

УДК 332.873: 658.18

Н.П. ІВАНЕНКО, канд. техн. наук, **В.А. ДЕНИСОВ**, ORCID 0000-0002-3297-1114
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА СОБІВАРТОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ГЕНЕРУЮЧИХ ТА НАКОПИЧУВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Розвиток технологій накопичення електроенергії відкриває нові можливості для забезпечення маневрових режимів функціонування ОЕС України. Накопичувачі можуть використовуватися в комбінації з атомними електростанціями або відновлювальними джерелами електроенергії для вирівнювання навантаження і підвищення якості електроенергії. Все це обумовлює актуальність вирішення задачі розрахунку в режимі реального часу розподілу навантаження генеруючих та накопичуючих потужностей енергосистеми, який забезпечує мінімізацію собівартості генерованої електроенергії в кожен момент часу в режимі стеження за навантаженням. Підґрунтям для вибору найкращого варіанту вирішення завдання може служити матриця собівартості електроенергії, що генерується і постачається різними генеруючими установками, при роботі складових енергосистеми в режимах, відмінних від режиму базового навантаження. Саме цей етап описаний у даній статті. Наявність такої матриці собівартостей дозволяє на другому етапі сформулювати та вирішити завдання оптимального покриття графіка навантаження. На базі одержаного рішення може бути створена база карт генеруючих та накопичуючих потужностей для кожного значення графіка споживання.

Ключові слова: матриця собівартостей, математична модель, енергетика, накопичувач.

Можливість накопичення електроенергії в промислових масштабах вигідна всім учасникам ринку: виробникам, постачальникам, споживачам і регулятору [1]. Аналітичні звіти дослідних організацій GTM Research and ESA's U.S. Energy Storage Monitor говорять про рекордні обсяги інвестицій в проекти по розробці і створенню накопичувачів енергії. У розвинених країнах технології накопичення енергії виходять на стадію комерційного використання.

Використання накопичувачів дозволяє оптимізувати процес виробництва електроенергії за рахунок вирівнювання графіка навантаження на найбільш дороге генеруюче обладнання, а також позбавити дорогу теплову генерацію від ролі регулятора. У свою чергу, це неминуче призведе до скорочення витрат вуглеводневого палива, підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності електростанцій, збільшить надійність енергопостачання і знизить потреби в будівництві нових потужностей.

© Н.П. ІВАНЕНКО, В.А. ДЕНИСОВ, 2018

Накопичувачі дозволяють створити енергетичний резерв без надмірної роботи генеруючих потужностей, оптимізувати режим роботи електростанцій, забезпечити спокійне проходження нічного мінімуму і денного максимуму навантажень.

При використанні накопичувачів електроенергія стає дешевшою, підвищується надійність енергопостачання, можна забезпечити роботу критичного обладнання при перебоях з постачанням і створити резерв на випадок аварій.

Накопичувачі дозволяють знизити пікове навантаження на електричні підстанції і витрати на модернізацію мережевої інфраструктури, підвищують якість і надійність енергопостачання споживачів.

Накопичувачі електроенергії допоможуть вирішити проблему інтеграції ВДЕ в енергосистему країни, оскільки дозволять згладити коливання вироблення ВДЕ і вирівняти графік навантаження.

У зв'язку з розвитком розподіленої генерації виникає проблема продажу регіональних надлишків у мережу, яка також може бути вирішена за допомогою накопичувачів. Нарешті, накопичувачі

можуть використовуватися і для створення індивідуальних резервів.

Все вище викладене приводить до актуальності дослідження економічної доцільності інтегрування сучасних і перспективних накопичувачів енергії великої ємності в системи електрогенерації.

У разі порушення безперервного забезпечення балансу попиту і пропозиції на електроенергію шляхом оперативного і планового покриття графіка навантаження за рахунок відповідного обсягу генерації електроенергії та гарантованої поставки її до вузлів споживання [2], в енергосистемі змінюються частота мережі і рівні напруги. Це, в свою чергу, може привести до масових відключень споживачів або виходу з ладу генеруючого, передавального і розподільного обладнання та електроустановок споживачів.

Все це обумовлює актуальність вирішення задачі розрахунку в режимі реального часу розподілу навантаження генеруючих та накопичувачів потужностей енергосистеми, який забезпечує мінімізацію собівартості генерованої електроенергії в кожен момент часу в режимі стеження за навантаженням.

Підґрунтям для вибору найкращого варіанту вирішення зазначеного завдання може служити матриця собівартості електроенергії, що генерується і постачається різними генеруючими установками, при роботі складових енергосистеми в режимах, відмінних від режиму базового навантаження. Саме цей етап описаний у даній статті.

Собівартість залежить від:

- обсягу капіталовкладень, включаючи вартість будь-яких позик, необхідних для фінансування будівництва, і може виявитися однією з основних складових кінцевої вартості електроенергії;
- вартості експлуатації протягом усього життєвого циклу;
- вартості палива.

Зазвичай вона визначається за однією з версій, яка залежить від технологічних, регіональних і економічних параметрів, досить поширеної [3] формули (1), яка наведена нижче.

Таким чином, оцінка собівартості C_j^f електроенергії енергогенеруючої установки з технологією j для режиму базової генерації, який в подальшому означено аббревіатурою **NOM**, та декількох режимів стеження за навантаженням f розраховувалась за формулою (1):

$$C_j^f = \frac{\sum_{\tau} T_j \{C_{\tau}^{cap} + C_{\tau}^{PS(f)} + C_{\tau}^{3S(f)}\}}{\sum_{\tau} T_j \frac{E_{\tau}^f}{(1+i)^{\tau}}}, \quad (1)$$

де i – номер технології;

f – номер режиму стеження за навантаженням;

E_{τ}^f – обсяг щорічної генерації АЕС в режимі f , \$/МВт-год;

i – дисконт, частка;

C_{τ}^{cap} – капіталовкладення, \$/кВт;

$C_{\tau}^{PS(f)}$, $C_{\tau}^{3S(f)}$ – відповідно постійні та змінні операційні витрати при роботі в режимі f , \$/МВт-год;

T_j – тривалість життєвого циклу технології j , років.

Щорічна генерація E_{τ}^f енергії генеруючого енергоблоку в кожному з $K_{Bj}(f)$ режимів визначалась за формулою:

$$E_{\tau}^f = P_j * K_{Bj}(f) * YH, \quad (2)$$

де P_j – встановлена потужність технології;

$K_{Bj}(f)$ – коефіцієнт використання встановленої потужності технології j , який не перевищує 95 %, приймає значення $0,3 \cdot NOM$; $0,5 \cdot NOM$; $0,7 \cdot NOM$; $NOM = 0,95$;

YH – кількість годин у році – 8 760.

Собівартість використання накопичувача з номінальною потужністю 30 МВт C_{SS}^f була розрахована за формулою (3) [3]:

$$C_{SS}^f = \frac{\sum_{\tau} T_H (C_{\tau}^{caps} + C_{\tau}^{PS(f)} + C_{\tau}^{3S(f)})}{\sum_{\tau} T_H \frac{ES_{\tau}^f}{(1+i)^{\tau}}}, \quad (3)$$

де ES_{τ}^f – щорічний обсяг накопичуваної енергії, МВт-год;

C_{τ}^{caps} – капіталовкладення в накопичувач, \$/кВт;

$C_{\tau}^{PS(f)}$, $C_{\tau}^{3S(f)}$ – відповідно постійні та змінні операційні витрати при роботі накопичувача в режимі f , \$/МВт-год;

T_H – тривалість життєвого циклу накопичувача, років.

Щорічний обсяг енергії, що накопичується ES_{τ}^f в кожному з $K_H(f)$ режимів, визначався по аналогії з формулою (2).

Для тестових розрахунків обрано енергосистему, яка складається з генеруючих енергоблоків і накопичувача електроенергії. Зокрема розраховані собівартості генерації і накопичення електроенергії в різних режимах роботи для наступних елементів енергосистеми.

1. Атомний енергоблок NuScale – в режимах базового навантаження та декількох режимах стеження за навантаженням за технологією Turbine bypass.

2. Атомний енергоблок Holtec SMR-160 – в режимах базового навантаження та декількох режимах стеження за навантаженням за технологією Load Following (**LF**).

3. Установа комбінованого циклу – теплоелектроцентральною (ТЕЦ).

4. Установа вугільного циклу з 30% уловлюванням вуглецю – вугільна ТЕС (ВТЕС).

Таблиця 1 – Вихідна інформація для тестових розрахунків собівартості

Питомі витрати	NuScale	SMR-160	ТЕЦ	ВТЕС	ЛІБ
Капіталовкладення, \$/МВт	5 078 000	4 062 500	5 089 000	2 175 000	2 067 000
Постійні операційні витрати, \$/МВт-год/рік	26	12,9	70 700	33 750	35 600
Змінні операційні витрати, \$/ МВт-год	16	9,3	7,2	7,2	7,1
Інші параметри					
Коефіцієнт використання встановленої потужності в режимі базової генерації	0,95	0,95	0,93	0,93	0,86
Електрична потужність, МВт	50	160	650	340	30
Життєвий цикл, років	60	80	40	40	20
Капіталовкладення, всього, \$	253 900 000	650 000 000	3 307 850 000	739 500 000	62 010 000
Постійні операційні витрати, \$/рік	10 818 600	17 176 608	45 955 000	11 475 000	1 068 000
Змінні операційні витрати, \$/рік	6 657 600	12 383 136	37 968 161	19 943 366	1 609 177

5. Літійо-іонна батарея (ЛІБ) потужністю 30 МВт. В табл. 1 представлена вихідна інформація для тестових розрахунків собівартості використання атомних NuScale [4], SMR-160 [5—7], ВТЕС та ТЕЦ [8] генеруючих установок та накопичувача ЛІБ [8].

Виконано моделювання та порівняльна оцінка собівартостей перелічених генеруючих та накопичувальної технологій та установок в режимі f базового навантаження (базової генерації, для цього режиму коефіцієнт використання встановленої потужності $K_{Bj}(f) = NOM$), та декількох режимах стеження за навантаженням, в яких приймає значення $0,3 \cdot NOM$; $0,5 \cdot NOM$; $0,7 \cdot NOM$ для значень дисконту 3; 3,5; 5; 7; 7,5 та 10% на рік.

Для атомної реакторної установки NuScale виробником надані значення собівартості базової генерації [4] для значень дисконту 3,5 та 7,5% на рік (рядок NOM , Контрольна в табл. 2). Ці значення використані як контрольні для перевірки адекватності моделі. Одержані в результаті модельних розрахунків значення відрізняються від контрольних менше, ніж на 4%. Собівартість використання накопичувача в номінальному режимі також надана виробником [8] і використана як контрольна. Її значення не відрізняється від розрахованої при моделюванні.

Отже маємо підґрунтя для висновку, що результати виконаних розрахунків підтверджують адекватність моделі.

Оцінка собівартості електроенергії атомного енергоблоку SMR-160 була також розрахована за формулою (1). Вихідна інформація для розрахунків є непрямою, одержана з різних джерел [5—7].

Щорічна генерація E_T^f енергії атомним енергоблоком в кожному з $K_{Bj}(f)$ режимів також визна-

чалася за формулою (2). Результати тестових розрахунків також наведені в табл. 2.

Порівняння собівартостей атомних реакторних установок SMR-160 та NuScale для значень дисконту 3,5 та 10% на рік наведені в табл. 3.

Вихідна інформація для розрахунків оцінки собівартості електроенергії традиційних технологій в режимах базового навантаження та декількох режимів стеження за навантаженням одержана з [8].

Собівартість для ТЕЦ в режимах базової генерації та стеження за навантаженням f та собівартість для ВТЕС були також розраховані за формулою (1). Щорічна генерація в кожному з $K_{Bj}(f)$ режимів також визначалася за формулою (2).

Результати тестових розрахунків для всіх генеруючих технологій наведені в табл. 2.

Результати тестових розрахунків собівартості використання накопичувача 30 МВт, що були виконані за формулою (3) [3], наведені в табл. 4.

Порівняння всіх розрахованих собівартостей для значень дисконту 3,5 та 10% на рік наведені на рис. 1 та 2.

Всі одержані результати можуть бути представлені у вигляді матриці собівартостей електроенергії, що поставляється. Приклад такої матриці наведено в табл. 5.

Наявність такої матриці собівартостей дозволяє на другому етапі сформулювати та вирішити завдання оптимального покриття графіка навантаження у вигляді задачі вибору найкращого розподілу навантаження генеруючих та накопичуючих потужностей енергосистеми на підмножині доступних технологічних рішень. На базі одержаного рішення може бути створена база карт генеруючих та накопичуючих потужностей для кожного значення графіка споживання.

Таблиця 2 – Оцінка собівартостей генеруючих технологій

Дисконт, i , %/рік	3	3,5	5	7	7,5	10	Генерація, МВт-год	
$K_{Bj}(f)$	Собівартість, \$/МВт-год						Щорічна	За життєвий цикл
Атомна реакторна установка NuScale								
<i>NOM</i> , Контрольна		73			90			
<i>NOM</i>	63	70	73	83	87	99	416 100	24 966 000
0,7	71	79	84	97	103	119	306 600	18 396 000
0,5	83	94	100	119	128	150	219 000	13 140 000
0,3	110	129	139	171	185	222	131 400	7 884 000
Атомна реакторна установка SMR-160								
<i>NOM</i>	39	44	47	55	58	68	1 331 520	106 521 600
0,7	45	52	56	66	71	84	981 120	78 489 600
0,5	55	64	69	84	91	108	700 800	56 064 000
0,3	76	92	100	125	136	166	420 480	33 638 400
ТЕЦ								
<i>NOM</i>	21	23	25	29	31	36	2 769 912	110 796 480
0,7	25	29	31	36	39	46	2 084 880	83 395 200
0,5	32	37	40	48	52	61	1 489 200	59 568 000
0,3	49	57	62	75	81	97	893 520	35 740 800
ВТЕС								
<i>NOM</i>	38	44	47	57	62	74	5 295 420	211 816 800
0,7	48	56	60	74	80	96	3 985 800	159 432 000
0,5	64	76	82	101	109	131	2 847 000	113 880 000
0,3	102	122	132	163	177	214	1 708 200	68 328 000

Таблиця 3 – Порівняння собівартостей реакторних установок SMR-160 та NuScale для значень дисконту 3,5 та 10% на рік

$K_{Bj}(f)$	Собівартість, \$/МВт-год			
	Дисконт 3,5%/рік		Дисконт 10%/рік	
	SMR-160	NuScale	SMR-160	NuScale
<i>NOM</i>	44	70	68	99
0,7	52	79	84	119
0,5	64	94	108	150
0,3	92	129	166	222

Таблиця 4 – Собівартість використання накопичувача (ЛІБ) 30 МВт

Дисконт, %/рік	3	3,5	5	7	7,5	10	Накопичування, МВт-год	
$K_{Bj}(f)$	Собівартість, \$/МВт-год						Щорічне	за життєвий цикл
<i>NOM</i>	30	30	33	36	37	41	226 008	4 520 160
0,7	35	36	39	43	44	49	183 960	3 679 200
0,5	46	47	51	57	58	66	131 400	2 628 000
0,3	72	74	81	90	92	105	78 840	1 576 800

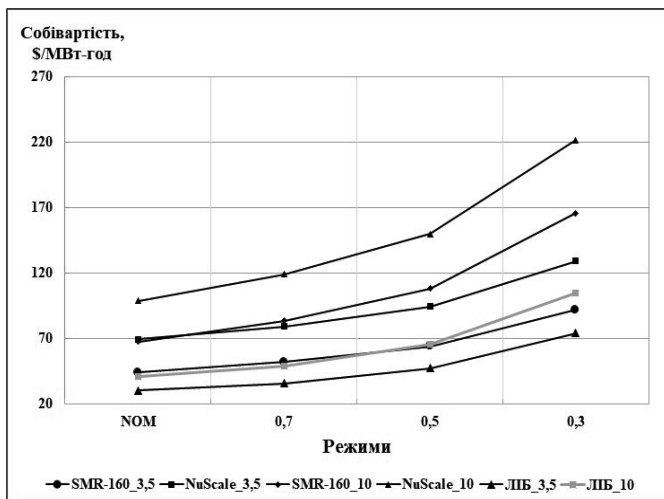


Рисунок 1. Порівняння собівартостей атомних реакторних установок NuScale і SMR-160 та використання накопичувача (ЛІБ) 30 МВт для значень дисконту 3,5 та 10% на рік

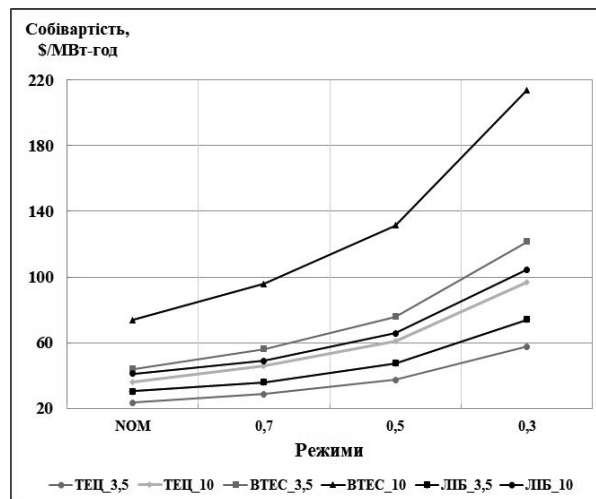


Рисунок 2. Порівняння собівартостей традиційних технологій та накопичувача (ЛІБ) 30 МВт для значень дисконту 3,5 та 10% на рік

Таблиця 5 – Приклад матриці собівартостей різних технологій для значень дисконту 7% на рік

Технології	Встановлена потужність, МВт	$K_{Вj}(NOM)$, в режимі базової генерації	Собівартість, \$/МВт-год			
			NOM	0,7	0,5	0,3
SMR-160, 2 установки по 160 МВт	320	0,95	55	66	84	125
NuScale, 4 установки по 50 МВт	200	0,95	83	97	119	171
ТЕЦ	340	0,93	29	36	48	75
ВТЕС	650	0,93	57	74	101	163
Накопичувач (ЛІБ) 30 МВт	90	0,86	36	43	57	90

- Шапошников Д., Батраков А. Как технологии накопления энергии изменят мир. *Технологии и медиа*. № 008 (2505) (1901). 2017. URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2017/01/19/587e404e9a7947208a047c9d>.
- Маляренко В.А. Неравномерность графика нагрузки энергосистемы и способы ее выравнивания. *Светотехника и электроэнергетика*. 2011. № 4. С. 61—66.
- E-storage: Shifting from cost to value, wind and solar applications – 2016. URL: <https://www.worldenergy.org/publications/2016/e-storage-shifting-from-cost-to-value-2016/>.
- NuScale_Power_SMR – Simple, Safe, Economic.pdf. URL: <https://www.iaea.org/>.
- SMR-160-essential-information-2017-non-proprietary.pdf. URL: <https://smrllc.com>.

- SMR-160 – Frequently Asked Questions. URL: <https://smrllc.com/faqs/#Q5>.
- Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2018. March 2018 URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>.
- Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2018. URL: www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf.
- Lazard’s levelized cost of storage analysis – version 3.0. NOVEMBER 2017. URL: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-storage-2017/>.

Надійшла до редколегії 17.10.2018