

УДК 621.311

М.П.Кузнєцов, докт.техн.наук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

**Деякі особливості автономної роботи вітрової та сонячної електростанцій**

Поточна потужність вітрової та сонячної електростанцій залежить від стану погоди і є змінною слабо передбачуваною величиною. Використання таких електростанцій у складі автономної енергосистеми має певні особливості, які носять імовірний характер і можуть бути імітовані з допомогою математичних моделей. Визначення параметрів енергосистеми потребує врахування місцевих кліматичних умов і особливостей роботи при змінному характері надходжень електроенергії. Бібл. 8, рис. 5.

**Ключові слова:** вітроелектростанція, сонячна електростанція, математична модель, автономна енергосистема, акумулювання енергії.

ORCID: 0000-0002-0497-7439

Використання вітрових (ВЕС) та сонячних (СЕС) електростанцій у локальних (автономних) енергосистемах доцільне не лише в якості безпаливної технології з її очевидними перевагами, а і як можливість мати певне енергозабезпечення у випадку недоступності електричної мережі. Спільним недоліком таких електростанцій є їх залежність від погоди, коли поточний рівень потужності може бути лише прогнозованим з певною точністю. Якщо можливість компенсувати нестачу електроенергії відсутня, то це значно обмежує можливості використання такої енергосистеми.

**Особливості автономних енергосистем.** Можливі наступні варіанти роботи автономної системи, залежні від характеру споживання енергії: 1) вироблена електроенергія може бути використана без обмежень, наприклад, вся перетворена в теплову (мінімальна конфігурація); 2) може використовуватися тільки енергія, що відповідає певному рівню генерованої потужності, тоді отримана недостатня або надлишкова енергія втрачається; 3) передбачено акумулювання надлишкової енергії з метою її використання при недостатній поточній потужності генерування. Останній варіант технічно найскладніший, проте його застосування дозволяє повніше використати можливості

споживаючого обладнання, якщо такий споживач має певні технічні обмеження по потужності. Другий варіант може бути вдосконалений, якщо крім основного обладнання можлива додаткова утилізація електроенергії, доцільність якої визначається виходячи з вартісних показників. Слід брати до уваги, що електроенергія ВЕС та СЕС може бути реалізована за так званим "зеленим" тарифом, тоді локальна енергосистема буде не цілком автономною.

На рис. 1 у якості прикладу зображено випадковий рівень поточної генерованої потужності (крива лінія). У першому варіанті вся вона може бути використана. Якщо корисне обладнання може працювати лише в межах потужності від  $P_1$  до  $P_2$  (варіант 2), то вся енергія, що відповідає заштрихованим областям, буде втрачена. Натомість при варіанті 3 надлишкова енергія (горизонтальна штриховка) може бути накопичена та в подальшому використана для компенсування в час недостатньої потужності (вертикальна штриховка). Зрозуміло, що в моменти часу  $t < t_1$  накопиченої енергії ще нема, натомість накопичена на часовому інтервалі  $(t_1, t_2)$  енергія може бути використана протягом часу  $(t_2, t_3)$  та  $(t_4, t_5)$ , наскільки її вистачить до чергового накопичення.

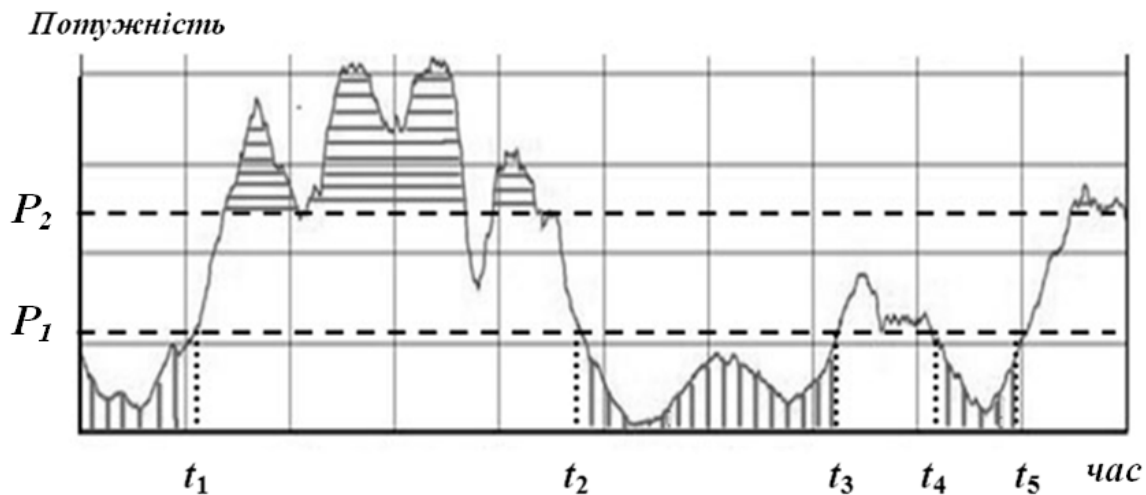


Рис. 1. Можливі режими використання енергії.

Можлива певна оптимізація параметрів такої комбінованої енергосистеми, якщо за мету ставиться мінімальна собівартість корисної продукції споживаючого обладнання, максимальна утилізація електричної енергії чи доцільна потужність акумулюючого обладнання за якимось із критеріїв [1]. Оскільки в кожний момент часу поточна генерована потужність має властивості випадкової величини, то можлива лише імовірнісна оцінка різних режимів роботи із заданим довірчим рівнем, зокрема, часова протяжність певного режиму.

Прикладом локальної комбінованої енергосистеми може бути схема використання електролізу води для утилізації електроенергії ВЕС та СЕС. При цьому водень та кисень можуть бути кінцевим продуктом. Електрична потужність електролізера обмежена, і для покращення економічного результату роботи комплексу "вітер-сонце-водень" можна додатково використовувати надлишок електроенергії, а її нестачу компенсувати з інших джерел. Інший можливий варіант застосування електролізу – використання водню для акумулювання енергії [2].

Для визначення собівартості кінцевого продукту потрібне знання капітальних та експлуатаційних витрат на кожен тип обладнання та віднесення їх до обсягу виробленої продукції, як правило, в річному вимірі. Вартісні складові задаються ринковими чи іншими умовами; натомість обсяг виробленої та спожитої електроенергії визначається з урахуванням по-

годних чинників і є предметом даного дослідження.

#### Обсяги генерування електричної енергії.

Обсяг виробленої та спожитої енергії має визначатися з урахуванням типу і технічних характеристик обладнання, наявності вітрового та сонячного потенціалу, випадкового характеру надходження енергії.

Для врахування випадкової природи вітрової та сонячної енергії можна використати характеристики розподілу її поточних значень як випадкової величини. Зокрема, для ВЕС міжнародним стандартом пропонується річний виробіток енергії визначати за формулою [3]:

$$E_p = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right), \quad (1)$$

де  $N_h$  – кількість годин у році (8760);  $N$  – кількість градацій швидкості вітру (бінів);  $V_i$  – осереднена швидкість вітру в  $i$ -му біні;  $P_i$  – осереднена теоретична потужність в  $i$ -му біні;  $F(V)$  – інтегральна функція розподілу імовірності.

Таким чином, сума значень випадкової величини визначається як сума добутоків осереднених на певних інтервалах значень на частоту попадання в ці інтервали. Більш точною є формула:

$$E = T \int_0^{\infty} P(x) f(x) dx, \quad (2)$$

де  $f(x)$  – диференціальна функція розподілу змінної  $x$ ,  $f(x) = F'(x)$ ;  $P(x)$  – потужність як функція ординати  $x$ ;  $T$  – загальний час роботи.

Формула (1) є наближенням формули (2), якщо при інтегруванні використати метод скінченних різниць і теорему про середнє.

Якщо незалежною змінною вважати поточне значення потужності  $p$  протягом часового інтервалу  $T$ , то отримана енергія буде рівною:

$$E = T \int_0^{\infty} p \cdot f(p) dp, \quad (3)$$

де інтеграл визначає середню на інтервалі  $T$  потужність (математичне сподівання). На практиці реальний час розбивають на інтервали (наприклад, по 10 хв) з осередненням потужності всередині кожного інтервалу; тоді від формули (3) для неперервної випадкової величини можна перейти до виразу типу (1) для дискретної величини з градацією по біах потужності і відповідною їм функцією розподілу імовірності.

Традиційно розглядаються енергосистеми, в яких чітко обумовлено рівень споживання [4]. Пропонована модель розглядає варіант певного діапазону споживаної потужності. Для такого режиму генерування (див. рис. 1) використання генерованої енергії можна описати наступним чином:

$$\begin{aligned} E_0 &= T \int_{P_1}^{P_2} p \cdot f(p) dp, \\ E_1 &= T \int_{P_2}^{\infty} p \cdot f(p) dp, \\ E_2 &= T \int_0^{P_1} (P_1 - p) \cdot f(p) dp, \end{aligned} \quad (4)$$

де енергія  $E_0$  безпосередньо використовується обладнанням; енергія  $E_1$  є надлишковою і може бути акумульована;  $E_2$  – це дефіцит енергії, який має бути компенсований за рахунок акумульованої раніше (в останньому інтегралі дефіцитом можна вважати ситуацію  $p < P_2$ ). Зазначені величини залежать лише від функції розподілу, як впливає з (4), і можуть бути розраховані з гістограми значень потужності при дискретному записі. Цього достатньо при варіантах 1, 2 роботи енергосистеми. Однак у випадку використання акумулятора (варіант 3) важлива не лише кількість появи певних значень потужності, а й

послідовність їх генерування, адже повторно використати можна лише попередньо накопичену енергію (що відповідає умові  $t > t_1$  на рис. 1). Отже, для визначення параметрів акумулювання поточна генерована потужність має визначатися не як випадкова величина, а як випадковий процес у режимі реального часу. Знання функції розподілу буде недостатньо, до того ж її аналітичне визначення є складним і не завжди доступним. Проте математична модель випадкового процесу дозволяє застосувати методи імітаційного моделювання та статистичних випробувань (методи Монте-Карло). Такі підходи застосовуються, коли є достатня база фактичних даних для розрахунку параметрів випадкового процесу. Однак існуючі методи, як правило, потребують значних обчислювальних зусиль і дозволяють змоделювати процес надходження енергії лише з погодинним усередненням (наприклад, обчислювальний комплекс HOMER [5]). Огляд існуючих підходів до моделювання комплексних (гібридних) локальних енергосистем наведено, зокрема, в [6].

Математична модель, що описує потужності ВЕС та СЕС в однакових параметрах і з часовим кроком 10-15 хв, розглянута в роботі [7]. Для моделювання застосовано представлення 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  $p = P(t)$  в загальному випадку матиме вигляд:

$$P(t) = \omega(t) + \sigma \cdot \varepsilon + U(t), \quad (5)$$

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 в момент часу  $t$ . Моделювання здійснюється за такими показниками, як середні значення (математичні сподівання), дисперсії, допустимі зміни за одиницю часу, характер розподілу імовірності певних значень. При цьому до уваги беруться дані з різним часом усереднення – помісячні, середньодобові, поточні. Для вітрових станцій осереднена крива може не

мати вираженого добового ходу, а розподіл швидкості вітру в загальному випадку не є нормальним, хоча може бути близьким до нього; загальноновживаним для вітру є використання розподілу Вейбула. Натомість для сонячної енергії чітко вирізняється денний та нічний час, а функція розподілу інтенсивності в загальному випадку апроксимується емпіричними формулами.

#### Приклад розрахунку роботи енергосистеми.

Для ілюстрації можливостей використання запропонованої моделі (5) розглянемо в якості прикладу роботу автономної енергосистеми, що містить сонячну та вітрову електроустановки, акумулятор і робоче обладнання (споживача енергії). Умови сонячної радіації характерні для широти Києва, літнього місяця [8], а швидкість вітру відповідає розподілу Вейбула, при середньому значенні 5 м/с. Прийmemo для номінальних потужностей:  $P_{BEC} = P_{CEC} = P_1 = 8$  кВт;  $P_2 = 2$  кВт. Для розрахунку сумарної генерації електричної

енергії ВЕС та СЕС значення їх миттєвих потужностей моделюються як зазначено вище. Потім, застосовуючи методи Монте-Карло, можна визначити імовірні рівні сумарної потужності, ймовірність екстремальних значень тощо.

Якщо розглядати сумарну генеровану потужність, то середній рівень становить 4,0-4,2 кВт (рис. 2), а вироблена за добу енергія – близько 100 кВт·год, причому ВЕС виробляє трохи більше половини загальної енергії. Осереднення виконано для 500 реалізацій випадкового процесу з часовим інтервалом моделі 15 хв.

Особливістю даної задачі є наявність коридору робочих потужностей; як правило, в задачах моделювання роботи гібридних енергосистем фігурує конкретний графік навантаження. Середні значення на рис. 2 майже повністю знаходяться в межах робочих потужностей ( $P_1, P_2$ ), проте імовірними є реалізації зі значним перевищенням зазначених рівнів (рис. 3).

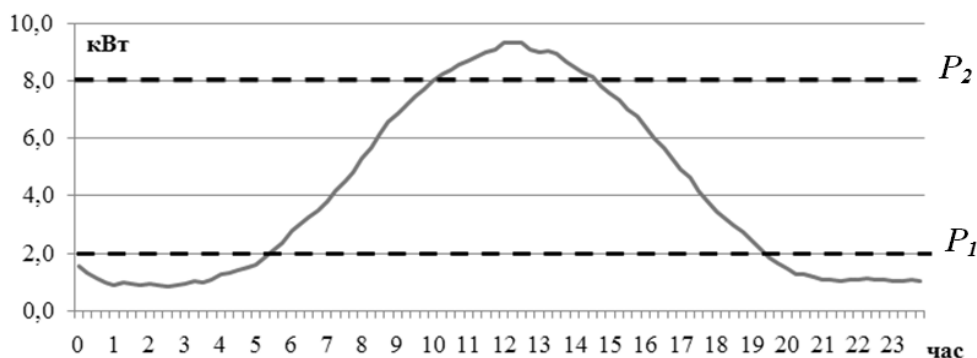


Рис. 2. Осереднена добова хода потужності генерування електроенергії.

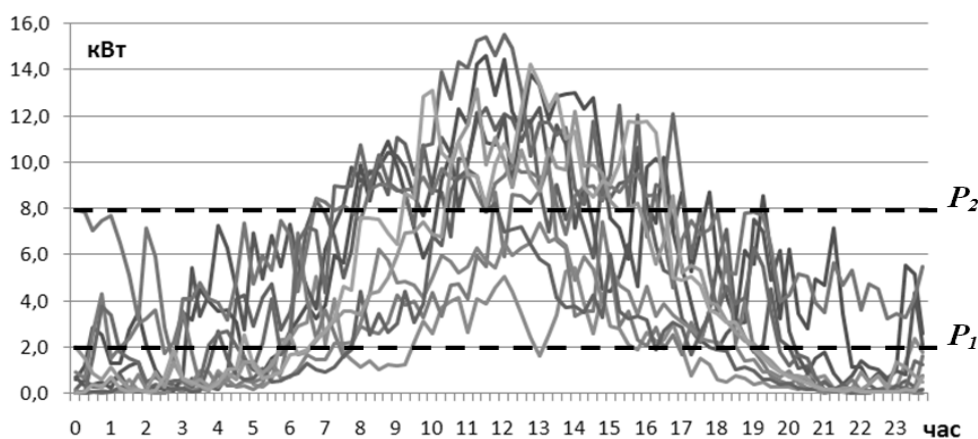


Рис. 3. Типовий характер змін генерованої потужності протягом доби.

Гістограма рівнів повної потужності генерування (частки загального часу) зображена на рис. 4.

Відповідно до гістограми надлишкова енергія як інтегральний показник у даному прикладі приблизно рівна недостатній. Але, якщо брати до уваги тривалість дії певної потужності, то недостатня потужність ( $p < P_1$ ) має імовірність 0,40; робоча потужність (у межах  $P_1, \dots, P_2$ ) – 0,42; надлишкова ( $p > P_2$ ) – 0,18. Якщо не користатися акумуляванням, 8-9% енергії буде втрачено як недостатньої, та 11-12% як надлишкової, тобто спожито буде лише 80% усієї генерованої енергії. Якщо передбачити акумулявання надлишкової енергії з подальшим її використанням, то максимальна потужність зарядки акумулятора – 8 кВт, тобто максимально можлива надлишкова потужність генерування, але імовірність такого режиму низька (див. рис. 4). Так, з імовірністю 0,95 надлишкова потужність не

перевищить 4 кВт, а з імовірністю 0,90 – 2 кВт.

Якщо вважати, що кожна добова реалізація випадкового процесу генерування є незалежною від попередньої, тобто стартовий рівень акумуляованої енергії є нульовим, а розрядження починається у разі недостатньої потужності ( $p < P_1$ ), то максимально можливий з імовірністю 0,95 накопичений протягом дня рівень енергії становить 20 кВт·год, а середній рівень зарядки акумулятора – 5 кВт·год. Приблизно 45-50% часу протягом доби акумулятор не має заряду. Однак для 500 послідовних реалізацій добового циклу, враховуючи можливість накопичення енергії в попередній день, одержимо максимально можливий з імовірністю 0,95 рівень акумуляованої енергії 100 кВт·год, а з імовірністю 0,80 рівень накопичення не перевищує 55 кВт·год при середньому рівні зарядки акумулятора 30 кВт·год (рис. 5).

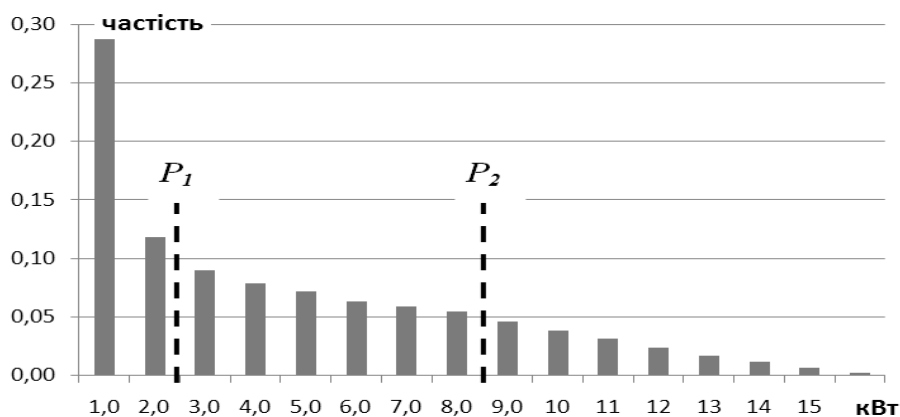


Рис. 4. Гістограма рівнів повної потужності генерування.

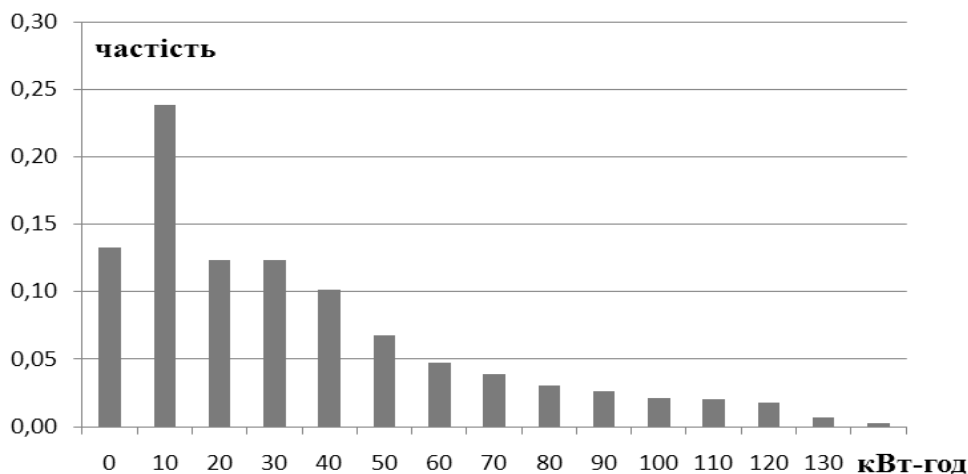


Рис. 5. Гістограма рівнів накопиченої акумулятором енергії.

Тут акумулятор є розрядженим лише 13% загального часу роботи, однак не вся недостатня енергія може бути компенсована за рахунок акумуляування через нерівномірність процесу накопичення; загалом може бути спожито до 90% усієї генерованої енергії. Такими є властивості автономної енергосистеми в даному прикладі, коли використання акумуляованої енергії передбачено лише при потужності, меншій від мінімального рівня ( $p < P_1$ ). Результати будуть іншими, якщо передбачити споживання енергії акумулятора вже при рівні  $p < P_2$ . Тоді акумулятор буде розряджений до 70% часу, максимальний рівень зарядки відповідно зменшиться (в даному прикладі до 17 кВт·год при середньому значенні 3 кВт·год), а рівень використання генерованої енергії зросте до 100%. Однак при цьому зросте і тривалість простоїв обладнання через недостатню потужність, особливо у нічні години, при тому що середня споживана в робочі години потужність зросте. Такий режим доцільний тоді, коли використання енергії не постійне, а прив'язане до денного часу. На практиці необхідно також враховувати допустиму швидкість і діапазон зарядки/розрядки акумулятора, втрати енергії тощо.

У згаданому вище комплексі "вітер-сонце-водень" можливий режим, коли лише надлишкова потужність відновлюваних джерел спрямовується на електролізер – вироблений водень зберігається в балонах, а при недостатній потужності через паливні комірки перетворюється в електроенергію і повертається до енергосистеми [2]. Слід зауважити, що акумуляція типу "електроліз-паливні комірки" спричинить помітні втрати енергії (до 30%), проте продукти електролізу можуть бути використані і для інших потреб.

**Висновки.** Поведінка енергосистеми, яка базується на використанні сонячної та вітрової енергії, залежить від погодних умов і носить випадковий характер. Математичне моделювання рівня сонячної радіації та швидкості вітру у вигляді випадкового процесу з певними параметрами дає змогу оцінити особливості їх спільного застосування. Це важливо при проектуванні автономної енергосистеми, особливо у випадку

існування певних обмежень щодо використання генерованої електроенергії.

Оцінка характеру роботи конкретної енергосистеми на базі ВЕС та СЕС потребує дослідження місцевих погодних умов, особливостей споживання енергії, можливостей її накопичення і властивостей акумуляції тощо. Застосування імітаційного моделювання дозволяє оптимізувати параметри енергосистеми для підвищення її енергетичної та економічної ефективності, підібрати технічні параметри обладнання та визначити імовірні режими його роботи.

1. Розен В.П. і ін. Оптимізація процесів вироблення електроенергії комбінованою електроенергетичною системою // Енергетика. – 2013, №1. – С. 20–26.
2. Esmaeili S., Shafiee M. Simulation of dynamic response of small wind-photovoltaic-fuel cell hybrid energy system // Smart Grid and Renewable Energy – 2012, №3. – P. 194–203.
3. Системи турбогенераторні вітряні. – Ч.12. Випробування вітряних турбін для визначення енергетичних характеристик. ДСТУ ІЕС 61400-12:2001 – 2003. – 38 с.
4. Okinda V., Odero N. A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – V.4. – №11. – P. 153–163.
5. Ehnberg J., Bollen M. Simulation of global solar radiation based on cloud observations // Solar Energy – 2005. – P. 157–162.
6. R.A1 Badwawi1, T.K.Mallick. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System // Smart Science – 2015, V.3, №3. – P. 127–138.
7. Кузнєцов М.М. Моделювання спільної роботи вітрової та сонячної електростанцій // Відновлювана енергетика – 2016, №1. – С. 12–16.
8. Електронний ресурс: // eosweb.larc.nasa.gov, satelight.com.

#### REFERENCES

1. Rozen V.P. et al. Optimization of power generation by a combined electricity system // Enerhetyka. – 2013. – №1. – Pp. 20–26. (Ukr)
2. Esmaeili S., Shafiee M. Simulation of dynamic response of small wind-photovoltaic-fuel cell hybrid energy system // Smart Grid and Renewable Energy – 2012. – №3. – Pp. 194–203.
3. Systems wind turbogenerating. – Part.12. Testing wind turbine to determine energy performance. DSTU IES 61400-12:2001 – 2003. – 38 p.
4. V.Okinda, N.Odero. A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – Vol.4. – №11. – Pp. 153–163.

5. J.Ehnberg, M.Bollen. Simulation of global solar radiation based on cloud observations // Solar Energy – 2005. – Pp. 157–162.

6. R.AI Badwawi1, T.K.Mallick. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System // Smart Science – 2015. – V.3. – №3. – Pp. 127–138.

7. Kuznietsov M.M. Modeling cojoint pwerformance of wind and solar power plants operation // Vidnovliuvana enerhetyka – 2016. – №1. – Pp. 12–16.

8. [http:// eosweb.larc.nasa.gov, satel-light.com](http://eosweb.larc.nasa.gov/satel-light.com).

**Н.П.Кузнецов**, докт.техн.наук (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

#### **Некоторые особенности автономной работы ветровой и солнечной электростанций**

*Текущая мощность ветровой и солнечной электростанций зависит от состояния погоды и является переменной слабо предсказуемой величиной. Использование таких электростанций в составе автономной энергосистемы имеет определенные особенности, которые носят вероятностный характер и могут быть имитированы с помощью математических моделей. Определение параметров энергосистемы требует учета местных климатических условий и особенностей работы при переменном характере поступлений электроэнергии. Библ. 8, рис. 5.*

**Ключевые слова:** ветроэлектростанция, солнечная электростанция, математическая модель, автономная энергосистема, аккумулялирование энергии.

**Kuznietsov M.** (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

#### **Some features of autonomous work of wind and solar power stations**

*Current capacity of wind and solar power depends on the weather, and is slightly predictable variable value. The use of such power in the autonomous power system has certain features*

*that are probable and can be simulated using mathematical models. Determination of the system's parameters require consideration of local climatic conditions and characteristics of work at the changing nature of electricity flow. References 8, figures 5.*

**Keywords:** wind power, solar power, mathematical model, autonomous grid, energy storage.

#### SYNOPSIS

The common drawback of wind and solar power is their dependence on the weather, so that the current level of power can only be predicted with some accuracy. This property limits the possibility of their using in autonomous power system. The options work is possible when all electricity is used without restrictions and scheduling, in other cases some part of energy produced is lost or consumer equipment used with significant downtime. The situation could be improved if provided the opportunity to energy accumulation and further use. To optimize the parameters of such a combined power system can only probabilistic assessment of different operating modes with a given confidence level. Averaged performance of the power are dependent on the probability distribution function of random components, but the presence of accumulating make important not only the quantity but also the sequence of appearance of certain values of generated power. Thus, the current capacity is defined as a random process in real time. Appropriate mathematical modeling allows to apply statistical methods that can be generated to determine the likely level of power consumption and the probability of extreme values, so on. Calculations show for a specific example, the probability of equipment downtime or loss of energy is quite high. The use of electric batteries can reduce these losses or eliminate them. Specific parameters of the battery power can be determined by characteristics of wind and solar power, but the decisive role played by the climatic conditions of the area, seasonal weather changes. Assessment of the particular power system based on wind and solar also needs to study the characteristics of energy consumption, the capacity of its storage, storage battery properties.

Стаття надійшла до редакції 14.03.16

Остаточна версія 11.05.16