

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗВИТКУ ТА УПРАВЛІННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

УДК 621.311.001.57

С.В. ШУЛЬЖЕНКО, канд. техн. наук, О.Л. РАДЧЕНКО, канд. техн. наук,
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172,
м. Київ, 03680, Україна

РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ АКУМУЛЯЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Запропоновано математичну модель визначення собівартості відпуску електричної енергії системами її акумуляування. Наведено розрахунки собівартості відпуску електричної енергії технологіями її акумуляування, зокрема, гідроакумуляуючою, пневмоакумуляуючою станціями, а також літій-іонною акумуляторною батареєю. Результати розрахунків дозволяють зробити висновок, що в майбутньому із зниженням питомих капіталовкладень у встановлену потужність та підвищенням коефіцієнта її використання гібридні системи, фотоелектричні або вітрові станції сумісно з системами акумуляування стають конкурентоздатними за показником собівартості відпущеної електроенергії порівняно із традиційною вугільною тепловою електростанцією. Запропонований метод моделювання гібридних систем дозволяє враховувати особливості їх використання в межах енергосистеми в більш загальних моделях розвитку енергетики.

Ключові слова: математична модель, відновлювані джерела енергії, акумуляування електроенергії, енергосистема.

На саміті Організації Об'єднаних націй щодо Сталого розвитку, що відбувся з 25 до 27 вересня 2015 р. у Нью-Йорку, США, були прийняті Цілі сталого розвитку людства на період до 2030 р. Вперше на ряду з загальними соціальними цілями існування і розвитку людства, такими як дотримання гендерної рівності, грамотності, подолання нестачі їжі і питної води, забезпечення належного рівня охорони здоров'я і інших явно була сформульована ціль забезпечити доступ до енергетичних ресурсів – Ціль №7 “Стале та надійне забезпечення фінансово-доступними, сучасними видами енергії” (Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all). Досягнення цієї цілі до 2030 р. передбачає вирішення таких основних завдань [1]:

© С.В. ШУЛЬЖЕНКО, О.Л. РАДЧЕНКО, 2015

7.1 – гарантувати загальну доступність економічно-привабливого, надійного та сучасного енергозабезпечення;

7.2 – суттєво підвищити частку енергії з відновлюваних джерел енергії в загальному енерговиробництві;

7.3 – в два рази підвищити загальносвітові темпи підвищення енергоефективності;

7.a – зміцнити міжнародне співробітництво для полегшення доступу до досліджень, присвячених чистим видам енергії і відповідним технологіям, зокрема, відновлюваних джерел енергії, заходам підвищення енергоефективності, передовим технологіям підвищення екологічності використання викопного палива, стимулювати інвестиції в енергетичну інфраструктуру і екологічно-чисті енергетичні технології;

7.b – розширити інфраструктуру для сталого забезпечення сучасними видами енергії всіх країн, що розвиваються, зокрема, найменш

розвинених країн, малих острівних держав, країн, що не мають виходу до моря, відповідно до розроблених програм їх підтримки.

Отже, на найвищому міжнародному рівні визначені загальносвітові пріоритети розвитку енергетики, суттю яких є пріоритетний розвиток лише чистих видів енергії, підвищення ефективності використання енергії, розвиток інфраструктури для забезпечення загального доступу до якісної енергії, зокрема, електроенергії, що генерується відновлюваними джерелами. Серед чистих видів енергії чітко визначені лише відновлювані джерела енергії (ВДЕ) – сонячна, вітрова, біомаса, а, наприклад, атомна енергетика, як одна з чистих технологій, явно взагалі не згадується. Подальше використання викопного палива відповідно до Цілі № 7 є припустимим, але необхідно реалізовувати заходи, які гарантують його екологічно-чисте використання в процесі перетворення в теплову або електричну енергію.

Сучасний стан розвитку енергетичних технологій характеризується тим, що гарантувати надійне забезпечення споживачів якісними видами енергії, зокрема, електроенергією, з використанням лише відновлюваних джерел неможливо з технічних причин, тому з дуже високою ймовірністю слід очікувати, що вирішення перелічених завдань для досягнення Цілі № 7 буде відбуватись в межах енергетичних систем із використанням не лише відновлюваної енергетики, а і технологій традиційної енергетики. Враховуючи принципову неможливість гарантувати стабільні прогнозовані рівні генерації електроенергії з відновлюваних джерел енергії, а також практичну вичерпаність гідроенергетичних ресурсів, використання яких потенційно здатне компенсувати цю нестабільність, не виключено широке залучення технологій акумулювання енергії. Таким чином, неявно досягнення Цілі № 7 вимагає формування нового погляду і розробки нових підходів до розвитку і модифікації існуючих, а також побудови нових енергосистем, що зумовлено потенційною необхідністю більш широкого залучення до енергосистем технологій акумуляції енергії, зокрема, електроенергії.

На сьогодні в світі загальноприйняті методи і математичні моделі прогнозування розвитку систем накопичування електроенергії, крім моделювання потужних гідроакумулюючих станцій, в межах енергетичних систем відсутні,

тому актуальною є задача розробки нових та вдосконалення існуючих інструментів моделювання, здатних врахувати ефект від їх впровадження. Оскільки Ціллю № 7 передбачено забезпечити доступ до фінансово-доступних сучасних джерел енергії, зокрема, електроенергії, тому важливим є визначення впливу від впровадження систем акумулювання на собівартість електроенергії, що має постачатись споживачам, що й запропоновано в статті.

Загальноприйнятий в світі метод визначення собівартості виробництва електроенергії базується на розрахунку дисконтованого значення витрат, з використанням якого і визначається собівартість, що приведена до певного періоду моделювання певної технології, наприклад, до першого року комерційної експлуатації [2 – 4]. Аналогічний підхід пропонується застосувати і для систем акумулювання електроенергії. В цьому випадку витрати враховуються так само, як і для систем генерації електроенергії протягом її життєвого циклу:

$$C^{LCC} = \sum_{\tau=1}^n \frac{C_{\tau}^{K\setminus C}}{(1+r)^{n+1-\tau}} + \sum_{\tau=n+1}^{T+n} \frac{C_{\tau}^{M\setminus I} + C_{\tau}^I + C_{\tau}^V(f)}{(1+r)^{\tau-n-1}} \pm \sum_{\tau=T+n+1}^{T+n+m} \frac{C_{\tau}^3}{(1+r)^{\tau-n-1}}, \quad (1)$$

де C^{LCC} – витрати на акумуляцію/генерацію протягом життєвого циклу об'єкта, приведені до першого року життєвого циклу, дол. США; n – тривалість будівництва, кількість років; τ – етап життєвого циклу, кількість років; T – тривалість експлуатації, кількість років; m – тривалість виводу з експлуатації, кількість років; r – дисконт, %/100; $C_{\tau}^V(f)$ – змінні витрати за етап, які залежать від режиму експлуатації (f), дол. США; $C_{\tau}^{K\setminus C}$ – капіталовкладення, дол. США; $C_{\tau}^{M\setminus I}$ – умовно-постійні витрати, дол. США; C_{τ}^I – платежі відсотків за кредитами, дол. США; C_{τ}^3 – витрати (знак "+") або доходи (знак "-") на етапі закриття і утилізації, дол. США

Для визначення собівартості застосовується значення використаної, або відпущеної, електроенергії, що раніше накопичена в системі акумулювання:

$$P^{LCC} = \frac{C^{LCC}}{\sum_{r=n+1}^{T+n} G_I}, \quad (2)$$

де G_I – обсяг енергії в кВт·год, який був накопичений в системі акумулювання.

Найбільш поширеними і відомими на цей час системами для акумулювання енергії, які використовують в межах енергосистем, є гідро-акумулюючі електростанції (ГАЕС). Оскільки потенціал гідроресурсів є обмеженим і в Європі та Північній Америці він практично вичерпаний, то відбуваються пошуки інших технологій накопичення електроенергії, зокрема, акумулюючі електростанції, в яких використовують стиснене повітря (ПАЕС – пневмо-акумулююча електростанція) та електричні акумуляторні батареї (АБ).

Принцип дії ПАЕС подібний до ГАЕС. В ПАЕС використовують енергію стисненого повітря, яке закачують насосами у сховище. Для виробітку електричної енергії стиснене повітря подають на турбіну, поєднану з електричним генератором. В ролі сховища, зазвичай, використовують підземні пустоти, які утворились внаслідок природних геологічних процесів або штучні резервуари. Прикладами останніх розробок можуть слугувати Канівська ГАЕС та ПАЕС “Iowa Stored Energy Plant” (штат Айова, США). Ці акумулюючі електростанції згідно з оприлюдненими проектами мають такі характеристики.

Канівська ГАЕС: встановлена потужність 1000 МВт в режимі генерації, 1038 МВт в насосному режимі, обсяг щодобової генерації – 1000 МВт·год, вартість – 12 млрд грн в цінах 2012 року, термін експлуатації – 50 років [5].

ПАЕС “Iowa Stored Energy Plant”: встановлена потужність – 270 МВт, обсяг щодобової генерації – 200 МВт·год, вартість – 400 млн дол. США, термін експлуатації – 20 років, передбачені фіксовані операційні витрати 16,59 дол. США/кВт на рік, змінні операційні витрати 2,03 дол. США/кВт·год. Грошові показники приведено в цінах 2010 року [6].

Промислове використання електричних акумуляторних батарей є звичайним для цілей резервного живлення, а останнім часом з'являється можливість їх використовувати не лише в аварійних випадках втрати основного джерела електроенергії, а і як постійно-діючий пристрій акумулювання/генерації електро-

енергії. Така можливість з'являється завдяки використанню літій-іонних АБ. Літій-іонні АБ забезпечують на порядок більшу кількість циклів заряд/розряд порівняно із традиційними свинцево-кислотними АБ, забезпечують приблизно в 5 разів більшу питому енергію та в 1,5 раза більший коефіцієнт корисної дії циклу заряд/розряд. Позитивні властивості сучасних літій-іонних АБ були використані компанією Tesla Motors, Inc. (США) при створенні повністю автоматизованого та автономного накопичувача енергії PowerWall, який може бути розташований безпосередньо в житловому або офісному приміщенні [7]. PowerWall має такі характеристики: обсяг щодобової генерації 7 кВт·год, вартість 3000 дол. США, гарантійний термін експлуатації – 10 років. Конструкція PowerWall передбачає можливість об'єднання в разі потреби до 9-ти таких АБ в один блок PowerPack, який може бути використано для роботи в потужній мережі.

Розрахована за проектними даними з використанням залежностей (1) та (2) собівартість зберігання/генерації електроенергії для цих електростанцій становить: 3–6 центів США/кВт·год для Канівської ГАЕС, 2–4 центи США/кВт·год для ПАЕС “Iowa Stored Energy Plant” та 12–20 центів США/кВт·год для АБ PowerWall. Менше значення собівартості відповідає номінальному режиму використання системи акумулювання, більше значення розраховано в припущенні, що коефіцієнт використання встановленої потужності системи акумулювання становить в середньому 60% за рік експлуатації.

За умови спільної роботи об'єктів відновлюваної електроенергетики та накопичувача енергії можливо мінімізувати основний недолік ВДЕ – низьку прогнозованість генерації ними електроенергії. В той час, коли обсяг генерації ВДЕ перевищує її споживання, надлишок енергії може бути акумульований накопичувачем, і навпаки, коли обсяг генерації ВДЕ менше від споживання енергії з накопичувача може бути використана для споживання.

Оскільки згідно з фактичними даними собівартість електроенергії, виробленої ВДЕ, зокрема, фотоелектричними (ФЕС) та вітровими (ВЕС) станціями рік від року знижується, то можна прогнозувати їх широке використання в майбутньому. Згідно з дослідженнями [8] в 2014 році середньозважена собівартість елек-

тричної енергії (ССЕ) для фотоелектричних батарей, які розташовані на даху приватних будинків, становила від 180 до 265 дол. США/МВт·год, а для ФЕС промислового масштабу – від 72 до 86 дол. США/МВт·год, для вітроелектричних установок від 37 до 81 дол. США/МВт·год. В той самий час ССЕ електричної енергії, виробленою на атомних електростанціях (АЕС) без урахування витрат на виведення з експлуатації, становила від 92 до 132 дол. США/МВт·год, для вугільних ТЕС – від 66 до 151 дол. США/МВт·год. Згідно з дослідженнями [9] в 2015 році ССЕ для фотоелектричних батарей, які розташовані на даху приватних будинків, становила від 184 до 300 дол. США/МВт·год, для ФЕС промислового масштабу – від 58 до 70 дол. США/МВт·год, для ВЕС – від 32 до 77 дол. США/МВт·год, тобто зменшилась по відношенню до 2014 року. Собівартість електричної енергії АЕС та вугільних ТЕС в 2015 році порівняно із 2014 роком підвищилась: для АЕС – від 97 до 136 дол. США/МВт·год, для вугільних ТЕС – від 65 до 150 дол. США/МВт·год. Результати досліджень [9] демонструють сталу тенденцію зниження ССЕ для ВЕС та ФЕС протягом останніх п'яти років (рис. 1 – 3). На рисунках відображено мінімальні та максимальні значення ССЕ, пунктиром позначено її середнє значення.

Зниження ССЕ для ВЕС становило 61% протягом 6-ти років, для фотоелектричних батарей, розташованих на даху приватних будинків – 82% протягом 6-ти років.

Хоча до рівня надійності традиційних генеруючих потужностей на викопному паливі технології ВДЕ ще не наблизилась, наприклад, коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) сучасних АЕС становить близько 90%, в той час, як для сучасних ВЕС цей показник дорівнює близько 33%, а для найкращих ФЕС – близько 20%, зменшення собівартості виробництва електроенергії технологіями ВДЕ, та можливість побудови гібридних систем з накопичувачами зумовлює їх потенційну конкурентоздатність по відношенню до технологій традиційної електроенергетики. Тому для порівняння конкурентоздатності необхідно оцінити собівартість виробництва електроенергії гібридними системами.

Вибираючи як базові показники 2015 року (відповідно до [9]) з використанням залежно-

стей (1) та (2) отримуємо значення ССЕ для таких гібридних систем:

- ФЕС спільно з АБ – 46–90 дол. США/МВт·год;
- ФЕС спільно з ГАЕС – 38–76 дол. США/МВт·год;
- ВЕС з АБ – 44–97 дол. США/МВт·год;
- ВЕС з ГАЕС – 35–83 дол. США/МВт·год.

Отримані значення є близькими до ССЕ, визначених в [9] для теплових електростанцій, які використовують вугілля.

В разі збереження тенденцій до зниження собівартостей виробництва електричної енергії ВДЕ можна, за певних припущень, оцінити значення ССЕ в середньостроковій перспективі 5–10 років. Будемо вважати, що порівняно з базовим 2015 роком показники, визначені в [9], зменшаться на 25%. При цьому для тих самих гібридних систем отримуємо такі показники ССЕ:

- ФЕС спільно з АБ – 34–68 дол. США/МВт·год;
- ФЕС спільно з ГАЕС – 29–57 дол. США/МВт·год;
- ВЕС з АБ – 33–73 дол. США/МВт·год;
- ВЕС з ГАЕС – 26–62 дол. США/МВт·год.

Отримані значення ССЕ є оптимістичними і свідчать про перспективність застосування гібридних систем. Виконані оцінки свідчать, що в майбутньому з підвищенням КВВП, а також зниження питомих капіталовкладень у встановлену потужність ВЕС та ФЕС гібридні системи стають конкурентоздатними за показником собівартості відпущеної електроенергії порівняно із традиційною вугільною тепловою електростанцією, хоча за параметрами надійності генерації електроенергії гібридні системи скоріш за все не досягнуть рівня традиційних. Це об'єктивно буде зумовлювати необхідність спільного використання технологій традиційної та відновлюваної електроенергетики в межах однієї енергосистеми.

Запропонований метод визначення собівартості виробництва електроенергії гібридними системами буде сприяти розробці нових та вдосконаленню існуючих інструментів моделювання розвитку енергосистем, зокрема, дозволить враховувати особливості їх використання в межах енергосистеми в більш загальних моделях розвитку енергетики.

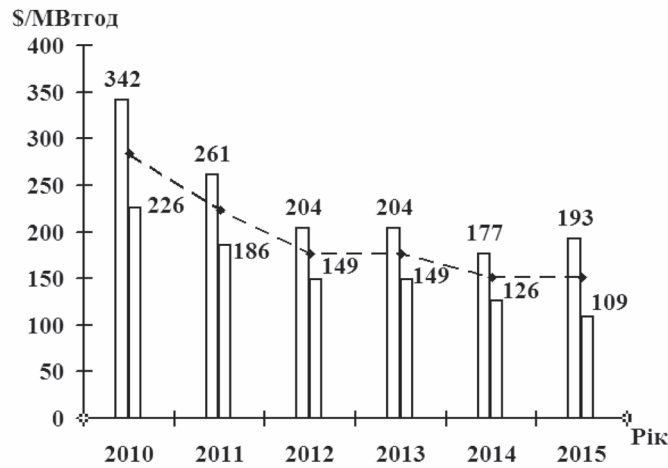


Рис. 1. Зміни ССЕ для фотоелектричних батарей, розташованих на даху підприємств

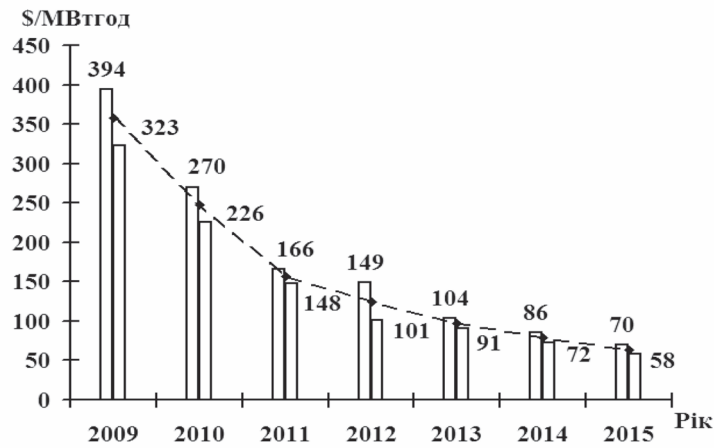


Рис. 2. Зміни ССЕ для фотоелектричних батарей на базі кристалічних структур, розташованих на даху приватних будинків

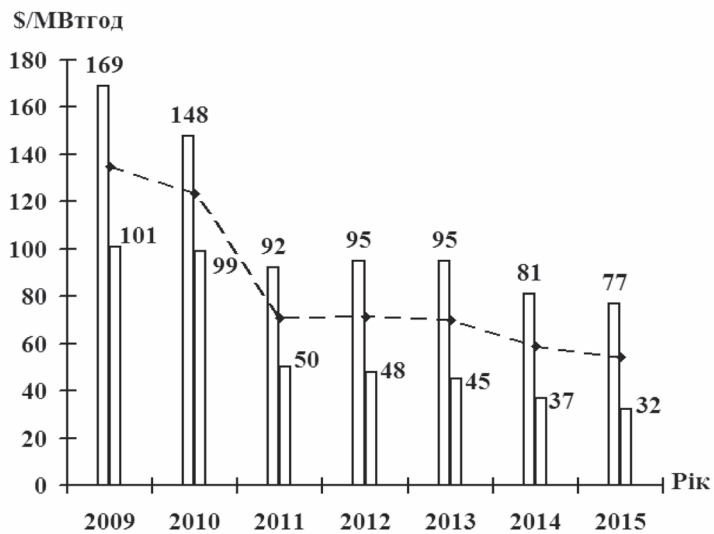


Рис.3. Зміни ССЕ для вітроелектричних установок

ВИСНОВКИ

1. Загальносвітові пріоритети розвитку енергетики, суттю яких є пріоритетний розвиток лише чистих видів енергії, підвищення ефективності використання енергії, розвиток інфраструктури для забезпечення загального доступу до якісної енергії, зокрема, електроенергії, що генерується відновлюваними джерелами, сформульовані на саміті Організації Об'єднаних націй щодо Сталого розвитку, що відбувався з 25 до 27 вересня 2015 року у Нью-Йорку, США, на якому були прийняті Цілі сталого розвитку людства на період до 2030 року. Серед чистих видів енергії чітко визначені лише відновлювані джерела енергії – сонячна, вітрова, біомаса, а, наприклад, атомна енергетика, як одна з чистих технологій, явно взагалі не згадується. Подальше використання викопного палива відповідно до Цілі № 7 є припустимим, але необхідно реалізовувати заходи, які гарантують його екологічно-чисте використання в процесі перетворення в теплову або електричну енергію.

2. Оскільки сучасний стан розвитку енергетичних технологій характеризується тим, що гарантувати надійне забезпечення споживачів якісними видами енергії, зокрема, електроенергією, з використанням лише відновлюваних джерел неможливо з технічних причин, то з дуже високою ймовірністю слід очікувати, що вирішення означеного завдання буде відбуватись в межах енергетичних систем із використанням не лише відновлюваної енергетики, а і технологій традиційної енергетики. Враховуючи принципову неможливість гарантувати стабільні прогнозовані рівні генерації електроенергії з відновлюваних джерел енергії, а також практичну вичерпаність гідроенергетичних ресурсів, використання яких потенційно здатне компенсувати цю нестабільність, не виключене широке залучення технологій акумулювання енергії.

3. У статті запропонована математична модель визначення собівартості відпуску електричної енергії системами її акумулювання, що є актуальним відповідно до Цілі № 7 “Стале та надійне забезпечення фінансово-доступними, сучасними видами енергії”, реалізація якої передбачена Цілями сталого розвитку людства до 2030 року. На прикладі акумуляторної бата-

реї, гідроакумулюючої станції та акумулюючої станції на стиснутому повітрі виконані розрахунки собівартості відпуску електричної енергії системами її акумулювання. Із застосуванням виконаних розрахунків зроблені оцінки собівартості генерації електроенергії гібридними системами, зокрема, “ФЕС + система акумулювання” та “ВЕС + система акумулювання”. Виконані оцінки свідчать про те, що в майбутньому з підвищенням коефіцієнта використання встановленої потужності, а також зниженням питомих капіталовкладень у встановлену потужність вітрових електро- та фотоелектричних станцій гібридні системи стають конкурентоздатними за показником собівартості відпущеної електроенергії порівняно із традиційною вугільною тепловою електростанцією.

4. Запропонований метод моделювання гібридних систем дозволяє враховувати особливості їх використання в межах енергосистеми в більш загальних моделях розвитку енергетики, що буде сприяти розробці нових та вдосконаленню існуючих інструментів моделювання розвитку енергосистем, зокрема, з урахуванням впровадження в їх склад гібридних систем генерації-акумулювання електроенергії.

1. *Goal 7* “Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7>.
2. *Swisher J.* Integrated Resource Planning / Swisher J, Jannuzzi G., Redlinger R. – UNEP & RISO National Laboratory, Denmark, June 1997. – 259 с.
3. *Short W.* A Manual for Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies / Short W., Packey D., Holt T. – National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Managed by Midwest Research Institute, March 1995. – 120 с.
4. *Шульженко С.В.* Особливості розрахунку вартісних показників у задачах прогнозування розвитку електроенергетичних систем за ринкових умов їх функціонування / С.В. Шульженко // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – Вип.1(18). – С. 16–20.
5. *Кулик М.М.* Співставний аналіз техніко-економічних характеристик Канівської ГАЕС та комплексу споживачів-регуляторів

для покриття графіків електричних навантажень // Проблеми загальної енергетики. – 2014. – Вип. 4 (39). – С. 5–10.

6. *Development of a 270 Megawatt Compressed Air Energy Storage Project in Midwest Independent System Operator* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sandia.gov/ess/publications/120388.pdf>.

7. *Tesla Energy* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.teslamotors.com/presskit/teslaenergy>.

8. *LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS — VERSION 8.0* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.lazard.com/media/1777/levelized_cost_of_energy_-_version_80.pdf.

9. *LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS — VERSION 9.0* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lazard.com/media/2390/lazards-levelized-cost-of-energy-analysis-90.pdf>.

Надійшла до редколегії 20.11.2015

OPTIMIZATION OF THE DEVELOPMENT AND MANAGEMENT OF THE FUNCTIONING OF ENERGY SYSTEMS

UDK 621.311.001.57

S.V. SHULZHENKO, Cand. Tech. Sci.,
O.L. RADCHENKO, Cand. Tech. Sci.
Institute of General Energetics, NAS of Ukraine, 172,
Antonovycha Str., Kyiv, 03680, Ukraine

DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY USING STORAGE TECHNOLOGIES

The mathematical model of determining the production cost of electric power supply by storage systems. Calculations of the production cost of supply of electric power accumulation by accumulation technologies are provided including pumped storage, compressed air storage plants and lithium-ion battery. Calculations of the results allow to conclude that in future with decreasing the specific investment in installed capacity and increasing the use factor of a power the hybrid systems, photovoltaic power plants or wind farms along with the storage systems will become competitive in terms of supplied electricity production cost compared with traditional coal-fired power plant. The proposed modeling method of hybrid systems allows to take into account their peculiarities within the grid in more general model of energy development.

Key words: mathematical model, renewable energy resources, power storage, grid.

At the United Nations Sustainable Development Summit held from 25 to 27 September 2015 in New York, USA, the Objectives of sustainable human development for the period till 2030 were adopted. For the first time along with general social goals of development and existence of humanity, such as compliance with the gender equality, literacy, overcoming the shortage of food and drinking water, provision of adequate health care, etc. the goal on ensuring access to energy resources was expressly formulated – Objective No.7 "Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all." For achieving this objective to 2030 the following main objectives [1] were provided:

7.1 – ensure universal access to affordable, reliable and modern energy services;

© S.V. SHULZHENKO, O.L. RADCHENKO, 2015

7.2 – increase substantially the share of renewable energy in the global energy mix;

7.3 – double the global rate of improvement in energy efficiency;

7.a – enhance international cooperation to facilitate access to clean energy research and technology, including renewable energy, energy efficiency and advanced and cleaner fossil-fuel technology, and promote investment in energy infrastructure and clean energy technology;

7.b – expand infrastructure and upgrade technology for supplying modern and sustainable energy services for all in developing countries, in particular least developed countries, small island developing States, and land-locked developing countries, in accordance with their respective programmes of support.

Thus at the top international level the defined worldwide priorities of energy development con-

sisting of priority development of only clean energy, increasing energy efficiency, infrastructure development to ensure universal access to clean energy including electricity generated from renewable sources. Among clean energy sources, only renewable energy sources, such as solar, wind, biomass, and, for example, nuclear power, as one of clean technologies, which is not expressly mentioned, are clearly identified. Further use of fossil fuels under Objective No. 7 is acceptable but it is necessary to implement measures that ensure its ecologically clean use in conversion into thermal or electrical energy.

The current state of development of energy technologies is characterized in that it is impossible to ensure reliable supply for consumers with quality types of energy, in particular, electricity, using only renewable energy resources due to technical reasons thus with the very high probability it should be expected that resolving these tasks for implementation of Objective No. 7 will be within the framework of energy systems using not only renewable energy but technologies of traditional energy. Taking into account the impossibility to ensure stable expected levels of power generation from renewable energy sources, as well as practical exhaustion of hydro-power resources, which use can potentially compensate this instability, wide use of storage energy technologies might be applied. Thus, implicitly the achievement of Objective No. 7 requires the formation of new insight and new approaches to development and modification of existing and construction of new energy systems due to potential need for wider involvement in power systems the energy storage technologies, particularly electricity.

Currently in the world the conventional methods and mathematical forecasting models of electric energy storage systems except for modeling powerful pumped storage plants within the power systems are absent thus urgent task is to develop new modeling tools and improve existing ones, which can take into account the effect of their implementation. Since the Objective No. 7 is to provide access to financially affordable modern energy sources, particularly electricity, so it is important to determine the effect of implementation of storage systems on production cost of electricity to be supplied to consumers as suggested in the article.

Common method in the world for determination of electricity production cost is based on calculation of discounted value of the costs, which used

for determination of production cost, and which transformed into certain period of some technology modeling, for example, into the first year of commercial operation [2 – 4]. Similar approach is suggested to apply for the power accumulation. In this case, the costs are taken into account as for power generation systems during its life cycle:

$$C^{LCC} = \sum_{\tau=1}^n \frac{C_{\tau}^{K\setminus C}}{(1+r)^{n+1-\tau}} + \sum_{\tau=n+1}^{T+n} \frac{C_{\tau}^{M\setminus I} + C_{\tau}^I + C_{\tau}^V(f)}{(1+r)^{\tau-n-1}} \pm \sum_{\tau=T+n+1}^{T+n+m} \frac{C_{\tau}^3}{(1+r)^{\tau-n-1}}, \quad (1)$$

where C^{LCC} – costs for storage/generation during facility life cycle transformed into to the first year of life cycle, \$ USA; n – duration of construction, number of years; τ – phase of the life cycle, number of years; T – duration of operation, number of years; m – duration of decommissioning, number of years; r – discount, %/100; $C_{\tau}^V(f)$ – variable costs per phase, depending on usage (f), \$USA; $C_{\tau}^{K\setminus C}$ – investments, \$USA; $C_{\tau}^{M\setminus I}$ – semi-fixed costs, \$USA; C_{τ}^I – interest payments on loans, \$USA; C_{τ}^3 – expenses (sign “+”) or income (sign “–”) at the phase of closure and disposal, \$USA.

To determine the production cost the value of used or supplied power previously accumulated in the storage system is applied:

$$P^{LCC} = \frac{C^{LCC}}{\sum_{\tau=n+1}^{T+n} G_{\tau}}, \quad (2)$$

where G_{τ} the amount of energy in kWh that has been accumulated in the storage system.

At this time the most common and well-known energy storage systems used within the grid are pumped storage plants (PSP). Since the potential of pumped storage plants is limited, and in Europe and North America it is almost exhausted, the search for other technologies, in particular accumulation power plants, are performed, which use compressed air (AAPS – Air Accumulating Power Station) and electric batteries.

The principle of AAPS operation is similar to PSP. AAPS use compressed air energy that is pumped in storage. To generate electricity the compressed air is supplied to a turbine combined with

an electric generator. As storage, typically, artificial reservoirs or underground voids are used that are formed as a result of natural geological processes. Examples of recent developments can be Kaniv PSP and AAPS "Iowa Stored Energy Plant" (Iowa, USA). These accumulating plants according to published projects have the following characteristics.

Kaniv PSP: installed capacity of 1,000 MW in generating mode, 1,038 MW in pumping mode, generates – 1,000 MWh/day, cost – 12 bln UAH in 2012 prices, lifetime – 50 years [5].

AAPS "Iowa Stored Energy Plant": installed capacity – 270 MW, generates – 200 MWh/day, cost – 400 mln USD, lifetime – 20 years, provided fixed operating costs – 16.59 USD/kW per year, variable operating costs – 2.0 USD/kWh per year. Monetary indicators are given in 2010 prices [6].

Industrial use of electric batteries is usual for the purpose of backup supply, and recently it is possible to use them not only in emergency cases, when the main source of electricity is failed, but also as a constant storage/power generation device. Such possibility can be achieved due to lithium-ion batteries. Lithium-ion batteries provide an order of magnitude greater than charge/discharge cycles compared to traditional lead-acid batteries, provide approximately 5 times more specific energy and 1.5 times greater efficiency of charge/discharge cycles. Positive properties of modern lithium-ion batteries were used by Tesla Motors, Inc. (USA) to create a fully automated and autonomous energy storage PowerWall, which can be placed directly in the living room or office [7]. PowerWall has the following characteristics: generation – 7 kWh/day, cost – 3,000 USD, warranty period – 10 years. The PowerWall design provides possible combination, if necessary, up to 9 batteries in one PowerPack block, which can be used in a powerful network.

According to the design data using dependency (1) and (2) the calculated production cost of storage/generation electricity for these plants is: 3 – 6 US cents/kWh for Kaniv PSP, 2 – 4 US cents/kWh for AAPS "Iowa Stored Energy Plant", and 12 – 20 US cents/kWh for PowerWall batteries. A lower cost value corresponds to nominal storage system usage, a higher costs were calculated assuming that use factor of a power of storage system is on average 60% per year of operation.

Given that the collaboration of renewable electricity facilities and energy storage the main disad-

vantage of renewables, low predictability of their power generation, can be minimized. At the time when the amount of renewable energy generation exceeds its consumption, the excess of energy can be accumulated with the storage, and vice versa, when the amount of renewable energy generation is less than consumption the energy of storage can be used for consumption.

Since according to the actual data the cost of electricity generated by renewable energy, particularly photovoltaic (PVP) and wind (WPS) power stations decreased from year to year we can predict their wide use in future. According to research [8] in 2014 the levelized cost of electricity (LCOE) for photovoltaic panels located on the roof of private houses and ranged from 180 to 265 USD/MWh, and for industrial scale PVP – 72 to 86 USD/MWh, for wind farms – 37 to 81 USD/MWh. At the same time LCOE for nuclear power plants (NPPs) excluding the cost of decommissioning, ranged from 92 to 132 USD/MWh, for coal-fired power plants – 66 to 151 USD/MWh. According to research [9] in 2015 LCOE for photovoltaic panels located on the roof of private houses, ranged from 184 to 300 USD/MWh, for industrial scale PVP – 58 to 70 USD/MWh, for wind farms – 32 to 77 USD/MWh, i.e. it was decreased relative to 2014. The production cost of electricity in NPPs and coal-fired power plants in 2015 increased compared to 2014: for NPPs – from 97 to 136 USD/MWh, for coal-fired power plants – 65 to 150 USD/MWh. The study results [9] show a steady LCOE downward trend for WPS and PVP in the past five years (Fig. 1 – 3). The figures shows LCOE minimum and maximum values, dotted line refers to its average value.

Reducing LCOE for WPS was 61% within 6 years, for the photovoltaic panels installed on the roof of private houses – 82% within 6 years.

Although the level of reliability of conventional generating capacity fossil fuel the renewable energy technologies did not achieved, for example as use factor of a power of modern NPPs is about 90%, while for modern wind farms the figure is about 33%, and for the best PVP – about 20% of reduce in cost of electricity production by renewable energy technologies, and the possibility of erecting hybrid systems with storages stipulates their potential competitiveness in relation to conventional power technologies. Therefore, to compare the competitiveness it is necessary to estimate the pro-

duction cost of electricity generation of hybrid systems.

Choosing 2015 as the baseline values (according to [9]), and using dependencies (1) and (2) we can get LCOE value for such hybrid systems:

— PVP in combination with batteries — 46–90 USD/MWh;

— PVP in combination with PSP — 38–76 USD/MWh;

— WPS in combination with batteries — 44–97 USD/MWh;

— WPS in combination with PSP — 35–83 USD/MWh.

The obtained values are close to LCOE defined in [9] for coal-fired power plants.

When keeping production cost downward trend in power generation renewable energy, under certain assumptions, the LCOE value in the medium

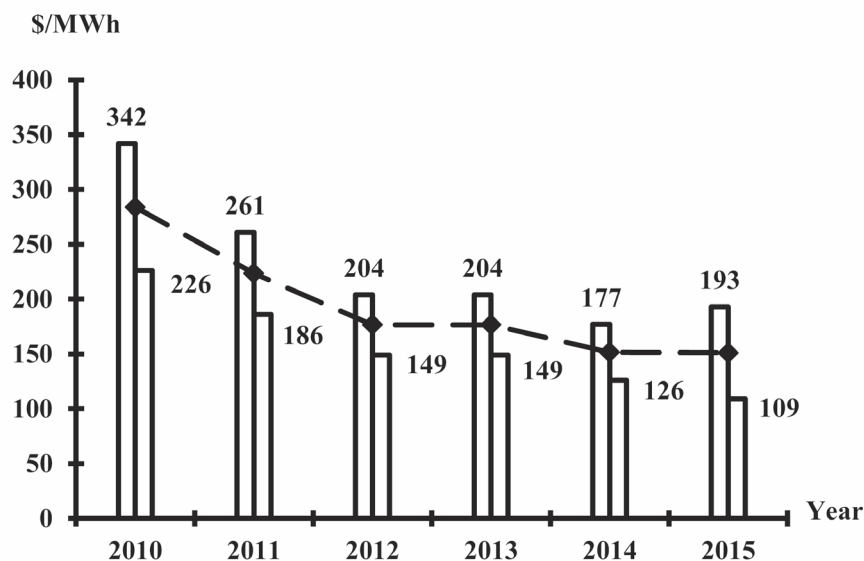


Figure 1. Changes of LCOE for photovoltaic panels located on the roof of manufacture facilities

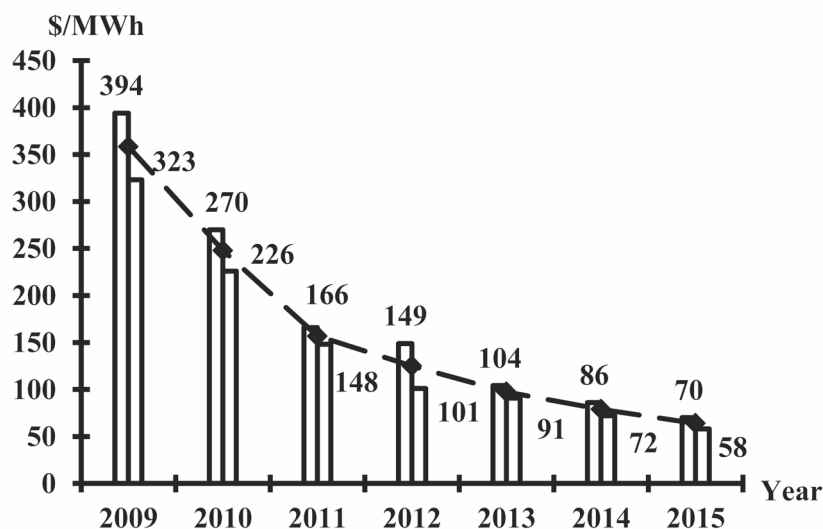


Figure 2. Changes of LCOE for photovoltaic panels based on crystal structures located on the roof of private houses

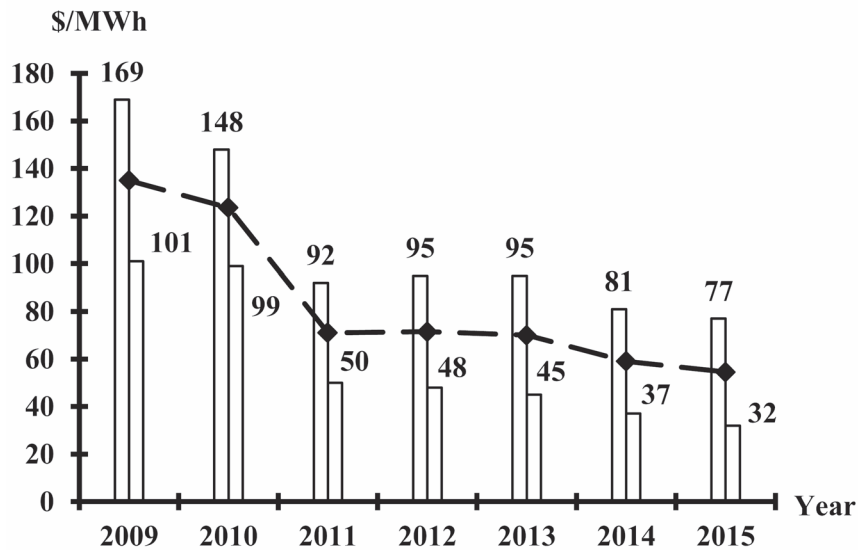


Figure 3. Changes of LCOE for wind farms

term of 5–10 years can be predicted. We assume that compared to the base year 2015 the values defined in [9] will be reduced by 25%. Thus for the same hybrid systems the following LCOE values can be obtained:

- PVP in combination with batteries – 34–68 USD/MWh;
- PVP in combination with PSP – 29–57 USD/MWh;
- WPS in combination with batteries – 33–73 USD/MWh;
- WPS in combination with PSP – 26–62 USD/MWh.

Obtained values of LCOE are optimistic and indicate promising application of hybrid systems. Performed assessments indicate that in future when increasing use factor of a power, and reducing specific investments in installed capacity of WPS and PVP the hybrid systems are competitive in terms of production cost of supplied electricity compared with traditional coal-fired power plants, although according to the parameters of reliability of power generation the hybrid systems likely will not reach the level of traditional ones. This will objectively cause the need for shared used of traditional and renewable power within one network.

The proposed method of determining the production cost of electricity production with hybrid systems will contribute to development of new tools and improvement of existing ones for modeling, in particular, grid, allow to take into account the

peculiarities of their use within the grid in a more general models of energy development.

CONCLUSIONS

1. Global priorities of energy development consisting of priority development of only clean energy, increasing the energy efficiency, development of infrastructure to ensure general access to sufficient energy, including electricity generated by renewable resources, has been formulated at the United Nations Sustainable Development Summit held from 25 to 27 September 2015 in New York, USA, where the Objectives of sustainable human development till 2030 was adopted. Among clean energy sources, only renewable energy sources, such as solar, wind, biomass, and, for example, nuclear power, as one of clean technologies, which is not expressly mentioned, are clearly identified. Further use of fossil fuels under Objective No. 7 is acceptable but it is necessary to implement measures that ensure its ecologically clean use in conversion into thermal or electrical energy.

2. Since current state of development of energy technologies is characterized in that it is impossible to ensure reliable supply for consumers with quality types of energy including electricity using only renewable energy resources due to technical reasons thus with the very high probability it should be expected that resolving this task will be within the framework of energy networks using not only

renewable energy but technology of traditional energy. Taking into account the fundamental impossibility to ensure stable expected levels of power generation from renewable energy sources, as well as practical exhaustion of hydro-power resources, which use can potentially compensate such instability, wide use of storage energy technologies might be applied.

3. In this article the mathematical model of determining the production cost of supply of electric power by the storage systems that is relevant according to Objective No. 7 "Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all", which implementation was provided by sustainable human development objectives till 2030. By the example of battery, pumped storage plant, and compressed air storage station the production cost of supply of electric power by the storage systems was calculated. Using performed calculations the production cost of power generation by the hybrid system, in particular, "PVP system + storage" and "WPS system + storage." were assessed. Performed assessments indicate that in future when increasing use factor of a power, and reducing specific investments in installed capacity of wind farms and photovoltaic power plants the hybrid systems become competitive in terms of production cost of supplied electricity compared with traditional coal-fired power plants.

4. The proposed method of modeling the hybrid systems allows to take into account their peculiarities within the grid in more general models of energy development that will contribute to development of new tools and improvement of existing ones for modeling, in particular, grid, with regard to the integration powers storage/generation into their hybrid structure.

1. Goal 7 "Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all" Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7> [in English].

2. Swisher, J., Jannuzzi, G., & Redlinger, R. (1997). *Integrated Resource Planning*. UNEP & RISO National Laboratory, Denmark, June 1997 [in English].

3. Short, W., Packey, D., & Holt, T. (1995). *A Manual for Economic Evaluation of Energy*

Efficiency and Renewable Energy Technologies. National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Managed by Midwest Research Institute [in English].

4. Shulzhenko, S.V. (2008). Osoblyvosti rozrakhunku vartisnykh pokaznykiv u zadachakh prognozuvannia rozvytku elektroenergetychnykh system za rynkovykh umov ich funktsionuvannia [Estimation of cost indicators for the task of electrical power system development forecast under the market liberalization conditions]. *Problemy zahal'noi enerhetyky - The Problems of General Energy*, 1(18), 16-20 [in Ukrainian].

5. Kulyk, M.M. (2014). Spivstavnyi analiz tekhniko-ekonomichnykh kharakterystyk Kanivskoi HAES ta kompleksu spozhivachiv-regulatoriv dlia pokryttia grafikiv elektrychnykh navantazhen [Comparative Analysis of Technical and Economic Features of Kaniv PSPS and a Suite of Load-Controlled Consumers for Following Electrical Load Curves]. *Problemy zahal'noi enerhetyky - The Problems of General Energy*, 39, 5-10 [in Ukrainian].

6. Development of a 270 Megawatt Compressed Air Energy Storage Project in Midwest Independent System Operator. Retrieved from <http://www.sandia.gov/ess/publications/120388.pdf> [in English].

7. Tesla Energy. Retrieved from <https://www.teslamotors.com/presskit/teslaenergy> [in English].

8. LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS — VERSION 8.0 Retrieved from https://www.lazard.com/media/1777/levelized_cost_of_energy_-_version_80.pdf [in English].

9. LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS — VERSION 9.0 Retrieved from <https://www.lazard.com/media/2390/lazards-levelized-cost-of-energy-analysis-90.pdf> [in English].

Submitted to the Editor 20.11.2015