

УДК 620.93

**А. В. ІВАХНОВ, О. П. ЛАЗУРЕНКО, С. О. ФЕДОРЧУК****СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ЇХ ПОЄДНАННЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ**

Проведено літературний огляд існуючих систем акумулювання електроенергії, визначені їх позитивні та негативні сторони, практичне застосування. Проаналізовані варіанти гібридних систем акумулювання. Зроблено висновок про доцільність подальшого розвитку гібридних систем накопичення електроенергії

**Ключові слова:** гідроакумулююча електростанція, пневмоакумулятор, супермаховик, системний накопичувач електроенергії, паливна комірка, проточний редокс-акумулятор, суперконденсатор, індуктивний надпровідниковий накопичувач.

**А. В. ИВАХНОВ, О. П. ЛАЗУРЕНКО, С. О. ФЕДОРЧУК****СИСТЕМЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ИХ СОЧЕТАНИЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

Проведен літературний огляд існуючих систем акумулювання електроенергії, визначені їх позитивні та негативні сторони, практичне застосування. Проаналізовані варіанти гібридних систем акумулювання. Сделано вывод о дальнейшей целесообразности дальнейшего развития гибридных систем накопления электроэнергии.

**Ключевые слова:** гидроаккумулирующая электростанция, пневмоаккумулятор, супермаховик, сетевой накопитель электроэнергии, топливная ячейка, проточный редокс-акумулятор, суперконденсатор, индуктивный сверхпроводящий накопитель.

**A. V. IVAKHNOV, O. P. LAZURENKO, S. O. FEDORCHUK****POWER STORAGE SYSTEMS, OPPORTUNITIES ANALYSIS AND THEIR COMBINATIONS FOR USE IN THE POWER SYSTEM**

A literature review of existing electric power storage systems, their positive and negative sides, practical application was made. The variants of hybrid storage systems are analyzed. A conclusion is made about the further expediency of the hybrid systems development for the accumulation of electric power.

**Keywords:** pumped hydro storage, compressed air energy storage, flywheel, battery, fuel cell, flow battery, supercapacitor, superconducting inductive energystorage.

**Вступ.** Широкий розвиток відновлювальної генерації та її залежність від параметрів навколишнього середовища, а також недостатня кількість резервів регулюючих потужностей в деяких регіонах вимагає впровадження систем акумулювання електроенергії. Відповідно цій проблемі в Україні, був присвячений, окремий блок на Українському енергетичному форумі (від 28-29го вересня) 2017 в м. Одеса, під лозунгом: «Сучасні електро-акумулюючі системи – один зі шляхів негайного рішення існуючої проблеми відсутності достатніх потужностей для надання додаткових послуг в ОЕС України» [1]. Додатковими послугами є системи акумулювання електроенергії що приймають участь у балансуванні електроенергії.

**Традиційна система** «Традиційною» системою участі у балансуванні електроенергії та її акумулюванні є, відповідно, ГЕС та ГАЕС. До

позитивної сторони в цій технології можна віднести її повну екологічну безпеку для людини, а також високу швидкість маневрування потужністю в порівнянні до такої спроможності теплових та атомних станцій, як показано в табл.1. Негативною їх стороною є складність вибору будівельного майданчика, затоплення великої площі родючих земель, і спірний момент відносно великої маневреності – вона не достатня для регулювання миттєвих стрибків потужності в енергосистемі, окремо для ГАЕС, недоліком також є тривалий час переходу від режиму генератора в насосний і навпаки.

Взагалі, в балансуванні потужності в енергосистемі може брати участь також будь-яка електростанція. Існує багато обмежень щодо їх участі через особливості кожної. Дані щодо регулюючих потужностей та участі у балансуванні деяких електростанцій наведено в табл.1:

Таблиця 1 – Характеристика регулюючих можливостей різних типів електростанцій [2]

Тип електростанції	Технічний мінімум навантаження, в % (відношення мінімально допустимої потужності відносно номінальної)	Регулювальний діапазон, в %	Час набору повної потужності, хв.	
			Після зупинки	З гарячого стану
АЕС	85-90	10-15	390-660	60
Потужні ТЕС	70-80	20-30	90-180	20-50
ГТУ	0	100	15-30	0,5
ГЕС	0	100	1-2	0,25-0,5*
ГАЕС	0	200	1-2	0,25-0,5*

\*При обертанні в режимі холостих обертів

**Види систем накопичення** На сучасному етапі існує велика кількість систем акумулювання,

© А.В. Івахнов, О.П. Лазуренко, С.О. Федорчук, 2017

основними з яких, за принципом роботи та тривалістю зберігання, є:

- 1) Механічні накопичувачі
  - Гідроакумуляючі електростанції (ГАЕС, PHS, довгострокове зберігання [3]);
  - Пневмоакумулятори (CAES, довгострокове зберігання [3]);
  - Супермаховики (Fly wheels, короткострокове зберігання [3]).
- 2) Електрохімічні накопичувачі
  - Акумуляторні батареї або системні накопичувачі електроенергії (СНЕ, довгострокове зберігання [3]);
  - Паливні комірки (fuel cells, довгострокове зберігання [3]);
  - Проточні редокс-акумулятори (ПРА, Flow battery, довгострокове зберігання [3]);
  - Суперконденсатори (super capacitors, короткострокове зберігання [3]).
- 3) Електромагнітні накопичувачі
  - Індуктивні надпровідникові накопичувачі (SIES, довгострокове [3]).

Кожен з цих видів має свої особливості. На рис. 1 показано, як ці системи співвідносяться між собою за тривалістю розряду та потужністю, згідно даних компанії Siemens.

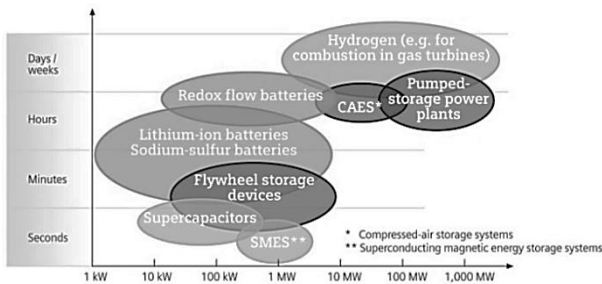


Рис. 1 – Системи накопичення електроенергії за тривалістю енергопостачання та потужності [4]

**Системні накопичувачі електроенергії.** В своєму простому вигляді це звичні для усіх видів споживачів акумулятори, що живлять мобільні телефони, ноутбуки та всі інші типи портативних електронних пристроїв. У відношенні до електроенергетики - це є системи накопичення електроенергії СНЕ великої ємності. Існує багато типів акумуляторних батарей, які відрізняються за електролітом – Li-ion, Na/NiCl, Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-H<sub>2</sub>, Ni-MH, Ni-Zn, Pb, Ag-Zn, Ag-Cd, Zn-Br, Zn-Cl. Електроліт кожного з цих типів наділяє акумулятор певними характеристиками, що робить їх вигідними для застосування в певних сферах. Для електроенергетики найчастіше застосовуються: літій-іонні, свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, цинк-бромні. Найновішим прикладом такої системи є, збудована восени 2017 року американською фірмою Tesla, в Австралії Large-Scale Powerpack, ємністю 129 МВт-год та потужністю 100 МВт [5]. Установка виконана на основі Li-ion технології, та буде забезпечувати достатнє безперебійне живлення для більш, ніж 30 тис. будинків. Заряд цієї системи запроєктовано від вітряної електростанції Hornsdale, що розташована поблизу міста Джеймстаун, в період

низьких навантажень на енергосистему електроенергії з вітропарку під-заряджатиме систему накопичення, а в часи піків споживання буде видавати потужність до системи. В контракті на будівництво було передбачено 100 днів на реалізацію проекту, компанія впоралася швидше запланованого терміну. Це вказує на те що перевагою накопичення електроенергії за допомогою хімічних пристроїв є:

- 1) Швидке встановлення;
- 2) Модульність конструкції – дає змогу розширювати ємність, проводити швидко заміну пошкоджених елементів, а також доставляти окремі попередньо заряджені модулі в регіони де сталася надзвичайна подія;
- 3) Час переходу між режимами заряд/розряд, залежить лише від часу перемикання комутуючих пристроїв, настільки малий що в розрахунках його допускається приймати за 0 сек.;
- 4) Частина зараз використовуваних акумуляторів є абсолютно безпечними для навколишнього середовища;
- 5) Відсутні рухомі частини;
- 6) Усі перемикання відбуваються в автоматичному режимі, що зменшує вплив людського фактору практично нанівець.

А. Недоліки:

- 1) Складна утилізація після закінчення терміну служби акумуляторних елементів;
- 2) Обмеженість циклів заряду/розряду;
- 3) Частина акумуляторів є токсичними, що сильно підвищує складність експлуатації

**Паливні комірки:** Це пристрої, що генерують електроенергію від хімічної реакції (за участю водню, з парового риформінгу метану, вугілля, окису вуглецю, спиртів, гідразину, інших органічних речовин, а в якості окиснювача – повітря, перекис водню, хлор, бром, азотна кислота та ін.) в спеціальній, для цієї технології, комірці (Fuel cells). У випадку водню це, так назване, «холодне горіння» водню. Технологія паливних комірок є дуже перспективною завдяки своїй автономності та можливості застосуванні в будь-яких сферах, від маленьких електронних пристроїв до великих систем накопичення електроенергії.

В. Примір встановлення – Південна Корея, місто Хвазонг, де встановлені паливні комірки потужністю 2,8 МВт кожна, на загальну потужність 59 МВт [6]. Переваги:

- 1) Не мають викидів, результат їх роботи – електроенергія, вода та тепло;
- 2) Довговічні;
- 3) Швидкий перезаряд;
- 4) Незначна залежність коефіцієнту корисної дії від коефіцієнту завантаження.

Недоліками даної технології є:

- 1) Залежність від температури навколишнього середовища;
- 2) Перезарядка відбувається шляхом зовнішнього завантаження;
- 3) Складність зберігання водню;

4) У випадку водню - низька питома енергія на одиницю об'єму, що вимагає його зберігання під дуже високим тиском;

5) В значній мірі - інертні, що в умовах пікових чи імпульсних навантажень потребують певного запасу потужності або застосування інших технічних рішень (СНЕ, ПРА чи суперконденсаторів)

**Проточні редокс-акумулятори.** В першому приближенні це акумулятор з рідким електролітом (Flow Battery). Принцип їх роботи заснований на взаємодії двох рідких «заряджених» електролітів, що прокачуються через спеціальну комірку за допомогою насосів. В комірці і відбувається продукування електричного струму. Кожен електроліт має свій бак, а в комірці при протіканні вони розділені мембраною-сепаратором, через яку проходять іони так як і в звичайному електрохімічному акумуляторі. Через те що, в випадку ПРА, ці електроліти грають роль позитивного та негативного електродів, то їх часто так і називають – «рідкі електроди». Примір встановлення – Сан Дієго (Каліфорнія), пілотна система зберігання на 2МВт/8МВт з застосуванням ванадію[7]. До переваг можна віднести:

1) Розділення речовини, що відповідає за зберігання енергії (електролітів), від пристрою в якому виробляється струм.

2) Завдяки першій перевазі, перезаряд може відбуватися не тільки звичайним підключенням до джерела струму, але й просто заміною спрацьованого електроліту на новий, така перезарядка займе лишень декілька хвилин, що є дуже зручним в випадку доставляння модулів системи акумуляування в місце надзвичайної ситуації, або якщо застосовувати такі системи в автомобілях;

3) Надійні та довговічні, кількість циклів заряду-розряду більше ніж 10 000;

4) Роздільне зберігання активних речовин та єдиний генеруючий модуль запобігає виникненню короткого замикання та перегрівання.

Недоліки:

1) Складна система в порівнянні зі звичайними акумуляторами;

2) Сильна залежність від температури навколишнього середовища;

3) Мала щільність зберігання енергії;

4) Складність виготовлення мембран необхідних для роботи;

5) Мають рухомі частини – насос.

**Суперконденсатори:** Відмінність від звичайного конденсатора тим, що має дуже велику ємність. Суперконденсатор зберігає енергію за допомогою статичного заряду. Існує три основних види: електростатичний з сухим сепаратором, електролітичний, суперконденсатор. Відрізняються ємністю і сферою застосування відповідно до виду. Приклад встановлення – в якості допоміжного в гібридній системі, як доповнення до електрохімічних акумуляторів. На сонячній станції компанії Duke Energy, США, потужністю 277 кВт[8]. Переваги:

1) Дуже швидка зарядка і розрядка;

2) Велика кількість циклів заряду/розряду (в годинах – понад 30 тис. год.);

3) Великий діапазон робочої температури;

4) Велика питома потужність до 10тис.Вт/кг

Недоліками даної технології є:

1) Невелика питома енергоємність 5 Вт·год/кг;

2) Короткочасний термін зберігання електроенергії;

3) Робота з високою напругою може знизити термін служби конденсатору;

4) Високий саморозряд;

5) Лінійний характер розряду не дозволяє використовувати всю накопичену енергію.

**Гідроакумуляючі електростанції.** ГАЕС є традиційними й давно відомими об'єктами для накопичення електроенергії. Принцип роботи, як і гідроелектростанцій, оснований на використанні перепаду рівнів води, з різницею в тому, що верхній б'єф це - великий басейн, а гідромашина працюють у двох режимах: під час генерування - як турбіна, що приводиться в рух водою накопиченою в басейні, а в період накопичення - як насос, що заповнює басейн. Прикладом є ГАЕС «Бас Каунті», що побудована в США, Вірджинія потужністю 3003 МВт. Перепад б'єфів 380 м. Запасає енергію для більш ніж 60 мільйонів людей в 13 штатах [9]. Тут перевагами є:

1) Екологічно чисті;

2) Невисокі затрати;

3) Тривалий строк служби, та можливість його подовження капітальним ремонтом;

4) Довготривале зберігання;

5) Можливість використовувати в якості басейну старі закриті шахти.

Недоліки проявляються в наступному:

1) Складність вибору місця для будівництва;

2) Довготривале спорудження нових потужностей;

3) Дуже інертні в порівнянні до нових видів акумуляування – довгий час переходу з турбінного в насосний режим. Хоча зміна потужності чи його зупинка потребують декількох секунд, та запуск в турбінному режимі з зупиненого положення з синхронізацією та набором потужності складає 1-2 хв., а при холостому ході 15-30 сек.;

4) Не реагують на імпульсні стрибки напруги;

5) Наявність великої кількості рухомих частин.

**Пневмоакумулятори.** Акумулятори що запасають енергію в вигляді стисненого повітря. В момент накопичення вмикається компресор, що стискає повітря в спеціальний резервуар під великим тиском. Коли необхідно повернути електроенергію до системи, то повітря з енергією високого тиску направляється до турбіни, що з'єднана з генератором. В першому приближенні за принципом роботи цей спосіб зберігання енергії можна порівняти з ГАЕС. Приклад встановлення – Хунторф, Німеччина, 290 МВт [10]. Тут перевагами є:

1) Довготривале зберігання потенційної енергії;

2) Швидкий перехід поміж режимами заряд/розряд, відбувається за декілька секунд;

3) Позичуються як пожежобезпечна технологія;

4) Енергоємність в 2-3 рази вище ніж у хімічних акумуляторів;

5) Екологічно чисті

Недоліки цієї технології такі:

- 1) Робота з високим тиском;
- 2) Наявність рухомих частин;
- 3) Виділення тепла під час стискання що погіршує коефіцієнт корисної дії.

**Супермаховики.** Один з видів маховика, що призначений для накопичення механічної енергії, на відміну від звичайних маховиків здатний накопичувати більше енергії завдяки застосуванню в конструкції магнітних підшипників та розташуванню обертОВОї частини маховика у вакуумі. Приклад встановлення – США, Стефентаун, компанія Veason збудувала 20 МВт систему накопичення на супермаховиках [11]. Переваги:

- 1) Довговічність, хоча кількість циклів заряд/розряд обмежена;
- 2) Не зважаючи на те, що конструкція передбачає обертОВІ частини, які рухаються з надзвичайно високою швидкістю, проте заходи безпеки роблять його безпечним при пошкодженні;
- 3) Коефіцієнт корисної дії досягає 98%;
- 4) Простіший та дешевший в виготовленні, ніж хімічний акумулятор;
- 5) Екологічно чисті;
- 6) Швидке накопичення енергії;
- 7) Здатні працювати в будь-якому температурному діапазоні.

Недоліки:

1) Наявність гіроскопічного ефекту обумовленого високим моментом імпульсу маховика, що обертається, та який перешкоджає зміні напрямку осі обертання маховика. Це ускладнює транспортування маховиків, що вже накопили енергію. Тому різницею стаціонарних та мобільних супермаховиків є наявність у мобільних карданового підвісу, який дає змогу транспортувати «заряджені» супермаховики, проте ускладнює та здорожує конструкцію;

2) Неможливість встановлювати в якості джерела живлення для автомобілів. Проте в цьому напрямку ведуться розробки суперваріатора, для плавного відбору енергії;

Таблиця 2 – Коротка інформація про сучасні технології зберігання та придатності впровадження в різних вузлах [13]

Технологія в фокусі дослідників	Традиційна генерація	Відновлювальна генерація	Відновлювальні міні-мережі	В вузлах передачі	В вузлах розподілення	В вузлах навантаження
ГАЕС	Придатно	Розвивається	Непридатно	Придатно	Розвивається	Непридатно
Пневмоакумулятори	Придатно	Розвивається	Непридатно	Придатно	Розвивається	Непридатно
Електрохімічні	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Придатно	Придатно	Придатно
Хімічні	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Непридатно	Розвивається
Електромагнітні	Непридатно	Розвивається	Розвивається	Придатно	Придатно	Непридатно
Теплова (маневрування джерелом енергії)	Придатно	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Розвивається	Придатно

3) Швидкий розряд.

**Індуктивні надпровідникові накопичувачі.** Накопичують енергію в магнітному полі індукційної котушки, в якій струм циркулює без втрат. Примір встановлення – Японія, Чубу, потужністю 1 МВА [12]. Переваги:

- 1) Включення в роботу займає мілісекунди, що дає змогу реагувати на імпульсні зміни в енергосистемі;
- 2) Винятково екологічно чисті – не відбувається ніяких хімічних реакцій, не має ніяких відходів в процесі роботи, не використовуються шкідливі речовини;
- 3) Можливе довгострокове зберігання в формі магнітної енергії;
- 4) Важлива перевага з практичної точки зору є можливість живлення установки від джерела з малою електричною потужністю;
- 5) Можливість видачі в момент імпульсу великих значень струму (відповідно потужності), що обмежена лише пропускну здатністю комутуючих та провідникових пристроїв;
- 6) Можливість аварійного скидання енергії без використання баластних опорів.

Недоліки:

- 1) Необхідність дорогої та складної системи охолодження та термостатування для досягнення і підтримання надпровідного стану;
- 2) Необхідність компенсації великих електродинамічних зусиль в активній зоні;
- 3) Велика кількість обертОВИХ елементів;
- 4) Робота з низькими температурами.

**Можливість застосування.** Як видно вище, кожна з технологій має свої переваги та недоліки, через які технології можуть бути застосовані в тих чи інших вузлах, або навпаки не можуть. У табл. 2 наведено дані результатів дослідження американського департаменту енергетики (The US DOE) 2015 року, що показують можливість застосування різних технологій акумулювання в певних вузлах енергосистеми.

Ці дані представлені як ознайомчі, через те що базуються на типовому їх використанні, можуть відрізнятися в певних умовах.

### Гібридні системи накопичення енергії.

Гібридна СНЕ складається з двох або більше систем акумулявання, як показано на рис. 2. У випадку з двома системами: одна відповідає за покриття потужних довготривалих просідань та піків, а друга відповідно за компенсацію короткострокових відхилень та інших перехідних процесів системи. Логічним є що для цих систем різні вимоги, до першої це велика потужність та допустимість брати до уваги меншу кількість циклів заряду/розряду, а друга навпаки має витримувати велику кількість циклів заряду/розряду, швидкий час відклику та відповідно мати швидкодіючі комутуючі пристрої. Переваги гібридних систем [14]:

- 1) Менші інвестиції в будівництво, за рахунок розподілення енергії та потужності;
- 2) Збільшення ефективності системи, і як наслідок якість електричної енергії;
- 3) Збільшення терміну зберігання енергії та терміну роботи системи, за рахунок оптимізації роботи та зниження динамічного напруження.



Рис. 2 – Базова структура системи накопичення електроенергії [14]

Огляд літератури показує, що наразі створення саме гібридних систем є дуже перспективним, і такі системи показують відмінні результати в різних сферах застосування. В автономних micro-grid системах частіше використовується поєднання індуктивних напівпровідникових накопичувачів та літій-іонних батарей [15]. В такому сполученні акумулятори компенсують глибокі та довготривалі піки, так як мають обмежене число циклів заряду/розряду, але здатні тривалий час зберігати енергію, а індуктивні накопичувачі приймають на себе короткочасні різкі піки завдяки необмеженому числу заряду/розряду та миттєвому відклику на зміни

в мережі. На рис.3 показано результати моделювання гібридної системи поєднання індукційного надпровідникового накопичувача та літій-іонних батарей при відпрацюванні випадкового навантаження. За таким самим принципом працює гібридна система «суперконденсатор/літій-іонний акумулятор» [16].

Схожі поєднання застосовуються в автомобільній техніці – «суперконденсатор/акумулятор» [17], а також «акумулятор/паливна комірка» [18] та домогосподарствах: один будинок [19], району споживачів, регіону побутових споживачів [20].

Для окремо розташованих відновлювальних джерел генерації [21], [22] також застосовуються комбінації «суперконденсатор/акумулятор». Модель та осцилограма роботи такої системи показана на рис. 4. Осцилограма моделі демонструє спроможність такої гібридної системи повністю реагувати на усі коливання в системі.

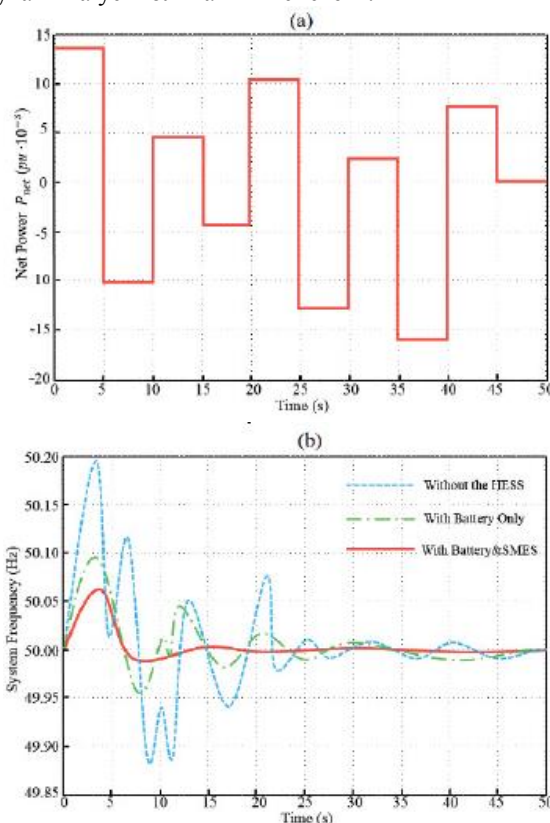


Рис. 3 – Ефект роботи гібридної системи на стабілізацію частоти в мережі [15]:

- а) випадкове навантаження;
- б) осцилограми частоти мережі.

Окрім розглянутих варіантів можуть компонуватися й інші, що взаємодоповнюють одна одну – виключаючи недоліки одне одного.

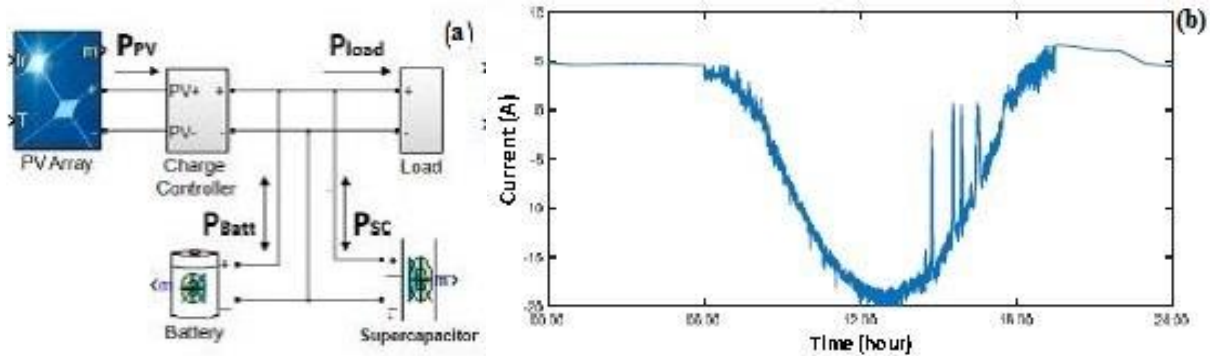


Рис. 1 – Модель та результати роботи гібридної системи суперконденсатор/акумуляторна батарея  
 а – модель; б –результат роботи

**Висновок.** Огляд літератури показує що гібридні накопичувачі є дуже перспективним напрямком що бурхливо розвивається, під впливом наростаючої кількості потужностей відновлювальної генерації що має залежність від багатьох факторів, а також для регіонів де зберігається традиційна генерація у великих масштабах що провокує проблему маневрених потужностей для підтримки балансу, та їх просто нестача.

Необхідна розробка математичної та комп'ютерної моделей, на основі яких досліджувати взаємну роботу різних типів накопичувачів енергії. Окрім цього, в рамках України, також видно що, є необхідність нової системи енергоринку, де будуть широко застосовуватися накопичувачі електроенергії, в тому числі й гібридні. Це вимагає нових методик розрахунку потужності балансування за допомогою накопичувачів для різних вузлів встановлення.

#### Список літератури

1. Вимоги сучасності - технічна необхідність та економічна доцільність модернізації ринку електричної енергії [Електронний ресурс] // *cigre*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: [http://cigre.org.ua/files/2017.09.28\\_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf](http://cigre.org.ua/files/2017.09.28_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf).
2. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики [Електронний ресурс] / [Е. Т. Базеев, Б. Д. Билека, Е. П. Васильев та ін.] // *Енергетика: історія, теперішнє та майбутнє*. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>.
3. A. Andrijanovits, H. Hoimoja, D. Vinnikov. Comparative Review of Long-Term Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems // *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija, 2012. – No. 2(118). – P. 21–26.
4. Smart Grids and Energy Storage Bottled Sunlight [Електронний ресурс] // *Pictures of the Future*. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled-sunlight.html>.
5. Tesla запустила найбільший у світі акумулятор [Електронний ресурс] // *Факти*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://fakty.ua/251724-tesla-zapustila-samyj-bolshoj-v-mire-akkumulyator>.
6. World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea [Електронний ресурс] // *Power*. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/>.
7. SDG&E and Sumitomo unveil largest vanadium redox flow battery in the US [Електронний ресурс] // *Energy Storage*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.energy-storage.news/news/sdgc-and-sumitomo-unveil-largest-vanadium-redox-flow-battery-in-the-us>.

8. A Hybrid Approach to Energy Storage [Електронний ресурс] // *Electronic Design*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage>.

9. Bath County Pumped Storage Station [Електронний ресурс] // Retrieved. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: [www.virginiaplaces.org](http://www.virginiaplaces.org).

10. Creating renewable energy storage out of hot air [Електронний ресурс] // *New atlas*. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://newatlas.com/ricas-2020-aa-compressed-air-energy-storage/48661/>.

11. Fact Sheet: The Department of Energy's Loan Programs [Електронний ресурс] // U.S. Department of Energy. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://web.archive.org/web/20100527034110/http://www.energy.gov/8719.htm>.

12. SMES [Електронний ресурс] // *ESAS*. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID693.pdf>.

13. Innovation Outlook: Renewable Mini-grids [Електронний ресурс] // *IRENA*. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.irena.org/publications/2016/Sep/Innovation-Outlook-Renewable-mini-grids>.

14. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. // *ELSEVIER*. – 2015. – №73. – С. 103–111.

15. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid / [L. Jianwei, Y. Qingqing, Y. Pengfei та ін.] // *ELSEVIER*. – 2016. – №103. – С. 82–87.

16. Wenlong J. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview / J. Wenlong, H. Chean, H. Shung. // *IEEE*. – 2017. – №11. – С. 461–469.

17. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / M. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon. // *IEEE*. – 2008. – №57. – С. 2721–2735.

18. Jiang Z. A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source / Z. Jiang, R. Dougal. // *IEEE*. – 2006. – №53. – С. 1094–1104.

19. Bocklisch T. Intelligente dezentrale Energie speicher systeme. *Umwelt Wirtschafts Forum* / Bocklisch. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – №22. – С. 63–70.

20. Nicolai S. Hierarchische Speichereinsatzoptimierung / S. Nicolai, P. Bretschneider, D. Westermann. // *Autom.* – 2014. – №62. – С. 364–374

21. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems / [L. Chong, Y. Wong, R. Rajkumar та ін.] // *ELSEVIER*. – 2016. – №66. – С. 174–189.

22. Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household / W. C. Lee, W. W. Yee, K. R. Rajprasad, I. Dino. // *ELSEVIER*. – 2016. – №107. – С. 232–236.

#### References (transliterated)

1. Requirements of modernity - technical necessity and economic feasibility of modernization of the market of electric energy [Electronic resource] // *cigre*. – 2017. – Access to the website: [http://cigre.org.ua/files/2017.09.28\\_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf](http://cigre.org.ua/files/2017.09.28_06.suchasni-elektro--akumulyuyuchi-sistemi---dlya-nadannya-dopomijnih-poslug--v-oes-ukrayini.pdf).

2. Development of thermal power and hydropower [Electronic resource] / [E. T. Baseev, B. D. Bilek, E. P. Vasiliev, etc.] // Power Engineering: History, Present and Future. - 2012. - Mode of access to the resource: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>.
3. A. Andriyanovits, H. Hoimoja, D. Vinnikov. Comparative Review of Long-Term Energy Storage Technologies for Renewable Energy Systems // Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija, 2012. - No. 2(118). - P. 21–26.
4. Smart Grids and Energy Storage Bottled Sunlight [Electronic resource] // Pictures of the Future. - 2014. - Access to the website: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-bottled-sunlight.html>.
5. Tesla launches the world's largest battery [Electronic resource] // Facts. - 2017. - Access to the website: <http://fakty.ua/251724-tesla-zapustila-samyj-bolshoj-v-mire-akkumulyator>.
6. World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea [Electronic resource] // Power. - 2014. - Access to the website: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/>.
7. SDG&E and Sumitomo unveil largest vanadium redox flow battery in the US [Electronic resource] // Energy Storage. - 2017. - Access to the website: <https://www.energy-storage.news/news/sdge-and-sumitomo-unveil-largest-vanadium-redox-flow-battery-in-the-us>.
8. A Hybrid Approach to Energy Storage [A Hybrid Approach to Energy Storage [Electronic resource] // Electronic Design. - 2017. - Access to the website: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage.> // Electronic Design. - 2017. - Access to the website: <http://www.electronicdesign.com/power/hybrid-approach-energy-storage>.
9. Bath County Pumped Storage Station [Electronic resource] // Retrieved. - 2017. - Access to the website: [www.virginiaplaces.org](http://www.virginiaplaces.org).
10. Creating renewable energy storage out of hot air [Electronic resource] // New atlas. - 2017. - Access to the website: <https://newatlas.com/ricas-2020-aa-compressed-air-energy-storage/48661/>.
11. Fact Sheet: The Department of Energy's Loan Programs [Electronic resource] // U.S. Department of Energy. - 2010. - Access to the website: <https://www.energy.gov/eere/loan-guarantee>.
12. SMES [Electronic resource] // ESAS. - 2011. - Access to the website: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID693.pdf>.
13. Innovation Outlook: Renewable Mini-grids [Electronic resource] // IRENA. - 2016. - Access to the website: <http://www.irena.org/publications/2016/Sep/Innovation-Outlook-Renewable-mini-grids>.
14. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. // ELSEVIER. - 2015. - №73. - C. 103–111.
15. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid / [L. Jianwei, Y. Qingqing, Y. Pengfei та ін.]. // ELSEVIER. - 2016. - №103. - C. 82–87.
16. Wenlong J. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview / J. Wenlong, H. Chean, H. Shung. // IEEE. - 2017. - №11. - C. 461–469.
17. Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles / M. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon. // IEEE. - 2008. - №57. - C. 2721–2735.
18. Jiang Z. A compact digitally controlled fuel cell/battery hybrid power source / Z. Jiang, R. Dougal. // IEEE. - 2006. - №53. - C. 1094–1104.
19. Bocklisch T. Intelligente dezentrale Energie speicher systeme. Umwelt Wirtschafts Forum / Bocklisch. // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. - 2013. - №22. - C. 63–70.
20. Nicolai S. Hierarchische Speichereinsatzoptimierung / S. Nicolai, P. Bretschneider, D. Westermann. // Autom. - 2014. - №62. - C. 364–374
21. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems / [L. Chong, Y. Wong, R. Rajkumar та ін.]. // ELSEVIER. - 2016. - №66. - C. 174–189.
22. Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor Hybrid Energy Storage System for a Rural Household / W. C. Lee, W. W. Yee, K. R. Rajprasad, I. Dino. // ELSEVIER. - 2016. - №107. - C. 232–236.

Надійшла

(received)

05.01.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Івахнов Андрій Віталійович (Ивахнов Андрей Витальевич, Ivakhnov Andrii Vitaliiovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри електричних станцій, тел.: +38 (066) 029-34-22, e-mail: [ivakhnov.av@gmail.com](mailto:ivakhnov.av@gmail.com)

**Федорчук Станіслав Олегович (Федорчук Станислав Олегович, Fedorchuk Stanislav Olegovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри електричних станцій тел.: +38 (095) 290-19-66, e-mail [majonima@gmail.com](mailto:majonima@gmail.com)

**Лазуренко Олександр Павлович (Лазуренко Александр Павлович, Lasurenko Olexandr Pavlovich)** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, тел.: +38 (050) 938-03-48, e-mail: [Lasurenko@kpi.kharkov.ua](mailto:Lasurenko@kpi.kharkov.ua)

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.