

УДК 621.311

## ОПТИМАЛЬНА ПОБУДОВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

М.П. Кузнецов<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, О.А. Мельник<sup>2\*\*</sup>, асп.

1 – Інститут відновлюваної енергетики НАН України,

вул. Гната Хоткевича, 20-а, Київ, 02094, Україна

e-mail: [renewable@ukr.net](mailto:renewable@ukr.net), [nik\\_ku@ukr.net](mailto:nik_ku@ukr.net)

2 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

e-mail: [aspirantura@kpi.ua](mailto:aspirantura@kpi.ua)

*Поєднання вітрових та сонячних електростанцій в генеруючий комплекс разом з акумулюючими пристроями підвищує надійність забезпечення електроенергією локальних споживачів. Однак економічна ефективність такого комплексу суттєво залежить від оптимального співвідношення потужностей. Оскільки поточна вітрова та сонячна енергія мають випадкову природу, задачі оптимізації мають формулюватися з урахуванням стохастичних факторів. Можливі різноманітні вимоги до роботи енергокомплексу, яким відповідають різні типи стохастичних оптимізаційних задач. Пропонуються класифікація та способи формулювання таких задач залежно від вибору критеріїв оптимальності. Бібл. 6, рисунок.*

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, гібридна енергосистема, стохастична оптимізація.

Застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в об'єднаних чи локальних енергосистемах має низку переваг, а саме: економію паливних ресурсів, незалежність від зовнішнього постачання, наближеність до споживача, а у перспективі – здешевлення енергії у разі одночасного позитивного екологічного ефекту. Щоб досягти високих техніко-економічних показників, стабільних робочих параметрів енергетичного обладнання й надійного енергозабезпечення споживачів, створюються комбіновані (гібридні) електроенергетичні системи (КЕЕС), де може вироблятися й акумулюватися електрична й теплова енергія у разі поєднання ВДЕ з технологіями традиційної енергетики. Так, поєднання фотоелектричних панелей і вітроелектричних установок не лише підвищує загальну вихідну енергію, а й згладжує режим генерування, зменшуючи відносну величину випадкових флуктуацій [1]. Елементи КЕЕС можуть працювати в паралельному чи послідовному режимі, а сама КЕЕС може бути автономною, приєднаною до загальної мережі або працюючою як в автономному, так і в мережевому режимах. Залежно від типу системи можуть формуватися вимоги до її складових та режимів їх роботи.

Оптимальне співвідношення окремих елементів у КЕЕС на основі ВДЕ визначається з урахуванням багатьох факторів: забезпеченості традиційними джерелами енергії; кліматичних (метеорологічних) умов; структури систем енергопостачання і енергоспоживання; вимог до якості електричної і теплової енергії; вимог до графіка енергопостачання; екологічних та економічних факторів; вартісних показників тощо. Критерії оптимізації формулюються залежно від цих факторів та визначають вибір методів обчислювальної оптимізації для досягнення техніко-економічної оптимальності у разі використання ВДЕ різних видів [2].

У загальному випадку оптимізаційні задачі можуть бути розбиті на три групи: детерміновані, не забезпечені повнотою інформації і стохастичні задачі [3]. Наявність вітрової та сонячної електростанцій, залежних від стану погоди, вносять невизначеність у роботу енергосистеми. Рівень споживання також, як правило, носить випадковий (у певних межах) характер. Отже, оптимізація такої КЕЕС має бути стохастичною. Окремим випадком стохастичного є статистичний опис, коли існує можливість оцінити лише вибірку деякої випадкової величини (у практичних задачах найчастіше так і буває), на підставі якої і будуються відповідні емпіричні характеристики – щільність розподілу, моменти випадкових величин тощо. Проте часто для оцінки роботи енергосистеми застосовують ретроспективний аналіз, безпо-

середньо використовуючи історичні дані про швидкість вітру, сонячну радіацію та характер споживання. В такій постановці задача оптимального підбору потужностей є цілком детермінованою, проте оптимізація потребуватиме громіздких обчислень, а результати матимуть обмежене застосування. Зручнішим для оцінки можливостей КЕЕС є розрахунок статистичних показників, а найбільш повне представлення про імовірність певних ситуацій дасть імітаційне моделювання.

Довільна математична модель задачі математичного програмування складається з двох частин: цільової функції і обмежень. Представимо задачу стохастичної оптимізації у вигляді

$$f(x) \rightarrow \text{extr}(\max, \min), \quad f_0(x) = 0; \quad f_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, k, \quad (1)$$

де  $f(x)$  – цільова функція (критерій оптимізації), вид якої залежить від умов цієї задачі;  $x$  – випадкова величина з деякої області визначення та певним законом розподілу (допустимий елемент); умови для  $f_i(x)$  – обмеження. В загальному вигляді це задачі опуклого програмування. Рівність для  $f_0(x)$  називають рівнянням стану: зазвичай воно описує функціональні зв'язки досліджуваних параметрів або фізичні закони. У випадку КЕЕС на базі ВДЕ рівняннями стану будуть енергетичні характеристики елементів (залежність потужності від швидкості вітру чи інсоляції, характеристика зарядки/розрядки акумуляторів тощо). Нерівності стосуватимуться досяжного потенціалу ВДЕ та вимог до якості енергопостачання.

У стохастичній задачі в якості цільової функції використано [3]:

- математичне очікування деякої функції від розв'язку (або самого розв'язку) –  $M$ -критерій (модель);
- дисперсію деякої функції від розв'язку (або самого розв'язку) –  $D$ -критерій;
- ймовірність попадання розв'язку (або функції від розв'язку) в деяку область –  $P$ -критерій;
- мінімальне (максимальне) значення деякої функції від розв'язку –  $MM$ -модель;
- комбінацію сукупності відповідних моделей (наприклад,  $M-D$ -модель) і т.д.

За характером обмежень задачі можна класифікувати аналогічно:

- якщо обмеження мають виконуватися при всіх реалізаціях параметрів, то вони будуть детермінованими;
- якщо з деяких міркувань можна допустити, щоб нев'язки в умовах не перевищували заданих з певною вірогідністю  $\alpha$  (де  $0 < \alpha \leq 1$ ), то обмеження називаються імовірнісними;
- іноді можлива заміна жорстких обмежень їх усередненням за розподілом випадкових параметрів. Такі обмеження називаються статистичними.

Вибір конкретного методу розв'язку залежить від постановки задачі оптимізації. Розглянемо для прикладу гібридні енергосистеми, що передбачають вироблення електроенергії від ВЕС та СЕС і резервне накопичення (акумуляування) енергії. Можлива оптимізація параметрів такої системи, якщо за мету ставиться мінімальна собівартість електроенергії, максимальна її утилізація чи найбільш доцільна ємність акумуляторів за якимось із критеріїв [4]. Оскільки в кожний момент часу поточна генерована потужність має властивості випадкової величини, то можлива лише імовірнісна оцінка різних режимів роботи з заданим довірчим рівнем, наприклад, часова протяжність певного режиму. Така оцінка важлива, зокрема, у разі вибору акумуляюючих підсистем. Як критерій надійності використовують певні показники (індекси) [2]. Часто використовується індекс імовірної втрати живлення  $LPSP$  (Loss of Power Supply Probability) – показник, що відображає імовірність втрати можливості до повного забезпечення енергією потреб споживача. Інша назва – дефіцит потужності. Ситуація дефіциту виникає, коли генерована потужність менша споживаної на даний час, а потужність акумуляторної батареї досягла мінімального рівня. Індекс  $LPSP$  можна визначити як відношення всієї нестачі енергії до загальної потреби на заданому часовому інтервалі. У разі перевищення потреб і повністю зарядженої батареї акумуляторів частина енергії буде втрачена. Індекс  $EXC$  визначається як відносна частка надлишкової енергії за певний період (Energy Excess percentage).

Найчастіше розглядають два типи показників (індексів) – ті, що використовуються для кількісної оцінки надійності системи, такі як імовірність втрати навантаження або енер-

гії, або такі, які використовуються для визначення економічної доцільності у разі проектування, наприклад, вартість життєвого циклу або приведена вартість електроенергії. Якщо до складу енергосистеми входять також традиційні джерела енергії, метою оптимізації є максимальне їх заміщення відновлюваними джерелами.

Задача для  $M$ -моделі (або  $M$ -задача) у загальному вигляді: у разі заданого середньоквадратичного відхилення (СКВ) допустимих елементів потрібно забезпечити мінімальне математичне очікування критерію  $f(x)$ . Ця задача найбільш близька до класичного вигляду оптимізаційних задач. Стосовно гібридної енергосистеми до  $M$ -моделі відноситься, наприклад, задача мінімізації собівартості електроенергії. Як випадкова складова вважається обсяг генерованої енергії, залежний від погодних умов (вітру, хмарності) у досліджуваній часовий проміжок. У загальному випадку цільова функція такої математичної моделі має вигляд

$$f(T) = \int_0^T \sum_i^N c_i y_i(t) dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $c_i$  – питома вартість одиниці електричної енергії від  $i$ -го генеруючого елемента (чи групи елементів) певного типу;  $y_i(t)$  – кількість одиниць електричної енергії, отриманої від  $i$ -го елемента;  $N$  – кількість елементів;  $T$  – час експлуатації. Оскільки продуктивність генерування прямо пропорційна номінальній потужності, яка при обраному типі генерування визначається кількістю окремих елементів (генеруючих модулів), то задача оптимізації є цілочисловою лінійною, де параметрами оптимізації є кількість модулів кожного типу. Тип модуля характеризується його енергетичною характеристикою, що відіграє роль рівняння стану, а обмеження у вигляді нерівностей, крім потенціалу ВДЕ, стосуються також загальних параметрів енергосистеми (пропускної здатності мереж, потреб споживача, можливостей розміщення тощо). У разі заміни показників продуктивності їх математичним сподіванням, тобто переходу до осереднених значень швидкості вітру та рівня інсоляції, ця задача стає детермінованою і найчастіше саме так і вирішується. Слід зазначити, що для вітрової енергії істотним є не лише середнє значення швидкості вітру, а й дисперсія, враховуючи суттєво нелінійну енергетичну характеристику ВЕУ. Для сонячної енергії важливим показником є частота коливань рівня радіації впродовж доби. Особливу роль мають градієнти потужності, які також не враховуються у разі осереднення. Зазначені фактори відрізняють оптимізаційні задачі для КЕЕС на базі ВДЕ від задач традиційної енергетики.

Інші варіанти  $M$ -задачі – забезпечення певної кількості енергії, якщо режим її надходження несуттєвий. Якщо ж задоволення попиту важливе в кожен момент часу, ставиться задача пошуку мінімальної за вартістю конфігурації енергосистеми, що задовольняла б попит, тобто при обмеженні виду

$$\sum_i^N p_i(t) + SOC(t) \geq p_L(t), \quad (3)$$

де  $N$  – кількість, а  $p_i$  – потужність генеруючих модулів (вітроустановок, фотопанелей);  $SOC$  – стан зарядження акумуляторної батареї;  $p_L$  – потужність навантаження.

У вигляді  $M$ -задачі може формулюватися і потреба в мінімізації втрат споживання ( $LPSP$ -критерій) чи втрат енергії ( $EXC$ -критерій) при фіксованих обмеженнях. Однак слід враховувати, що у випадку гібридних енергосистем на основі ВДЕ втрати енергії чи споживання спричинені розкидом значень потужності стосовно очікуваних значень, тому таку задачу краще формулювати в термінах  $D$ -моделі.  $D$ -задача матиме такий вигляд: при заданому СКВ допустимих елементів забезпечити мінімальне значення СКВ цільової функції (критерію).

Можливий варіант, коли мінімальне значення дисперсії досягається надто великою ціною, тоді є сенс говорити про імовірність втрат не вище певного рівня. Це призводить до  $P$ -задачі: при заданому СКВ потрібно знайти таке  $x_c$ , при якому імовірність  $P(f_{min} \leq f(x_c) \leq f_{max})$  досягає максимуму. Значення  $f_{min}$  та  $f_{max}$  відповідають бажаному діапазону потужностей.

Прикладом  $P$ -задачі є забезпечення нормативної частоти струму. Так, згідно з нормами СОУ [5] частота  $\omega$  має перебувати в певних межах не менше 95 % часу доби, тобто  $P(49,8 \leq \omega \leq 50,2) \geq 0,95$ , не виходячи за гранично допустимі межі  $50 \pm 0,4$  (Гц). Отже, тут є обмеження імовірнісні й абсолютні. В свою чергу коливання частоти пов'язані з небалансом потуж-

ності, тому відповідні умови можуть бути перераховані в терміни потужності стосовно досліджуваної енергосистеми. Умови  $P$ -задачі частіше можуть фігурувати як обмеження, оскільки основною цільовою функцією все ж є вартісні показники.

Стохастичну оптимізацію можна звести до детермінованої, якщо відомі функції розподілу випадкових величин. Нехай  $\max P_{\Delta}$  та  $-\min P_{\Delta}$  позначають відповідно максимальне та мінімальне досяжні значення небалансу потужності на даному часовому інтервалі (в загальному випадку ці значення можна прийняти нескінченними). Якщо відома функція щільності розподілу небалансу потужності  $\varphi_{\Delta P}(p) = F'_{\Delta P}(p)$ , то для частки надлишкової енергії можна розрахувати імовірність її появи. Тоді можна визначити

$$EXC = \int_0^{\max P_{\Delta}} \varphi_{\Delta P}(p) dp = 1 - F_{\Delta P}(0). \quad (4)$$

Недостатня енергія, тобто втрати навантаження, визначається як

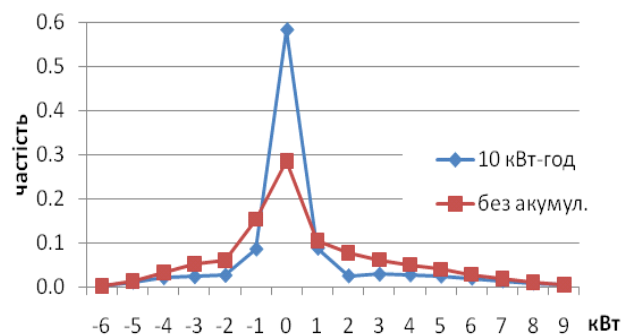
$$LPSP = \int_{-\min P_{\Delta}}^0 \varphi_{\Delta P}(p) dp = F_{\Delta P}(0). \quad (5)$$

Звідси випливає, що у разі неперервної зміни потужностей генерації та споживання їх точне співпадіння (нульовий баланс) вважається точковою подією з нульовою імовірністю. Наявність буферної потужності (акумулятора) може забезпечувати нульовий баланс з певною імовірністю, а функція розподілу відхилень потужності від потреб матиме помітний пік у нульовій точці (див. рисунок) як приклад гістограми небалансу потужності для ємності акумулятора 10 кВт-год та без накопичення енергії.

Орієнтування на максимальні відхилення балансу енергії у разі вибору акумуляторних батарей може призвести до економічно невиправданої їх ємності. При оптимізації за критерієм математичного сподівання доцільно виходити з середнього рівня можливого накопичення, а для  $P$ -критерію визначити допустиму імовірність небалансу (надміру чи нестачі потужності).

Слід зазначити, що часто в задачах стохастичної оптимізації необхідно спостерігати за змінами математичного очікування і дисперсії одночасно, не допускати перевищення ними заданих значень або допускаючи це перевищення з певною імовірністю. Для вирішення цієї проблеми розглядаються моделі зі змішаними умовами (дво- та багатокритеріальні задачі) [6], що потребуватиме встановлення ієрархії критеріїв у термінах Парето-оптимальності. Вибір критеріїв оптимізації та визначення домінуючих критеріїв є задачами проектування (коригування режимів роботи елементів КЕЕС можливе на стадії експлуатації) і залежать від призначення цієї енергосистеми, особливостей її роботи, потреб інвестора. Зміна критеріїв може спричинити значну відмінність у результатах оптимізації, навіть якщо джерела енергії не змінюються.

Очевидно, можливих постановок задач стохастичного програмування для енергосистем на базі ВДЕ досить багато, і вибір певного їх виду залежить від конкретних умов для практичних задач, наявної інформації та мети дослідження. Постановка задачі істотно залежить також від того, чи є можливість під час вибору (прийняття) рішень уточнювати стан середовища (економічних, технічних чи природних умов) на підставі певних спостережень. Коректне формування вимог до гібридної енергосистеми та вдале формулювання оптимізаційної задачі дадуть змогу забезпечити як економічну привабливість, так і задовільні умови щодо надійності енергозабезпечення споживачів.



1. Кузнецов М.М. Моделирование совместной работы ветровой та солнечной электростанций. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 1. С. 12–16.
2. Victor O. Okinda, Nichodemus A. Odero. A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. Issue 11, 2015. P. 153–163.

3. Гитман М.Б. Введение в стохастическую оптимизацию: учебное пособие. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. 104 с.
4. Кузнецов М.П. Особливості оптимізації гібридних енергосистем. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика у XXI столітті". Київ: 2016. С. 102–107.
5. СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.156:2009 «Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України. Настанова»
6. Niknam T. A modified honey bee mating optimization algorithm for multiobjective placement of renewable energy resources. *Applied Energy*, Issue 88, 2011. P. 4817–4830.

УДК 621.311

**Н.П. Кузнецов<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **А.А. Мельник<sup>2</sup>**, асп.

1 – Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,  
ул. Гната Хоткевича, 20-а, Киев, 02094, Украина

2 – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

### **ОПТИМАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

*Сочетание ветровых и солнечных электростанций в генерирующем комплексе вместе с аккумулирующими устройствами повышает надежность обеспечения электроэнергией локальных потребителей. Однако экономическая эффективность такого комплекса существенно зависит от оптимального соотношения мощностей. Поскольку текущая ветровая и солнечная энергия имеют случайную природу, задачи оптимизации должны формулироваться с учетом стохастических факторов. Возможны различные требования к работе энергокомплекса, которым соответствуют разные типы стохастических оптимизационных задач. Предложены классификация и способы формулирования задач в зависимости от выбора критериев оптимальности. Библ. 6, рисунок.*

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, гибридная энергосистема, стохастическая оптимизация.

**М.Р. Kuznietsov<sup>1</sup>**, **О.А. Melnyk<sup>2</sup>**

1 – Institute of renewable energy National Academy of Science of Ukraine,  
Hnata Khotkevycha, 20A, Kyiv, 02094, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

### **OPTIMAL ARRANGEMENT OF THE ELECTRIC POWER COMPLEX ON THE BASIS OF RENEWABLE ENERGY**

*The combination of wind and solar power stations in a generating complex along with accumulating devices increases the reliability of local power supply. However, the economic efficiency of such a complex essentially depends on the optimal power ratio. Since current wind and solar energy are of an occasional nature, optimization tasks should be formulated taking into account stochastic factors. Different requirements for the power complex are possible, which correspond to different types of stochastic optimization tasks. The classification and formulating methods of such tasks are proposed, depending on the choice of criteria of optimality. References 6, figure.*

**Key words:** renewable energy, hybrid power system, stochastic optimization.

1. Kuznietsov M.M. Modeling of the wind and solar power common work. *Vidnovluvana eneretyka*. 2016. Vol. 1. P. 12–16. (Ukr.)
2. Victor O. Okinda, Nichodemus A. Otero. A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. Issue 11, 2015. P. 153–163.
3. Gitman M.B. Introduction to stochastic optimization: a tutorial / Perm National Research Politechnical University, 2014. 104 p. (Rus)
4. Kuznietsov M.P. Features of optimization of hybrid power systems. Materials of the XVII *International Scientific and Practical Conference "Vidnovluvana eneretyka v 21 stolittii"*. Kyiv: 2016. P. 102–107. (Ukr.)
5. СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.156:2009 “Main requirements to regulation of frequency and capacity in the IPS of Ukraine. Guideline”: (Ukr.)
6. Niknam T. A modified honey bee mating optimization algorithm for multiobjective placement of renewable energy resources. *Applied Energy*, Issue 88, 2011. P. 4817–4830.

Надійшла 02.03.2018

Received 02.03.2018