у поєднанні з іншими СЗЕ, а не як автономна установка. ВЕС також придатні для застосування надпровідних сховищ магнітної енергії (SMES) (єдина відома на сьогодні технологія для зберігання електричної енергії безпосередньо в електричному струмі) та надконденсаторів (SC).

Класифікація СЗЕ відповідно до рейтингу потужності та часу розряду є такою [10]:

- ГАЕС, CAES та CES застосовуються для пристроїв генерації енергії потужністю понад 100 МВт із погодинною та щоденною вихідною тривалістю. Вони можуть бути використані у великомасштабній генерації для вирівнювання навантаження та обертового резерву.

- Батареї, акумуляторні батареї, паливні елементи та елементи «Metal-Air» мають відносно швидку реакцію ( $< \sim 1$  с), відносно довгий час розряду (в годинах) і, отже, є більш прийнятними для так званого перекриття енергії. Типове значення потужності для цих установок становить близько 100 кВт•10 МВт.

- Маховики, акумулятори, SMES, конденсатори та надконденсатори є прийнятними переважно для установок потужністю нижче ніж 1 МВт. Ці СЗЕ мають швидку відповідь (мілісекунди) і тому можуть бути використані для підвищення якості згенерованої енергії, тобто в разі миттєвого падіння напруги, мерехтіння і короткочасного UPS (джерела безперебійного живлення).

І, зрештою, СЗЕ можна також класифікувати за тривалістю зберігання енергії, ефективністю циклу, щільністю енергії та потужності, життєвим циклом, вартістю системи, впливом на навколишнє природне середовище тощо.

**Аспекти безпеки і захисту СЗЕ.** З огляду на те, що СЗЕ перебувають у фокусі уваги відносно короткого часу, інформація про можливі випадки несправностей, що притаманні тим чи тим технологіям зберігання енергії, є неповною. Нижче узагальнено відомі недоліки, які можуть вплинути на безпечну експлуатацію виробничих потужностей, оснащених СЗЕ (див. табл.).

Таблиця. Основні недоліки та можливі ризики СЗЕ

Тип СЗЕ	Основні відомі недоліки	Можливі ризики
ГАЕС	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Дефіцит наявного рельєфу для резервуарів і дамб</li> <li>• Споживання великої кількості енергії для запуску системи</li> <li>• Тривалий час підготовки проєктів (зазвичай 10 років)</li> <li>• Висока вартість будівництва (зазвичай від 100 до 1000 дол. США)</li> <li>• Екологічні проблеми (необхідність видалення дерев та рослин з великої земельної ділянки перед затопленням водосховища)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Переповнення резервуара</li> </ul>
CAES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Залежність від рельєфу (бажана близькість шахт, соляних печер, водоносних горизонтів або виснажених газових родовищ)</li> <li>• Нижча ефективність у порівнянні з ГАЕС (42 %)</li> <li>• Негативний екологічний вплив</li> </ul>	Немає інформації
Акумулятори (батареї)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низька щільність енергії</li> <li>• Низька потужність</li> <li>• Високі витрати на технічне обслуговування</li> <li>• Короткий цикл життя</li> <li>• Обмежена здатність до розряду</li> <li>• Екологічний вплив (більшість батарей містять токсичні матеріали)</li> </ul>	Немає інформації
Свинцево-кислотні (LA) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Короткий цикл життя (500–1000 циклів)</li> <li>• Низька щільність енергії (30–50 Вт/кг) внаслідок високої щільності свинцю</li> <li>• Недостатня низькотемпературна продуктивність, що потребує наявності системи термічного управління</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Перезарядка призводить до викидів <math>H_2</math></li> <li>• Сульфатація в разі тривалого зберігання</li> </ul>
Нікель-кадмієві (NiCd) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Порівняно висока вартість (1000 дол. США/кВт•год), пов'язана з виробничим процесом</li> <li>• Залежність від глибини життєвого циклу, який може знизити тривалість життя системи</li> <li>• Притаманний «ефект пам'яті», коли батареї мають здатність повного заряду лише після серії повних розрядів</li> <li>• Екологічний вплив (кадмій є токсично важким металом)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Можливість термічних викидів</li> </ul>

Продовження таблиці

Тип СЗЕ	Основні відомі недоліки	Можливі ризики
Натрієво-сірчані (NaS) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>Необхідність роботи за високої температури (300–350 °C), для чого потрібне джерело тепла, яке використовує власну енергію заряду акумулятора, частково знижуючи його продуктивність</li> <li>Висока початкова вартість капіталу (2000 дол. США/кВт та 350 дол. США/кВт•год)</li> <li>Низька щільність енергії (120 Вт/кг) і потужності (150 Вт/кг)</li> <li>Кількість виробників цих акумуляторів надзвичайно обмежена</li> </ul>	Немає інформації
Літій-іонні (Li-ion) акумулятори	<ul style="list-style-type: none"> <li>Необхідність роботи за високої температури</li> <li>Різна теплова енергія, характерна для різних хімічних сполук</li> <li>Висока вартість (&gt; 600 дол. США/кВт•год) завдяки спеціальній упаковці та внутрішнім схемам захисту від перезарядки</li> <li>Нетривалий час збереження енергії (4–5 годин)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Експлуатація понад типове робоче вікно температури (0–50 °C) може призвести до розкладання органічного електроліту та горючого газу</li> <li>Перезарядка може призвести до появи літію на аноді, що є загрозою замикання</li> </ul>
Потокові (проточні) акумулятори	<p>Акумулятори з окислювальним ванадієм (VRB) та з бромистим цинком (ZBR):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>сильна залежність від навколишньої температури;</li> <li>невисокі значення питомої енергії (30–50 Вт•год/ кг);</li> <li>висока вартість технології;</li> <li>є більш складними системами в порівнянні зі звичайними акумуляторами.</li> </ul>	Немає інформації
Паливні елементи	<p>Паливні елементи з розплавленого карбонату (MCFCs):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>висока температура: клітини забирають багато часу, щоб досягти робочої температури;</li> <li>через високу температуру і корозійний характер електроліту є небезпечними для виробництва електроенергії на дому.</li> </ul> <p>Твердокристалічні паливні елементи (ТОФ):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>висока вартість будівельних матеріалів.</li> </ul>	Немає інформації
Маховики для зберігання енергії (FES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Коротка тривалість роботи</li> <li>Висока втрата саморозряду</li> <li>Низька щільність енергії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Можливість несправності ротора</li> </ul>
Надпровідні сховища магнітної енергії (SMES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Надпровідна котушка чутлива до змін температури</li> <li>Надійність роботи залежить від системи охолодження</li> <li>Лише невелика кількість SMES з невеликою місткістю є комерційно доступними</li> <li>Висока вартість</li> <li>Екологічні проблеми, пов'язані з сильним магнітним полем</li> </ul>	Немає інформації
Суперконденсатор (SC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Коротка тривалість роботи</li> <li>Високі втрати енергії внаслідок втрати саморозряду</li> </ul>	Немає інформації
Сховища криогенної енергії (CES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Відносно низька ефективність (40–50 %) залежно від поточного споживання енергії для зрідження повітря</li> <li>Технологія перебуває в стадії розробки</li> </ul>	Немає інформації

Відносно коротка тривалість накопичувальної здатності енергії, висока втрата фракції та низька щільність енергії є одними з головних недоліків, що стримують застосування у великій енергетиці таких СЗЕ, як маховикові системи, акумулятори, SMES та паливні елементи.

Як відносно новий та динамічний процес розробка та впровадження технологій зберігання енергії пов'язана з низкою проблем

безпеки. Отже, відкритими є питання щодо географічного розташування енергетичних об'єктів, де потрібно встановити СЗЕ, та щодо способу, у який ними оперують. Належні системи вентиляції та протипожежного захисту, термічне управління, взаємозв'язок з іншими системами (комунікації, системи контролю тощо) є одними з основних заходів забезпечення безпеки експлуатації СЗЕ.

Питання безпеки охоплюють не лише технічні питання, але й економічні та політичні аспекти. Наприклад, такі ситуації, коли енергопостачання не покриває потреби в енергії, становлять серйозну загрозу безпеці енергопостачання. Відсутність відповідних органів влади, які мають юрисдикцію та відповідальність за енергетичні проблеми в країні (державні чи місцеві органи влади тощо), може стати ще однією перешкодою для належного розвитку СЗЕ та їх інтеграції в наявну енергетичну систему.

**Планування системи накопичення енергії для ВДЕ: підхід до моделювання.** Оптимальне планування системи СЗЕ має включати вибір типу СЗЕ, а також визначення бажаної потужності і розташування системи [24]. Зазвичай як цільова функція приймається мінімальне споживання енергії і мінімальний діапазон зміни потужності акумулятора або максимізація прибутку ( $NPV$  – чистої приведеної вартості) станцій, що працюють на ВДЕ із застосуванням СЗЕ [8].

Вибір типу СЗЕ залежить від технічних характеристик СЗЕ, зокрема тривалості заряду та розряду, діапазонів потужності та щільності, а також від ресурсів компанії, її схильності до прийняття ризиків, пов'язаних із запровадженням того чи того типу СЗЕ.

Найпоширенішим моделюванням є техніко-економічна модель СЗЕ, що складається з трьох основних модулів: модуль розрахунку самоспоживання енергії, модуль розрахунку  $NPV$  та, як результат попередніх модулів, модуль оптимізації потужностей зберігання та системи генерації енергії [9; 13].

Коефіцієнт самоспоживання ( $SC$ ) – це співвідношення власного споживання енергії до загальної кількості енергії, яку згенеровано. Що нижчий  $SC$ , то більше згенерованої енергії відпускається до енергетичної мережі.  $SC$  отримують за формулою:

$$SC = \frac{E_c}{E_p} 100, \quad (1)$$

де  $E_c$  – спожита енергія за рік (кВт•год), яка, своєю чергою, дорівнює різниці між обсягом згенерованої енергії (кВт•год) за рік та обсягом енергії, що відпускається в мережу (кВт•год);  $E_p$  – обсяг згенерованої енергії за рік (кВт•год).

$NPV$  при даному інвестиційному році  $t$  розраховується як сума дисконтованих грошових надходжень та витрат протягом  $n$  років експлуатації акумуляторної системи. При цьому грошові витрати включають зазвичай інвестиційні витрати для генератора енергії і акумулятора, витрати на експлуатацію та технічне обслуговування. Грошові надходження складаються з: 1) електроенергії,

що споживається самостійно (тобто продукт електроенергії, виробленої протягом кожного року експлуатації системи і самоспожитої), помноженої на роздрібну ціну на електроенергію, та 2) проданої електроенергії (тобто продукту електроенергії, виробленої протягом кожного року роботи системи та  $1 - SC$ ), помножене на оптову ціну на електроенергію.

Для знаходження оптимального розміру СЗЕ та генератора енергії для кожного інвестиційного року та кожного зі сценаріїв ціни на електроенергію обчислюють  $NPV$  для різних комбінацій системи генерації енергії та потужності СЗЕ. З огляду на результати обчислень визначають таку комбінацію потужностей системи генерації енергії і її зберігання, що максимізує  $NPV$  загальної системи зберігання.

Оскільки оптимізація СЗЕ залежить від щорічного виробництва енергії, воно має бути детермінантою необхідної потужності системи генерації для визначення вартості інвестицій. Отже, потужність СЗЕ можна визначити також за формулою [18]:

$$ES_s = \frac{E_p}{E_{pa}}, \quad (2)$$

де  $ES_s$  – потужність СЗЕ;  $E_{pa}$  – річне виробництво енергії на кВт встановленої потужності.

Що стосується розташування СЗЕ, то відносно ВЕС СЗЕ може бути розташована як у точці спільного з'єднання (PCC), так і обладнана вітровими генераторами (WTG). Кожна вітрова турбіна має бути обладнана надконденсатором, підключеним до постійного струму конвертера.

## Висновки

Здійснений огляд свідчить про важливість розгляду СЗЕ з метою забезпечення безпечної та надійної генерації електроенергії. Класифікація різних СЗЕ дає змогу виявляти її критичні ознаки, як-от функція, форма, вихід, масштабність та ін. Розвиток енергетичних інновацій залежить не тільки від їхніх особливостей, але й від їхнього зв'язку з енергетичною інфраструктурою. Отже, важливо враховувати не лише проблеми безпеки та недоліки СЗЕ, але й те, як їх вирішення залежить від різних навколишніх умов (наприклад, від країни, географічного місця розташування, топографічних особливостей місцевості). Навіть тоді, коли беруться до уваги всі відомі ризики, можуть з'явитися нові. Планування оптимізації СЗЕ має охоплювати вибір типу СЗЕ, її оптимального розміру та розміщення.

*Список використаної літератури*

1. Гребенюк А. Н. Способи акумуляції енергії нетрадиційних джерел / А. Н. Гребенюк // Гірничі електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 93. – С. 131–136.
2. Заславський В. А. Принцип різнотипності та особливості дослідження складних систем з високою ціною відмови / В. А. Заславський // Вісник Київського університету. – 2006. – № 1. – С. 136–147.
3. Федорчук С. О. Використання акумуляції енергії для оптимізації режиму роботи відновлювальних джерел енергії у енергосистемі / С. О. Федорчук // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 31 (1253). – С. 59–63.
4. Шульженко С. В. Розвиток відновлюваної енергетики з використанням акумуляційних технологій / С. В. Шульженко, О. Л. Радченко // Проблеми загальної енергетики. – 2015. – № 4 (43). – С. 31–43.
5. About Electricity Storage [Electronic resource] / United States Environmental Protection Agency. – Mode of access: <https://www.epa.gov/energy/electricity-storage>. – Title from the screen.
6. Alsaidan I. Distributed Energy Storage Sizing for Microgrid Applications [Electronic resource] / I. Alsaidan, A. Khodaei, W. Gao // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). – 2016. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7519904/> – Title from the screen.
7. Beaudin M. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review / M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberg // Energy for Sustainable Development. – 2010. – № 14 (4). – P. 302–314.
8. Berrada A. Optimal Modeling of Energy Storage System / A. Berrada, K. Loudiyi // International Journal of Modeling and Optimization. – 2015. – № 5 (1). – P. 71–77.
9. Bostrom C. Optimization of a Household Battery Storage The Value of Load Shift [Electronic resource] / C. Bostrom. – Mode of access: <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:946072/FULLTEXT01.pdf>. – Title from the screen.
10. Chen H. Progress in electrical energy storage system: A critical review / H. Chen, T. Cong, W. Yang // Progress in Natural Science. – 2009. – № 19. – P. 291–312.
11. Cheng S. Multi-Objective Configuration Optimization of a Hybrid Energy Storage System / S. Cheng, W-B. Sun, W-L. Liu // Applied Sciences. – 2017. – № 7 (163). – P. 1–11.
12. Electrical Energy Storage. White Paper [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>. – Title from the screen.
13. Hoppmann J. The Economic Viability of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems – A Review and a Simulation Model / J. Hoppmann, J. Volland, T. Schmidt // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2014. – № 39. – P. 1101–1118.
14. Jusoh M. Control Strategy of a Grid-connected Photovoltaic with Battery Energy Storage System for Hourly Power Dispatch / M. Jusoh, M. Daud // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2017. – № 8 (4). – P. 1830–1840.
15. Li X. Application of fuzzy wavelet transform to smooth wind/pv hybrid power system output with battery energy storage system / X. Li, Y. Li, X. Han // Energy Procedia. – 2011. – № 12. – P. 994–1001.
16. Loisel R. Power system flexibility with electricity storage technologies: A technical–economic assessment of a large-scale storage facility / R. Loisel // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – № 42 (1). – P. 542–552.
17. Paska J. Technical and economic aspects of electricity storage systems co-operating with renewable energy sources / J. Paska, P. Biczek, M. Klos // Electrical Power Quality and Utilisation. EPQU 2009. 10th International Conference. – 2009.
18. Scharpe G. Analysis and optimization of energy storage of solar photovoltaic power at low voltage levels [Electronic resource]. – Mode of access: [https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/377/131/RUG01-002377131\\_2017\\_0001\\_AC.pdf](https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/377/131/RUG01-002377131_2017_0001_AC.pdf). – Title from the screen.
19. Stuchly J. A Simulation of Energy Storage System for Improving the Power System Stability with Grid-Connected PV using MCA Analysis and LabVIEW Tool / J. Stuchly, S. Misak, L. Prokop // Advances in Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – № 12 (2). – P. 127–136.
20. Technology Roadmap Energy. Storage [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>. – Title from the screen.
21. Teleke S. Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources / S. Teleke, M. Baran, S. Bhattacharya // IEEE Transactions Sustainable Energy. – 2010. – № 1 (3). – P. 117–124.
22. Yang Z. Enabling Renewable Energy and the Future Grid with Advanced Electricity Storage [Electronic resource] / Z. Yang, J. Liu, S. Baskaran. – Mode of access: <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/1009/young-1009.html>. – Title from the screen.
23. Zaslavskiy V. Risk analyses and redundancy for protection of critical infrastructure. Monographs of System Dependability / V. Zaslavskiy, Y. Ievgienko // Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej. – 2010. – P. 161–173.
24. Zhao H. Review of energy storage system for wind power integration support / H. Zhao, Q. Wu, S. Hu // Applied Energy. – 2015. – № 137. – P. 545–553.

*Volodymyr Zaslavskiy, Maya Pasichna*

## **ENERGY STORAGE SYSTEMS: ASPECTS OF SAFETY AND OPTIMIZATION**

One of the threats to a stable setup of the power grid may be an excessive power fluctuation and the existence of an autonomous power supply associated with the use of a large number of intermittent renewable energy sources (RESs). On the other hand, as electricity and heat consumption is increasing, the demand for its additional energy storage may increase proportionally, and this might be unpredictable. As a result, changing voltage and impossibility to balance fluctuations in energy supply and demand can lead to a breakdown in energy supply, inefficient use of energy and generators, inability to use RESs and reduce dependence on fossil fuels, impossibility of efficient energy planning, etc. One of the options for addressing such situations is the energy storage systems (ESSs).

Since the practical use of ESSs is a relatively new process; the potential of ESS development depends on the study of the inherent disadvantages and risks. The article presents the classification of the ESSs and provides a list of the known risks that are inherent to them. The simplest classification of ESSs compares

the systems from the point of view of two criteria: function and form. From the standpoint of the function, ESSs are divided into those whose main purpose is to ensure uninterrupted power supply and those designed for so-called energy management (mainly for industry). The classification of ESSs in the form of energy storage is the most popular and can be classified as chemical, electrical, magnetic, and mechanical.

Given that ESSs are in focus for a relatively short time, the information on possible malfunctions that are inherent to the technology of energy storage is incomplete. Nevertheless, it is reported that the relatively short duration of energy storage, high fraction loss, and low energy density are some of the main drawbacks of the use of such ESSs as flywheels, batteries, SMES, and fuel cells. It is important to highlight that security issues include not only technical issues but also economic and political aspects.

The optimal planning of the ESS should include the choice of the ESS type, as well as the determination of the desired capacity and location of the system. Typically, the target function is the minimum power consumption and the minimum range of battery power change or the maximization of profit of the power plants equipped with ESS.

The ESS choice depends on the technical characteristics of the technology as well as the company's rewards, its propensity to accept the risks associated with the introduction of the ESS. The most commonly used optimization is the technical and economic modelling which consists of three main modules: the self-consumption calculation module, the NPV calculation module, and, as a result of the previous modules, an optimization module for the storage capacity and energy generation system.

**Keywords:** energy storage systems, safety and security, optimization.

*Матеріал надійшов 10.04.2018*