

УДК 621.311

**ІМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ У СКЛАДІ ВІТРОВОЇ ТА СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ****М.П. Кузнецов<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **О.В. Лисенко<sup>2</sup>**, канд. техн. наук1 – Інститут відновлюваної енергетики НАН України,  
вул. Гната Хоткевича, 20-а, Київ, 02094, Україна2 – Таврійський державний агротехнологічний університет,  
пр. Б. Хмельницького, 18, Мелітополь, Запорізька область, 72312, Україна  
e-mail: nik\_ku@ukr.net, helga\_vl@ukr.net

*Описано методику імовірнісного моделювання сумарної потужності вітрової та сонячної електростанцій. Для розрахунку параметрів математичної моделі було використано результати статистичного аналізу вітрової та сонячної енергії. За запропонованими моделями отримано значення швидкості вітру та сонячної інсоляції, які надалі перераховано у потужність електроенергетичного комплексу. Перевірку адекватності моделі сумісної роботи сонячної та вітрової електростанцій проведено шляхом порівняння із фактичними даними, отриманими за річний інтервал часу в суміжних районах Запорізької області. Розбіжність модельованих та фактичних значень виробленої енергії становила 1,5...2,5 % у середньомісячному вимірі. Бібл. 7, рис. 2, табл. 2.*

**Ключові слова:** математична модель, вітроелектростанція, сонячна електростанція, швидкість вітру, сонячна радіація.

На сьогодні вітрові (ВЕС) та сонячні (СЕС) електростанції є найбільш динамічно зростаючими джерелами відновлюваної енергії як за кількістю, так і за загальною встановленою потужністю. Але одним з найбільш вагомих їх недоліків залишається нестабільність генерації, що залежить від сезонних та метеорологічних факторів. Як наслідок, вони є джерелами коливань потужності тривалістю від кількох діб до кількох хвилин, що негативно впливає на роботу енергосистеми та якість електричної енергії.

Існуючі методології визначення необхідності у нових генеруючих потужностях розглядають виключно можливості застосування традиційних технологій виробництва електроенергії з добре прогнозованою потужністю. Ці методології не забезпечують можливість коректного урахування впливу впровадження ВЕС та СЕС на розвиток об'єднаної енергосистеми (ОЕС), що призводить до виникнення помилок у визначенні необхідної структури потужностей ОЕС, у тому числі резервних [1].

Математичну модель миттєвої потужності ВЕС розглянуто, зокрема, в роботі [2]. Для моделювання застосовано подання миттєвої потужності у вигляді осередненого значення для заданого сезону (трендової кривої), середньодобового значення як випадкової величини та поточних короткотермінових змін як випадкового процесу. Отже, функція миттєвої потужності  $p=P(t)$  у загальному випадку матиме вигляд

$$P(t) = \omega(t) + \sigma \cdot \varepsilon + U(t), \quad (1)$$

де  $\omega(t)$  – осереднена крива, що імітує традиційну зміну впродовж доби;  $\sigma$  – стандартне відхилення середньодобових значень;  $\varepsilon$  – стандартна нормально розподілена випадкова величина;  $U(t)$  – випадковий процес, що стосується відхилень потужності від середньої на момент часу  $t$ .

Модель (1) досить непогано відображає поведінку вітру. Однак для представлення потужності ВЕС як функції швидкості вітру точнішою є модель логнормального розподілу:

$$P(t) = \exp[\omega(t) + \sigma \cdot \varepsilon + U(t)]. \quad (2)$$

У цьому випадку моделювати потрібно значення логарифма від потужності, нормованої відповідним чином.

Особливістю наведених моделей є виділення з випадкової складової окремо середньодобових значень як добре прогнозованих величин, що дає змогу зменшити ступінь невизначеності та покращити адекватність моделі. Апроксимоване середнє  $\omega(t)$  та випадковий процес  $U(t)$  можна визначити методами, викладеними, наприклад, у роботі [3]. Для моделювання

роботи ВЕС застосовано подання короткотермінових змін  $U(t)$  як випадкового процесу типу Орнштейна-Уленбека:

$$U(t_k) = U(t_{k-1}) \cdot e^{-\beta \cdot \Delta t} + \frac{\sigma^*}{\sqrt{2\beta}} \sqrt{1 - e^{-2\beta \cdot \Delta t}} \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

де  $\Delta t$  – елементарний інтервал часу,  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ ;  $\sigma^*$  – волатильність;  $\beta$  – величина зносу випадкового процесу. Таке подання дає змогу використовувати елементарні інтервали часу різної тривалості залежно від наявних фактичних (статистичних) даних, що є перевагою порівняно з традиційними моделями.

Один з варіантів формул для розрахунку параметрів моделі:

$$\frac{(1 - e^{-\alpha})^2}{2(\alpha - 1 + e^{-\alpha})} = \frac{\sum X_{j+1} X_j}{\sum X_j^2}; \quad \sigma^2 = \alpha^3 [\Delta(\alpha - 1 + e^{-\alpha})]^{-1} (n-1)^{-1} \sum_i X_i^2, \quad (4)$$

де  $X_i$  – фактичні значення часового ряду даних випадкового процесу,  $\alpha = \beta \cdot \Delta t$ .

Моделювання безпосередньо потужності ВЕС дає змогу одразу врахувати особливості їх роботи. Однак у разі перспективного аналізу конкретний тип вітроустановок і відповідно їх енергетичні характеристики можуть бути відомі лише попередньо або обиратися за результатом аналізу. За цих умов доцільно моделювати швидкість вітру, наслідуючи характерні особливості її ймовірнісної поведінки у визначених регіонах. При цьому можливе застосування того ж математичного підходу, що й у разі моделювання потужності. Моделюються показники швидкості вітру, а потім потужність ВЕС розраховується за енергетичною характеристикою типової вітроустановки. Такий підхід є більш універсальним, оскільки дає змогу враховувати різні енергетичні характеристики конкретних генеруючих установок. Зміна швидкості вітру впродовж доби  $U^{(i)}(t)$  моделюється аналогічно формулам для потужності, проте замість нормального розподілу застосовується розподіл Вейбула (чи аналогічний). Розподіл середньодобової складової вважається нормальним; насправді при значних швидкостях вітру (5 м/с і вище), характерних для висотних рівнів сучасних ВЕС, розподіл Вейбула вже майже не відрізняється від нормального. Розподіл Вейбула (інтегральна функція  $F(v) = 1 - e^{-(v/B)^k}$ ) можна змоделювати формулою

$$v = B \cdot \sqrt[k]{-\ln x}, \quad (5)$$

де  $x$  – рівномірно розподілена на інтервалі від 0 до 1 випадкова величина, а  $v$  має розподіл Вейбула; стандартний нормальний розподіл моделюється виразом  $\varepsilon = \sqrt{-2 \ln x_1} \cdot \sin(2\pi x_2)$  [4].

Оскільки відповідність реального розподілу швидкостей вітру розподілу Вейбула була попередньо перевірена, а тип вітроенергетичної установки (ВЕУ) може бути довільним, доцільно моделювати саме швидкість вітру за виразом (1). Отримані значення надалі перераховуються у потужність відповідної ВЕУ, а адекватність моделі перевіряється порівнянням з фактичними даними.

Математична модель поточного рівня сонячної радіації як випадкового процесу, змінного в часі впродовж доби, запропонована, зокрема, в роботі [5]. Модель процесу інсоляції має вигляд

$$y_i(t_j) = u_i(t_j)[1 + C_v \cdot \varepsilon(i)] + b \cdot [x(j) - 0,5] \leq Y_i(t_j), \quad (6)$$

де  $u_i$  – рівень сонячної радіації (Вт/м<sup>2</sup>)  $i$ -го сезону (місяця, дня);  $j$  – номер часового інтервалу впродовж дня (час  $t_j$  – середина  $j$ -інтервалу);  $u_i(t)$  – осереднена для даної пори дня крива (математичне сподівання);  $C_v$  – коефіцієнт варіації середньодобового рівня;  $b$  – розмірний параметр (Вт/м<sup>2</sup>), що має забезпечувати визначений розмах поточних флуктуацій;  $x(j)$  – рівномірно розподілена випадкова величина ( $0 < x < 1$ ), яка задається окремо для кожного часового інтервалу.

Рівномірність розподілу поточних флуктуацій відображає факт високих (вище нормального) значень ексцесу для стрибків потужності. Для поточних флуктуацій, крім рівномірного розподілу, передбачено деяку залежність від попереднього значення та середнього рівня:

$$b = k \cdot 0,5 \cdot [u_i(t_j) + y_i(t_{j-1})], \quad (7)$$

де  $k$  – емпіричні значення, характерні для сезону та місцевості. Практично коефіцієнт  $k$  визначає варіацію набору даних стосовно певного часу доби і може бути розрахований як середнє значення цих даних, наприклад їх місячного набору. Поточне значення потужності фотоелектричної станції не може бути від’ємним і перевищувати максимально можливого для даної пори доби. Конкретні величини потужності залежать від типу фотомодуля та його орієнтування, однак знання рівня інсоляції буде достатньо для розрахунку потужності.

Для розрахунку параметрів математичної моделі розглянемо результати статистичного аналізу вітрової та сонячної енергії. Розраховані параметри математичної моделі швидкості вітру наведено в табл. 1.

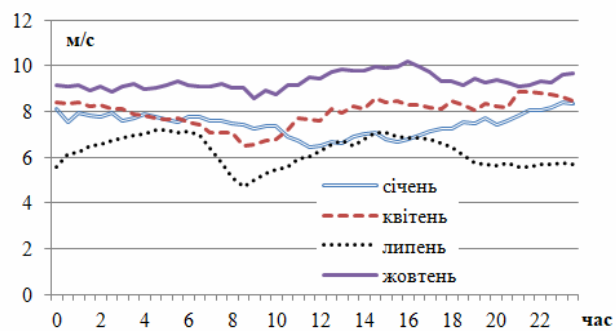


Рис. 1

Таблиця 1

Місяці року	$V_c$ , м/с	СКВ				Параметри Вейбула		Параметри моделі		
		добове	між-добове	місячне	стрибків (30 хв.)	$\gamma$	$B$ , м/с	$\beta$ , 1/с	$\sigma^*$ , м/с	$\sigma$ , м/с
Січень	7,44	2,34	2,55	3,46	0,99	2,26	8,40	0,2	1,8	2,0
Квітень	7,98	2,12	2,90	3,59	1,12	2,34	9,00	0,2	1,9	2,3
Липень	6,23	2,02	1,67	2,62	0,95	2,51	7,01	0,2	1,8	1,3
Жовтень	9,32	2,10	3,57	4,14	0,93	2,37	10,52	0,2	1,8	3,2

Тут значення СКВ отримано статистичною обробкою експериментальних (вимірних) даних, а параметри традиційного розподілу Вейбула та запропонованої моделі розраховано для порівняння точності різних моделей.

Параметри волатильності  $\sigma^*$  та зсуву  $\beta$  забезпечують середньодобові відхилення та розмах стрибків послідовних значень. Величина  $\sigma$  забезпечує міждобову мінливість; вона дещо менша міждобового СКВ, оскільки розподіл середньодобових значень наближається до рівномірного (як у випадку сонячної радіації).

Стосовно вітру можна зазначити відсутність видимого добового ходу (рис. 1), тобто надходження вітрової енергії достатньо рівномірне впродовж доби на відміну від сонячної енергії, що визначає переваги комбінування ВЕС та СЕС. Модельовані значення швидкості вітру можуть бути перераховані у потужність ВЕУ за відповідною енергетичною характеристикою, при цьому одразу можна визначити відносну потужність  $k_w$ .

Для моделювання сонячної радіації визначальними є параметри  $C_v$  та  $b$  рівняння (6), а також характерні для кожного місяця максимальна та середня інсоляції впродовж доби як функції часу. Параметри математичної моделі потужності ФМ прийняті такі: січень –  $C_v = 0,78$ ,  $b = 0,9$ ; квітень –  $C_v = 0,34$ ,  $b = 0,5$ ; липень –  $C_v = 0,14$ ,  $b = 0,3$ ; жовтень –  $C_v = 0,56$ ,  $b = 0,7$ .

Параметри, що описують випадкову поведінку рівня інсоляції, було розраховано для розмірної величини – потужності сонячної радіації на одиницю площі. Для умов, за яких потужність фотоелектричного пристрою лінійно пов’язана з інтенсивністю радіації, безрозмірні показники варіативності в формулах (4), (6), а саме  $C_v$  та  $k$ , можуть бути застосовані і для опису потужності ФМ. Тоді як випадкова величина виступатиме не рівень інсоляції  $y$  (Вт/м<sup>2</sup>), а відносна потужність  $k_s$  (у.о.). Відповідно середніми та максимально досяжними рівнями будуть відносні потужності. Середні (зліва) та максимальні (справа) рівні потужності фотомодуля (ФМ) у відносних одиницях для характерних місяців зображено на рис. 2.

Моделювання сумісної роботи ВЕС та СЕС як еквівалентної потужності недоцільне: тривалості дії сонячної інсоляції та вітру різняться, до того ж розділене моделювання дає

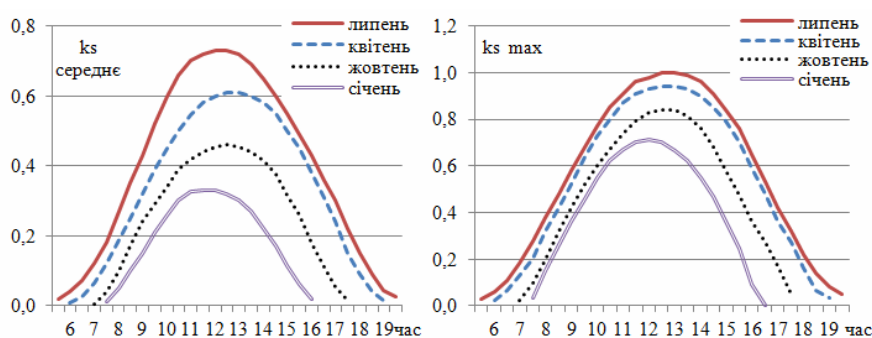


Рис. 2

зможу варіювати ваговими коефіцієнтами кожної станції, змінюючи конфігурацію генеруючої системи.

Для перевірки адекватності моделі сумісної роботи СЕС та ВЕС порівнюємо результати моделювання сумарної потужності та суміщення фактичних синхронізованих даних за

2016 рік у суміжних районах Запорізької області.

Сумарна відносна потужність комплексу «ВЕС+СЕС» прийнята рівною  $\alpha_1 k_w + \alpha_2 k_s$ , де  $\alpha_i$  – вагові коефіцієнти, пропорційні номінальним потужностям відповідних станцій. Для коректності порівняння різних конфігурацій комплексу зручно прийняти  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  [6]. Результати модельованих показників сумарної потужності у відносних одиницях наведено у табл. 2. Вагові коефіцієнти ВЕС та СЕС прийнято рівними ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$ ).

Таблиця 2

Параметр	Січень	Квітень	Липень	Жовтень
Середня потужність	0,24	0,32	0,26	0,35
СКВ	0,18	0,21	0,20	0,21
Вироблена енергія	182	232	195	264
Максимум	0,86	0,99	0,98	0,94

Порівняння результатів розрахунку з фактичними (вимірними) показниками потужності ФМ та ВЕУ, наведеними в [7], вказує на високу збіжність результатів та підтверджує адекватність запропонованого підходу.

Модель дещо завищує показники розкиду значень для окремих днів, що може бути обумовлено більшою кількістю реалізацій випадкового процесу (1000 модельованих діб проти 30-31 фактичних). При цьому сумарна вироблена за місяць енергія за моделлю відрізняється від фактично можливої на 1,5...2,5 %. Враховуючи, що максимально досяжні стрибки потужності за одиницю часу в моделі відповідають фактичним даним, то така модель може вважатися адекватною. Це дає можливість оцінювати сумісну роботу ВЕС та СЕС, змінюючи їх вагові коефіцієнти, для пошуку оптимального співвідношення, розрахунку показників варіативності, потреб у резервних чи акумулюючих потужностях та інших необхідних параметрів роботи енергетичного комплексу.

1. Заключний звіт за договором про виконання науково-дослідної роботи № 06-4/2276-16 від 30.05.2016 р. між Державним підприємством «Національна енергетична компанія України «Укренерго» та ТОВ «Карбон Емішн Партнершип» «Визначення можливості забезпечення потреб національної економіки та суспільства у електричній енергії і потужності на середньострокову та довгострокову перспективу, з урахуванням безпеки постачання та стандартів операційної безпеки»
2. Кузнецов Н.П. Математическое моделирование работы ветровых электростанций. *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 3. С. 79–83.
3. Кузнецов М.П. Методи оцінки випадкових параметрів роботи енергосистем з інтегрованими вітровими електростанціями. *Відновлювана енергетика*. 2014. № 1. С. 59–64.
4. Моделирование случайных величин: Метод. указания / Сост. Н.Ю. Кропачева, А.С. Тихомиров. Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2004. 47 с.
5. Кузнецов М.М. Моделирование совместной работы ветровой та сонячної електростанцій. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 1. С. 12–16.
6. Лисенко О.В., Назаренко І.П. Статистичний аналіз потенціалу спільної роботи вітрової та сонячної електростанцій. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. 2017. Вип. 186. С. 21–22.

7. Лисенко О.В. Статистичний аналіз сумарної дії вітрової та сонячної енергії. *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science"*. November 18, 2017, Warsaw, Poland. Vol. 1. С. 6–11.

УДК 621.311

**Н.П. Кузнецов<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **О.В. Лысенко<sup>2</sup>**, канд. техн. наук

1 – Інститут возобновляемой энергетики НАН Украины,

ул. Гната Хоткевича, 20-а, Киев, 02094, Украина

2 – Таврический государственный агротехнологический университет,  
пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, Запорожская область, 72312, Украина

### **ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В СОСТАВЕ ВЕТРОВЫХ И СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

*Описана предложенная методика вероятностного моделирования суммарной мощности ветровой и солнечной электростанций. Для расчета параметров математической модели были использованы результаты статистического анализа ветровой и солнечной энергии. По предложенным моделям получены значения скорости ветра и солнечной инсоляции, которые в дальнейшем были пересчитаны в мощность электроэнергетического комплекса. Проверка адекватности модели совместной работы солнечной и ветровой электростанций проведена путем сравнения с фактическими данными, полученными за годовой интервал времени в смежных районах Запорожской области. Расхождение смоделированных и фактических значений произведенной энергии составляло 1,5...2,5 % в среднемесечном измерении. Библ. 7, рис. 2, табл. 2.*

**Ключевые слова:** математическая модель, ветроэлектростанция, солнечная электростанция, скорость ветра, солнечная радиация.

**M.P. Kuznetsov<sup>1</sup>**, **O.V. Lysenko<sup>2</sup>**

1 – Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine,

Hnat Hotkevich, 20-a, Kyiv, 02094, Ukraine

2 – Tavriya State Agrotechnological University,

B. Khmel'nitskogo, 18, Melitopol, Zaporozhye region, 72312, Ukraine

### **PROBABILISTIC POWER MODELING OF THE ELECTRIC POWER COMPLEX IN THE WIND AND SOLAR POWER STATIONS COMPOSITION**

*The proposed method of wind and solar power plants the total power probabilistic simulation is described. The results of static analysis of wind and solar energy were used for calculating the mathematical model parameters. According to the proposed models, the values of wind speed and solar insolation were obtained, which were subsequently recalculated into the power of the electric power complex. The verification of the model adequacy of solar and wind power plants joint operation was carried out by comparison with the actual data obtained at the annual time interval in adjacent areas of the Zaporizhzhya region. The difference between the simulated and actual values of the produced energy was 1.5-2.5% in the average monthly measurement. References 7, figures 2, tables 2.*

**Key words:** mathematical model, wind power station, solar power station, wind speed, solar radiation.

1. Final report on the implementation of research work No. 06-4 / 2276-16 dated May 30, 2016 between the State Enterprise "National Energy Company of Ukraine "Ukrenergo" and "Carbon Emissions Partnership" LLC "Determination the national economy and society meeting needs possibility in electric power and power in the medium and long term, considering supply safety and operational safety standards".
2. Kuznetsov N.P. Mathematical simulation of wind power plants work. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2013. № 3. P. 79–83. (Rus)
3. Kuznetsov N.P. Methods of power systems operation random parameters estimation with integrated wind power plants. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2014. № 1. P. 59–64. (Ukr)
4. Modeling of random variables: Method. instructions / N.Yu. Kropacheva, A.S. Tikhomirov. Veliky Novgorod: NovSU, 2004. 47 p. (Rus)
5. Kuznetsov N.P. Simulation of wind and solar power plants joint work. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2016. № 1. P. 12–16 (Ukr)
6. Lysenko O.V., Nazarenko I.P. Statistical analysis of wind and solar power plants joint work potential. *Visnyk KHNTUS-H im. Petra Vasylenka «Problemy enerhozabezpechennya ta enerhozberezhennya v APK Ukrayiny»*. Kharkiv: KhNTUA. 2017. Vol. 186. P. 21–22 (Ukr)
7. Lysenko O.V. Statistical analysis of the total action of wind and solar energy. *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science"*. November 18, 2017, Warsaw, Poland. Vol. 1. P. 6–11 (Ukr)

Надійшла 02.03.2018

Received 02.03.2018