



**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-134-151**УДК 621.311:621.311.25**С. В. Галько¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

О. О. Мірошник², д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6144-7573

М. М. Сивенко², аспірант

ORCID: 0000-0003-1311-646X

M. Z. Qawaqzeh³, PhD

ORCID: 0000-0001-7027-5577

Huthaifa Al_Issa³, PhD

ORCID: 0000-0002-0768-8325

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*² *Державний біотехнологічний університет, м. Харків*³ *Balqa Applied University, Al Salt, Jordan*e-mail: galkosv@gmail.com, тел.: +380674217508**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
НАКОПИЧУЮЧИХ ТА ГЕНЕРУЮЧИХ ДЖЕРЕЛ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНИХ ЛОКАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Анотація. У статті розглянуті шляхи забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі відновлюваних джерел енергії і визначені найбільш придатні параметри для зберігання електричної енергії та генеруючого обладнання в автономних локальних електричних системах. Наведено обґрунтування ролі накопичувачів електричної енергії за наявності відновлюваних джерел енергії в автономних локальних електричних системах зі стохастичним режимом роботи. Розглянуто основні положення моделей електричних систем, що використовується. Досліджено залежність параметрів накопичувача енергії залежно від складу генеруючих потужностей. Розглянуто реалізацію задачі визначення параметрів пристроїв накопичення електричної енергії методом цілеспрямованого моделювання. Обґрунтовано результати багатокритеріального вибору потужності та енергоємності накопичувача електричної енергії. Розроблено математичну модель визначення оптимальних параметрів пристроїв накопичення електричної енергії для автономних локальних електричних систем з використанням змішаного цілочисельного програмування з оптимізацією та врахуванням економічних показників. Розглянуто основні положення моделі, що використовується. Досліджено залежності параметрів накопичувачів електричної енергії від складу генерації автономних локальних електричних систем.

Ключові слова: локальні електромережі, відновлювальна енергетика, накопичувачі електроенергії, генерація, автономні джерела.



Постановка проблеми. У структурі автономних локальних електричних систем (АЛЕС) активно використовуються джерела генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [1-3].

При цьому необхідно розробити шляхи забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ. Для рішення цієї проблеми, як правило, розглядають та застосовують наступні методи:

- за рахунок використання накопичувачів зберігання електричної енергії в системі;
- за рахунок використання додаткових традиційних джерел генерації;
- шляхом застосування методів керування попитом, тобто за рахунок спотворення графіків навантажень.

Найбільш цікавими і перспективними для використання у АЛЕС є перший метод у поєднанні з третім, але для цього необхідно розробити алгоритм їх об'єднання.

При складанні моделі оптимізації накопичувачі розглядалися разом з генеруючими джерелами. Це вірно з економічної точки зору. Однак накопичувачі електричної енергії характеризуються відмінними від генераторів технічними параметрами і характеристиками. Тому було приділено більше уваги цим елементам системи та алгоритму забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ.

Визначення оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії для АЛЕС здійснюється, в першу чергу, виходячи з техніко-економічних міркувань. Загальне завдання буде вирішуватися як двоступенева задача: виходячи, в першу чергу, з технічних міркувань, підбирається потужність і ємність накопичувача, а потім, з урахуванням економічної оцінки, підбирається його тип. Така постановка задачі є комплексно складною, незважаючи на деякі спрощення. При виборі потужності і ємності накопичувачів все одно доводиться враховувати економічну складову, а при виборі типу - і технічну.

Аналіз останніх досліджень. У питанні забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ існує необхідність у переході від використання одного конкретного методу до розробки алгоритму що матиме багатокритеріальний підхід.

Основна мета полягає в тому, щоб визначити два параметри: потужність і ємність накопичувачів електричної енергії. Вибір типу накопичувача електричної енергії здійснюється після визначення цих



параметрів, відповідно до сфери їх застосування, економічних, географічних, технічних та інших параметрів [4-6].

Очевидно, що при роботі АЛЕС з використанням генераторів, що працюють на базі ВДЕ, постійно виникають незбалансовані ситуації. Використання запам'ятовуючих пристроїв просто необхідно для зниження ймовірності виникнення подібних ситуацій [7]. При розрахунку позитивних значень дисбалансів приймаються ситуації, в яких генерація перевищує попит, а як негативні – коли попит перевищує генерацію.

В якості керованих джерел генерації використовуються дизель-генератори, а в якості джерел генерації на основі ВДЕ - вітрові електростанції (ВЕС) [8, 9] і сонячні електростанції (СЕС) [10-12].

Для дослідження взаємозв'язку між часткою генерації на основі ВДЕ в АЛЕС і необхідними при цьому параметрами накопичення електричної енергії наведено 11 варіантів [11-13]. Різниця в опціях полягає у різній частці генерації ВДЕ, яка коливалася від 0 до 100% (з кроком 10%). У першому варіанті передбачається, що необхідна енергія повністю виробляється дизельними генераторами, тоді як у другому варіанті електроенергія повністю виробляється вітровими та сонячними електростанціями.

Формування цілей статті. Розробка методики визначення оптимальних параметрів накопичувачів електроенергії і генеруючих систем як одних з важливих засобів забезпечення функціонування АЛЕС.

Основна частина. Основні параметри накопичувачів електричної енергії можна розрахувати за допомогою наступних співвідношень.

Ємність накопичувача електричної енергії:

$$P_{\text{накоп}} = \max|\Delta P|, \quad (1)$$

де $|\Delta P|$ - різниця між загальною потужністю генеруючих джерел в ізольованій системі і потужністю споживачів для цього режиму.

Ємність накопичувачів визначається наступним виразом:

$$E_{\text{накоп}} = \frac{\max(\int [\Delta P] dt)}{\eta_{\text{накоп}}}, \quad (2)$$

де $\eta_{\text{накоп}}$ – ККД накопичувачів електричної енергії.

У дослідженні застосовується метод цілеспрямованої імітації. При цьому використовується пошук різних варіантів, зокрема з різною часткою генерації з ВДЕ. Це дозволяє відповісти на питання про те, що буде відбуватися за різними параметрами в кожному окремому випадку.

Всі варіанти враховували наявність накопичувачів електричної енергії, встановлена потужність яких визначається як різниця між



загальною встановленою потужністю, що генерується при використанні ВДЕ, і мінімальною потужністю навантаження:

$$P_{накоп} = (P_{вз} + P_{сз}) - \min(P_{нав}), \quad (3)$$

де $P_{вз}$ - енергія, що генерується вітровими генераторами;

$P_{сз}$ - електроенергія, що генерується сонячними електростанціями;

$P_{нав}$ - потужність навантаження.

Загальна потужність, що виробляється генераторами на основі ВДЕ, повинна бути завідомо більшою, ніж значення мінімальної потужності накопичувача. Ця обставина дозволяє накопичувати надлишкову енергію (більше тієї, що пішла на покриття поточного навантаження) виробленої на основі ВДЕ, оскільки одним з припущень є те, що електроенергія, вироблена на основі ВДЕ, має пріоритет при заповненні графіка навантаження. Традиційні генератори викопного палива (в даному випадку дизельні) використовуються тільки тоді, коли сумарна потужність ВДЕ і накопичувачів недостатньо для покриття поточного навантаження [7, 13-15].

При визначенні вартості електричної енергії (з урахуванням експлуатаційних витрат, в тому числі паливної складової), що виробляється дизельними генераторами, використовувалася наступна квадратична функція:

$$(P) = aP^2 + bP + c, \quad (4)$$

Максимальні потужності генераторів вибираються за умови, що вони покривають максимальне (пікове) навантаження ізольованої системи, мінімальна потужність визначається технічними можливостями генераторів.

Цільова функція витрат для дизельних генераторів представлена наступним виразом:

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^4 C_i(X_i P_i(t)), \quad (5)$$

де C_i - вартість виробництва електроенергії;

X_i - бінарна змінна;

$P_i(t)$ - потужність i -того дизельного генератора.

Обмеження для даної цільової функції має вигляд [18]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^F P_i(t) = P_{нав}(t) - P_{вз}(t) - P_{сз}(t) \pm P_{нак}(t) \\ X_i P_i^{min} \leq P_i(t) \leq X_i P_i^{max} \end{cases}, \quad (6)$$

де $P_{нав}(t)$ - потужність навантаження в АЛЕС;

$P_{вз}(t)$ - електроенергія, що генерується ВЕС;

$P_{сз}(t)$ - електроенергія, що генерується СЕС;

При розрахунках величина $P_{накоп}$ при зарядці і розрядці накопичувачів розглядається як навантаження або генерація відповідно. Таким чином, це значення в розрахунках приймається як



позитивне в тому випадку, коли накопичувач заряджається, так і негативне в тому випадку, коли він розряджається [11, 16-19].

Основна відмінність розглянутої процедури полягає в тому, що при визначенні оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії склад генераторів вважається встановленим [12, 20]. Розрахунок проводиться на один рік. Загальна сума річних витрат енергосистеми складається з наступних компонентів:

$$C_p = C_2 + C_{ав} + C_{ндв} + C_{внн}, \quad (7)$$

де C_2 - вартість палива;

$C_{ав}$ – амортизаційні відрахування на систему накопичувачів електроенергії;

$C_{ндв}$ – вартість електроенергії, що не відпущена споживачам через недостатню ємність накопичувача;

$C_{внн}$ – витрати на виробництво електроенергії від ВДЕ, неінтегрованою накопичувачем в АЛЕС на протязі одного року.

Тобто можуть виникнути ситуації, коли при повній зарядці накопичувачів подальша інтеграція ними потужності з ВДЕ неможлива (таку потужність будемо називати неінтегрованою в АЛЕС) [21, 22]. В цьому випадку необхідно скоротити виробництво енергії з ВДЕ, а в подальшому збільшити потужність накопичувачів.

У зв'язку з вищесказаним оптимізована функція буде мати наступний вигляд:

$$OF_2 = \min(C_p). \quad (8)$$

Розрахунок проводився для одинадцяти варіантів, виходячи з терміну служби накопичувача – 10 років та коефіцієнта дисконтування 10%. Очевидно, що зростання загального обсягу електроенергії, що генерується з використанням ВДЕ, вимагає збільшення ємності накопичувачів.

Інвестиційні витрати на установку накопичувачів електроенергії стають рентабельними тільки в тому випадку, якщо енергія, вироблена ВДЕ, становить більше 30% річного споживання електроенергії [23-25]. Ця обставина в основному обумовлена величиною невідпуску електроенергії споживачам [17, 26]. На рисунку 1 наведено залежність параметрів накопичувачів від частки генерації від ВДЕ.

Проведено аналіз впливу складу генерації з використанням ВДЕ на ємність накопичувачів [27-29] і досліджено три випадки:

- частка вітрогенерації складала 0%, сонячної генерації - 100%;
- частка вітрогенерації - 100%, сонячної генерації - 0%;
- частка вітрогенерації - 50%, сонячної генерації - 50%.

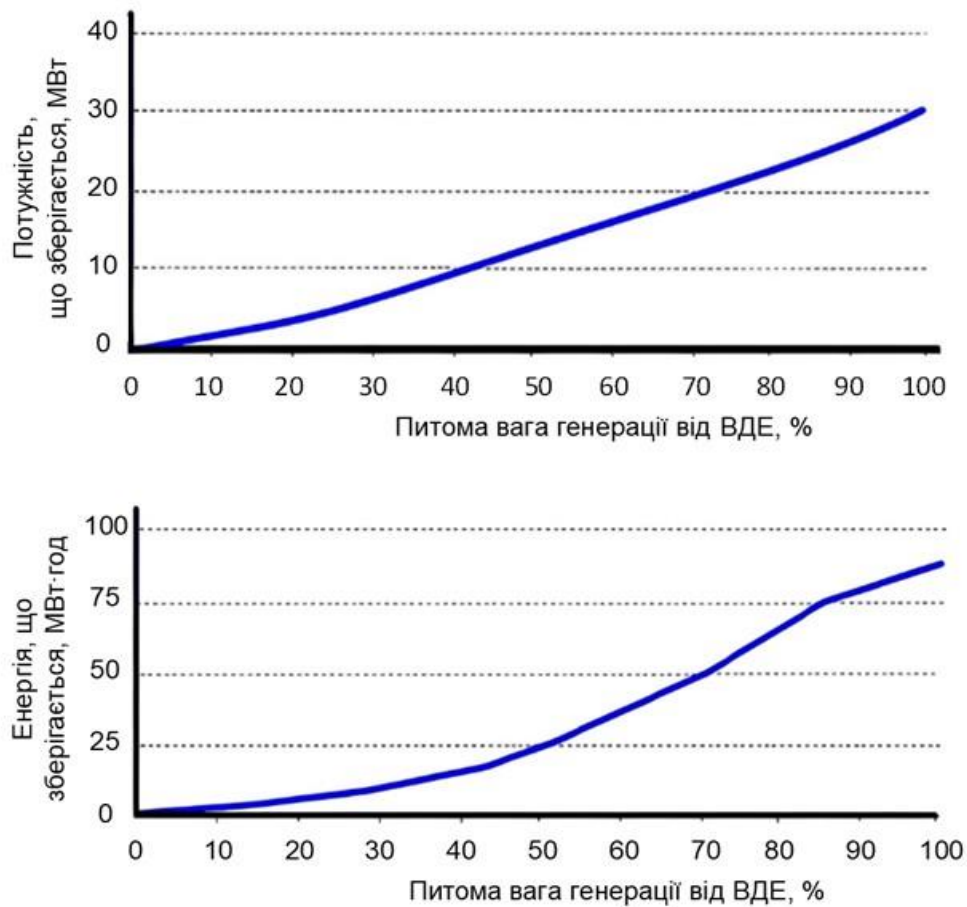


Рис. 1. Залежність параметрів накопичувачів електроенергії для різних відсотків генерації з ВДЕ

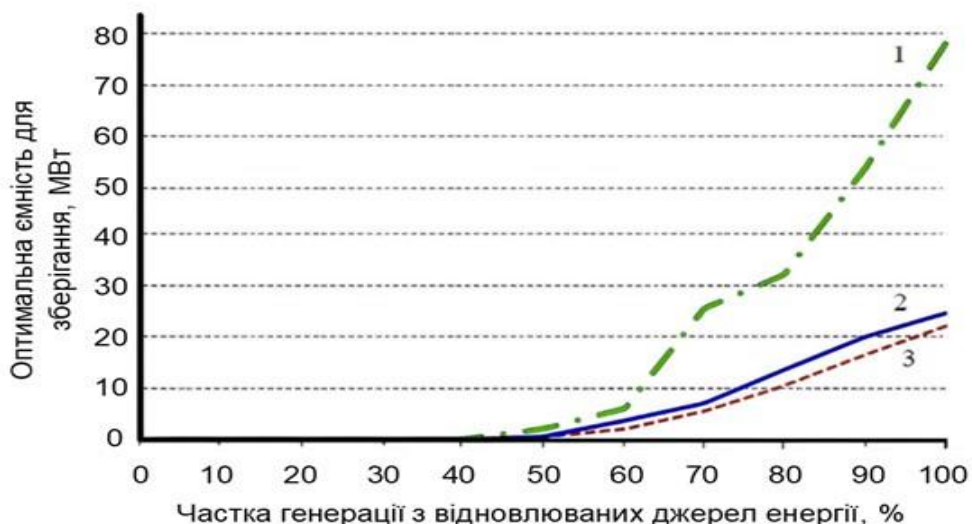


Рис. 2. Аналіз впливу частки ВДЕ на оптимальну ємність накопичувачів електроенергії: 1 – частка в виробленій електроенергії ВЕС - 0% і СЕС - 100%; 2 – частка в виробленій електроенергії ВЕС - 100% і СЕС – 0%; 3 – частка в виробленій електроенергії ВЕС - 50% і СЕС - 50%



Наприклад, якщо енергосистема повністю забезпечується енергією за допомогою енергії сонячних електростанцій, то потрібні накопичувальні агрегати ємністю 80 МВт·год. Використання тільки вітрової генерації в АЛЕС знижує значення оптимальної потужності акумулювання майже до 25 МВт·год, як показано на рисунку 2 [3, 30-33]. Ця обставина зумовлена більшою тривалістю роботи вітрових електростанцій на добу (рік).

Для того щоб визначити параметри накопичувачів електроенергії, необхідних для роботи АЛЕС, знову розглянемо систему, що складається з чотирьох дизель-генераторів, вітрових і сонячних електростанцій [15, 34-37].

Цільова функція для цього випадку представлена наступним виразом:

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^F C_i(P_i(t)), \quad (9)$$

де C_i - витрати на виробництво електроенергії дизельними генераторами;

F – кількість дизельних генераторів (в даному випадку – чотири);

$P_i(t)$ - потужність і-того дизельного генератора.

У реальних умовах збільшення і зменшення потужності генератора відбувається не миттєво, тому розрахунки враховують швидкість набору і зниження потужності дизельних генераторів.

В таблиці 1 наведені технічні параметри генераторів, що використовуються в даній АЛЕС.

Таблиця 1

Технічні параметри генераторів і діапазон виробленої енергії

Генератор	Потужність, МВт		Потужність, МВт/год	Потужність, МВт/год
	P_{\max}	P_{\min}		
Дизельний генератор №1	6	2	4	5
Дизельний генератор №2	6	2	3	5
Дизельний генератор №3	6	2	7	8
Дизельний генератор №4	6	2	4	4
Вітрові турбіни	15	0	-	-
Сонячні електростанції	6	0	-	-

Ці розрахунки дозволяють зробити оцінку роботи системи, а також дозволили визначити оптимальні параметри накопичувачів електричної енергії, необхідні для інтеграції всієї виробленої енергії за допомогою ВДЕ [38, 39]. Для цього залишкове навантаження (потужність), покрите традиційними дизельними генераторами і накопичувачем, оцінюється як:

$$P_i(t) = P_{\text{нав}}(t) - P_{\text{вз}}(t) - P_{\text{сз}}(t), \quad (10)$$

При оцінці залишкового навантаження передбачається, що дизельні електростанції не можна відключати (табл. 1). В результаті, при такому варіанті (без системи накопичення енергії) залишкове навантаження, що аналізується АЛЕС, може бути як позитивним, так і негативним. Позитивні і негативні значення означають, відповідно, наявність надлишку або дефіциту АЛЕС. Профіцит в основному пов'язаний з виробленням електричної енергії вітровими і сонячними електростанціями [5, 40-42].

На основі аналізу залишкового навантаження потужність накопичувача електричної енергії можна оцінити за виразом:

$$P_{\text{накоп}} = \begin{cases} \min P_i(t) \\ \max P_i(t) \end{cases}, \quad (12)$$

Для оцінки ємності накопичувачів електричної енергії можна використовувати два різних підходи. Акумулятор може бути сконструйований як для максимальної інтеграції електроенергії, виробленої з ВДЕ (рис. 3), так і для мінімізації кількості невідпущеної електричної енергії споживачам [21, 43-45]. У першому випадку слід враховувати максимальне значення залишкового навантаження (12), а в другому - його мінімальне значення (12).

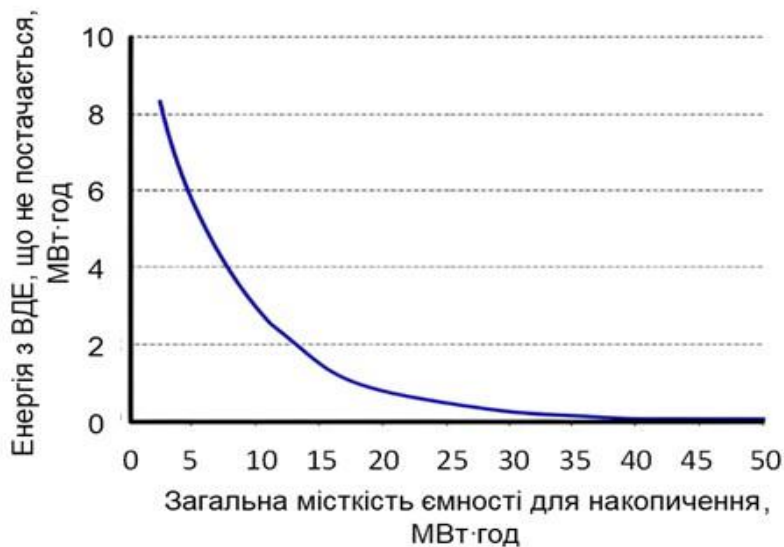


Рис. 3. Залежність величини неінтегрованої енергії, що генерується ВДЕ, від загальної ємності накопичувачів електричної енергії

З метою зниження інвестиційних витрат модель оптимізації аналізується з економічної точки зору.

Для визначення оптимальної ємності накопичувача використовувалися рівновагові критерії:

- 1) вартість палива C_n ;
- 2) амортизаційні відрахування для системи зберігання енергії $C_{ав}$;



3) вартість виробництва електроенергії з ВДЕ, яка не інтегрована в АЛЕС протягом одного року $C_{ндв}$;

4) вартість електроенергії, недовідпущеної споживачам протягом одного року (збиток) $C_{внн}$.

Таким чином, цільова функція вартості буде наступною:

$$OF_2 = \min(C_n + C_{ав} + C_{ндв} + C_{внн}). \quad (13)$$

Результати досліджень. Основні параметри варіантів, що використовуються при пошуку оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії, запропоновані в:

1. Підбір складу генеруючих джерел:

– традиційні генератори, що покривають лише частину потреби в електричній енергії;

– потужності ВЕС і СЕС підбираються таким чином, щоб їх загальна величина генерації була значно більшою мінімального навантаження.

2. За допомогою цілочисельного лінійного програмування було знайдено оптимальний графік роботи генераторів на один тиждень і визначено оптимальні параметри накопичувачів електроенергії.

3. Параметри накопичувачів енергії змінюються ітеративно:

– потужність накопичувачів змінюватись від 1 до 7 МВт з кроком 1 МВт;

– тривалість роботи накопичувачів змінювалася від 4 до 6,5 годин з кроком 0,5 години.

4. На кожному етапі розраховується недовідпуск електроенергії в АЛЕС і енергії, яка могла б генеруватися ВДЕ, але не генерувалася через те, що накопичувачі в той час були повністю заряджені. Мета оптимізації полягає в тому, щоб звести до мінімуму обидва ці значення.

Розрахунок проводився за час роботи 4-х накопичувачів; 4,5; 5; 5,5; 6 і 6,5 годин (всього 7 значень). Таким чином, загальна кількість кроків становила 42. Параметри для кожного кроку розрахунку представлені в таблиці 2.

Для демонстрації результатів розрахунків вираховані дані для всіх 42 кроків зведених в один рисунок 4, в якому графічно представлені результати розрахунків за наступним варіантом:

– максимальне навантаження (заокруглене) – 32 МВт,

– вітрові електростанції – 15 МВт,

– сонячних електростанцій – 6 МВт,

– дизельні генератори – 4 по 6 МВт.

Було виявлено взаємозв'язок між потужністю генерації, що генерується установками ВДЕ, і оптимальною ємністю накопичувачів електричної енергії.



При розрахунках тривалість роботи накопичувачів збільшувалася з 4 до 6,5 годин. Збільшення тривалості роботи сприяло зменшенню величини неінтегрованої електроенергії з джерел ВДЕ, а також зменшенню недовідпуску електричної енергії [14, 32].

Таблиця 2

Базові дані для кожного кроку обчислення

Крок обчислення	Тривалість роботи накопичувачів, год	Потужність накопичувачів, МВт	Крок обчислення	Тривалість роботи накопичувачів, год	Потужність накопичувачів, МВт
1	4	1	22	5,5	1
2	4	2	23	5,5	2
3	4	3	24	5,5	3
4	4	4	25	5,5	4
5	4	5	26	5,5	5
6	4	6	27	5,5	6
7	4	7	28	5,5	7
8	4,5	1	29	6	1
9	4,5	2	30	6	2
10	4,5	3	31	6	3
11	4,5	4	32	6	4
12	4,5	5	33	6	5
13	4,5	6	34	6	6
14	4,5	7	35	6	7
15	5	1	36	6,5	1
16	5	2	37	6,5	2
17	5	3	38	6,5	3
18	5	4	39	6,5	4
19	5	5	40	6,5	5
20	5	6	41	6,5	6
21	5	7	42	6,5	7

Результати показують, що повна інтеграція ВДЕ досягається з використанням накопичувачів електричної енергії загальною потужністю 7 МВт при робочій тривалості 5,5 годин. Проте при таких параметрах накопичувачів все ж таки існує недовідпуск електроенергії.

Отримані результати свідчать, що повна інтеграція ВДЕ досягається за допомогою установок накопичення електричної енергії загальною потужністю 7 МВт при тривалості роботи 5,5 годин. Однак при таких параметрах накопичення все одно спостерігається дефіцит електроенергії.

Для того, щоб мінімізувати величину недовідпуску електроенергії, можуть бути реалізовані різні варіанти. Зокрема: зміна (в сторону збільшення) параметрів накопичувачів електроенергії, збільшення частки традиційної генерації, а також збільшення частки генерації на основі ВДЕ. Очевидно, що необхідний ітераційний процес для пошуку компромісного вирішення. В даному випадку був прийнятий спрощений варіант, і для цих цілей пропонується знайти нову потужність генераторів на основі ВДЕ, що обов'язково спричинить за собою зміну параметрів накопичувачів [16, 39].

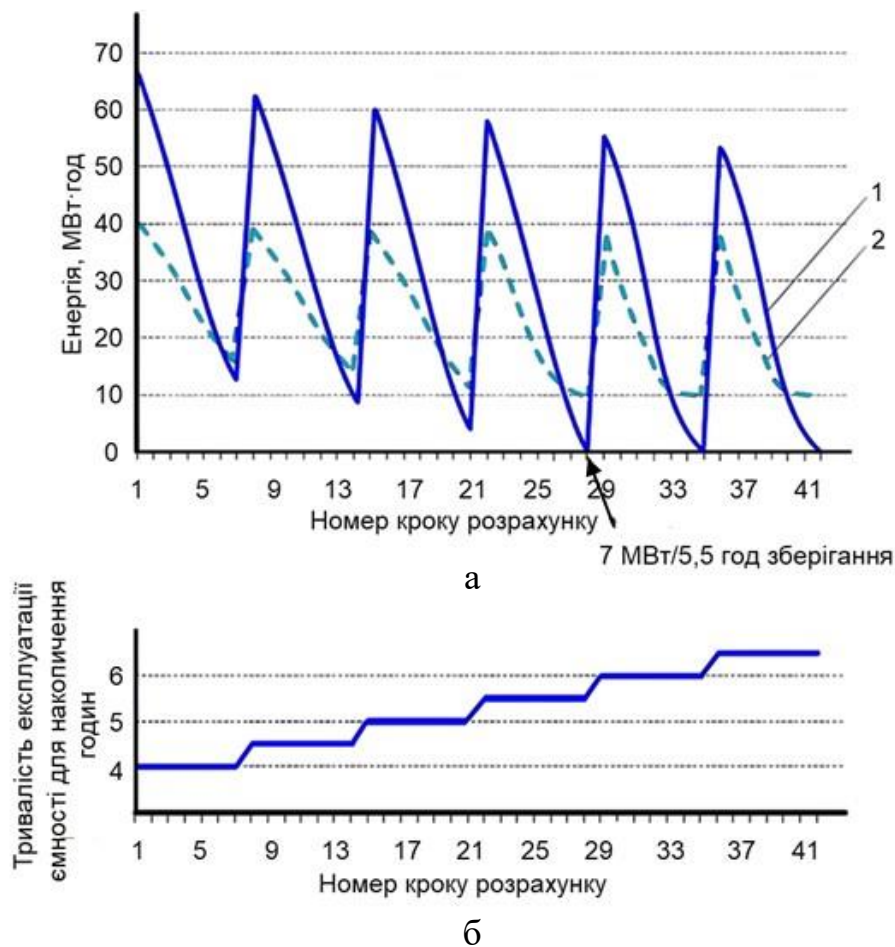


Рис. 4. Енергія (а) і тривалість роботи накопичувачів (б):
1 – електроенергія з ВДЕ, не інтегрована накопичувачами,
2 – недовідпуск електроенергії

Цей процес проілюстровано графічно на рисунку 5. Ми ітеративно змінюємо потужність генераторів на основі ВДЕ. При досягненні їх потужності 26 МВт навантаження в АЛЕС повністю покривається (рис. 5), тобто сама система стає бездефіцитною. Використовуючи програму розрахунку для цих умов, були визначені оптимальні параметри накопичувачів електричної енергії, зокрема: потужність 8 МВт і час роботи 13 годин. Тобто технічні параметри

накопичувача суттєво зростають, відповідно, збільшується вартість накопичувача.

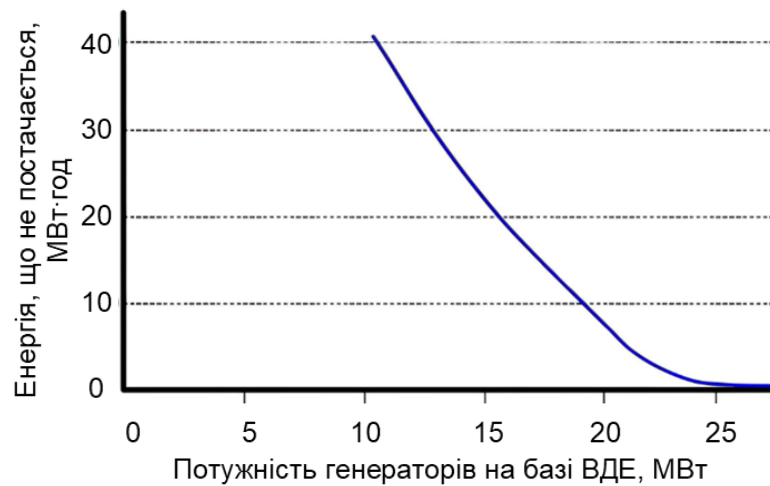


Рис. 5. Залежність недовідпуску електроенергії від потужності генераторів на базі ВДЕ

Слід зазначити, що в даному дослідженні зроблено допущення, що при розрахунках не враховуються втрати, які, очевидно, присутні в реальній системі.

При розрахунку в подальшому ми приймаємо систему накопичувачів з повною інтеграцією електроенергії, що генерується ВДЕ і з розрахованим можливим недовідпуском електроенергії.

З прикладу видно, що повна автономність (при повній інтеграції виробленої енергії ВДЕ і відсутності недовідпуску електроенергії) коштує дорого, оскільки вимагає досить великих накопичувачів, які використовуються лише частково.

Висновки.

1. Описана методика визначення оптимальних параметрів накопичувачів електроенергії як одного з важливих засобів забезпечення функціонування АЛЕС разом з вибором генеруючих блоків.

2. В умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ необхідно розробити шляхи надійного забезпечення електропостачання споживачів АЛЕС.

3. У зв'язку з цим пропонується використовувати накопичувачі електричної енергії. Для забезпечення надійного функціонування АЛЕС необхідно підбирати оптимальні параметри накопичувачів, як з технічної, так із економічної точок зору.

*Список використаних джерел*

1. Галько С. В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали Міжнар. наук. конф.*, 10 квіт. 2020 р. Луцьк: МЦНД. 2020. Т. 1. С. 83-90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.
2. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2019. Вип. 19, т. 3. С. 130-141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.
3. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. Vol. 2. P. 39-44. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>.
4. Петрук В. Г., Коцюбинська С. С., Мацюк Д. В. Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики та рекомендації по екологізації паливно-енергетичного комплексу України. *Зб. матеріалів II-го Всеукр. з'їзду екологів з міжнар. участю*. Вінниця. 2016.
5. Кузнецов М. П., Мельник О. А. Оптимальна побудова електроенергетичного комплексу на основі відновлюваних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 28-32.
6. Кулік М. М., Горбулін В. П., Кириленко О. В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). Київ, 2017. 78 с.
7. Кузнецов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А. Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ. *Відновлювана енергетика*. 2018. Вип. 13. С. 6-15.
8. Szafraniec A., Halko S., Miroshnik O., Figura R., Zharkov A., Vershkov O. Magnetic field parameters mathematical modelling of wind-electric heater. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97(8). P. 36-41. <https://doi.org/10.15199/48.2021.08.07>.
9. Qawaqzeh M., Szafraniec A., Halko S., Miroshnyk O., Zharkov A. Modelling of a household electricity supply system based on a wind power plant. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. № 96. P. 36-40. <https://doi.org/10.15199/48.2020.11.08>.



10. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. Vol. 35. P. 2587-2595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.005>.
11. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. *Energies*. 2023. Vol. 16(6). No 2638. <https://doi.org/10.3390/en16062638>.
12. Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Influence of Temperature on Energy Performance Indicators of Hybrid Solar Panels Using Cylindrical Cogeneration Photovoltaic Modules. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPIWeek 2021 - Conference Proceedings. Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 132- 136. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569975>.
13. Haffner S., Pereira L.F.A., Pereira L.A., Barreto L.S. Multistage Model for Distribution Expansion Planning With Distributed Generation— Part I: Problem Formulation. In *IEEE Transactions on Power Delivery*, April 2008. Vol. 23(2). P. 915-923. No <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917916>.
14. Qawaqzeh M., Al_Issa H. A., Buinyi R., Bezruchko V., Dikhtyaruk I., Miroshnyk O., Nitsenko V. The assess reduction of the expected energy not-supplied to consumers in medium voltage distribution systems after installing a sectionalizer in optimal place. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2023. Vol. 34. No 101035. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101035>.
15. Mahto T., Mukherjee V., Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51. P. 1564-1577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>.
16. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O., Romero-Cadaval E. Vinnikov D. Maximum boost control for interleaved single-phase Quasi-Z-Source inverter. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017. P. 7698-7703. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217349>.
17. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 3/4(75). P. 26-31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42484>.
18. Kamel R.M. Standalone micro grid power quality improvement using inertia and power reserves of the wind generation systems. *Renewable Energy*. 2016. Vol. 97. P. 572-584. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.004>.



19. Molderink A., Bakker V., Bosman M.G.C., Hurink J.L., Smit G.J.M. Management and Control of Domestic Smart Grid Technology. *In IEEE Transactions on Smart Grid*, Sept. 2010. Vol. 1(2). P. 109-119. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2055904>.
20. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Kvitka S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Energy saving in electromechanical grain cleaning systems. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12(3). No 1418. <https://doi.org/10.3390/app12031418>.
21. Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D. A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research. *Electric Power Systems Research*. 2015. Vol. 121. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.12.010>.
22. McDonald J. Adaptive intelligent power systems: Active distribution networks. *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, is. 12. P. 4346-4351. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.038>.
23. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Improving energy efficiency of grain cleaning technology. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12(10). P. 5190. <https://doi.org/10.3390/app12105190>.
24. Mondal A.H., Denich M. Hybrid systems for decentralized power. *Energy for Sustainable Development*. 2010. Vol. 14, is. 1. P. 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.01.001>.
25. Luo Y., Shi L., Tu G. Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 80. P. 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.061>.
26. Tan Y., Meegahapola L., Muttaqi K. M. A review of technical challenges in planning and operation of remote area power supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 8. P. 876-889. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.034>.
27. Rubanenko O., Yanovych V., Miroshnyk O., Danylchenko D. Hydroelectric Power Generation for Compensation Instability of Non-guaranteed Power Plants. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey. 2020. P. 52-56. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263151>.
28. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. P. 415-423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43.
29. Галько С. В., Жарков В. Я., Жарков А. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія. Мелітополь: Люкс, 2019. 215 с.



30. Shevchenko S., Olubakinde E., Danylchenko D., Nazarenko I., Savchenko N., Shylkova L. Devising a method for reducing active power corona losses based on changing the structural parameters of a power transmission line. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 1/8(115). P. 18-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253384>.

31. Iegorov O., Iegorova O., Miroshnyk O., Savchenko O. Improving the accuracy of determining the parameters of induction motors in transient starting modes. *Energetika*. 2020. Vol 66(1). P. 15-23. <https://doi.org/10.6001/energetika.v66.i1.4295>.

32. Voytenko V., Stepenko S., Velihorskyi O., Chakirov R., Roberts D., Vagapov Y. Digital control of a zero-current switching quasi-resonant boost converter. *2015 Internet Technologies and Applications (ITA)*. 2015. P. 365-369. <https://doi.org/10.1109/ITechA.2015.7317428>.

33. Veligorskyi O., Kosenko R., Stepenko S. High-efficiency solar tracker development and effectiveness estimation. *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, 2014. P. 153-158. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874169>.

34. Qawaqzeh M., Zaitsev R., Miroshnyk O., Kirichenko M., Danylchenko D., Zaitseva L. High-voltage DC converter for solar power station. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2020. Vol. 11(4). P. 2135-2144. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i4.pp2135-2144>.

35. Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Ivanets S. FPGA control of the neutral point clamped quasi-Z-source inverter. *2012 13th Biennial Baltic Electronics Conference*. Tallinn, Estonia. 2012. P. 263-266. <https://doi.org/10.1109/BEC.2012.6376867>.

36. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskyi O., Buinyi R., Halko S. Improving the efficiency of solar power plants based on forecasting the intensity of solar radiation using artificial neural networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 – Conference Proceedings*. 2021. P. 137-140. <https://10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>.

37. Belik M. Emergency island grids with small hydro power stations. *In Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Elektroenergetika 2019*. 2019. P. 116-121.

38. Zaitsev R., Khrypunov G., Veselova N., Kirichenko M., Kharchenko M., Zaitseva L. The cadmium telluride thin films for flexible solar cell received by magnetron dispersion method. *Journal of nano- and electronic physics*. 2017. Vol. 9(3). P. 03015-1–03015-7. https://jnep.sumdu.edu.ua/en/full_article/2216.

39. Tymchuk S., Miroshnyk O. Calculation of energy losses in relation to its quality in fuzzy form in rural distribution networks. *Eastern-*



European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 1(8). P. 4-10.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36003>.

40. Roncero-Clemente C., Husev O., Miñambres-Marcos V., Stepenko S., Romero-Cadaval E, Vinnikov D. Comparison of three MPPT algorithms for three-level neutral-point-clamped qz-source inverter. *2013 International Conference-Workshop Compatibility And Power Electronics*. Ljubljana, Slovenia. 2013. P. 80-85.
<https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601133>.

41. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O. The perfection of motivational model for improvement of power supply quality with using the one-way analysis of variance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. T. 6. P. 163-168.
<https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>.

42. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O., Miñambres-Marcos V., Romero-Cadaval E., Vinnikov D. Three-Level Neutral-Point-Clamped Quasi-Z-Source Inverter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems. *Technological Innovation for the Internet of Things. DoCEIS 2013. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. Vol 394.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-37291-9_36.

43. Shevchenko S., Danylchenko D., Kuznetsov D., Petrov S. Use of capacitor batteries to improve the quality of electrical energy. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedings*. 666-669. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570023>.

44. Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S. Experimental Research of the Electrical Strength of the Insulated System “Protected Wire-Line Insulator”. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey. 2020. P. 83-87. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263212>.

45. Roncero-Clemente C., Husev O., Stepenko S., Vinnikov D., Romero-Cadaval E. Output voltage control system for a three-level neutral-point clamped quasi-Z-source inverter. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. Vol. 89(5). P. 76–80.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2023 р.



S. Halko¹, O. Miroshnik², M. Syvenko², M.Z. Qawaqzeh³, Huthaifa Al_Issa³

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²State Biotechnological University

³Balqa Applied University

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF ACCUMULATING AND GENERATING SOURCES OF ELECTRIC ENERGY IN AUTONOMOUS LOCAL ELECTRICAL SYSTEMS

Summary

The article discusses ways to ensure uninterrupted power supply to consumers in the conditions of stochastic operation of generators based on renewable energy sources and identifies the most suitable parameters for storing electrical energy and generating equipment in autonomous local electrical systems. The substantiation of the role of electric energy storage in the presence of renewable energy sources in autonomous local electrical systems with stochastic mode of operation is provided. The main provisions of the model of electrical systems used are presented. The dependence of the parameters of the energy storage depending on the composition of the generating capacities has been studied. The implementation of the problem of determining the parameters of devices for accumulating electrical energy by the method of purposeful modeling is considered. The results of the multi-criteria selection of power and energy intensity of the electric energy storage device are substantiated.

A mathematical model for determining the optimal parameters of electric energy storage devices for autonomous local electrical systems using mixed integer programming with optimization and consideration of economic indicators has been developed. When compiling the optimization model, drives were considered together with generating sources. This is true from an economic point of view. However, electric energy accumulators are characterized by technical parameters and characteristics that differ from generators. Therefore, more attention was paid to these elements of the system and the algorithm for ensuring uninterrupted power supply to consumers in the conditions of stochastic operation of generators based on renewable energy sources. Determination of the optimal parameters of electricity storage devices for autonomous local power grids is carried out, first of all, based on technical and economic considerations. The dependencies of the parameters of electric energy storage devices on the composition of the generation of autonomous local electrical systems are studied.

Keywords: local power grids, renewable energy, electricity storage, generation, autonomous sources.