



УДК 621.311:620.97

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-17

ХАРАКТЕР БАЛАНСУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В ЛОКАЛЬНІЙ ЕНЕРГОСИСТЕМІ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Кузнєцов М. П.¹, д. т. н.,<http://orcid.org/0000-0002-0497-7439>Лисенко О. В.², к. т. н.<http://orcid.org/0000-0001-7085-7796>¹*Ін-т відновлюваної енергетики НАН України,*²*Таврійський державний агротехнологічний університет,*¹ e-mail: nik_ku@ukr.net² e-mail: helga_vl@ukr.net

Анотація - метою роботи є вирішення задачі комплексного забезпечення електричною енергією з використанням мінливих за природою відновлюваних джерел енергії. Предметом дослідження є локальні енергосистеми регіонального чи муніципального рівня, що містять групи споживачів та додаткові джерела розосередженої генерації на базі вітрових чи сонячних електростанцій. Для ефективного використання потенціалу відновлюваної енергії потрібне врахування динамічних властивостей характеру споживання енергії, випадкової природи надходження вітрової та сонячної енергії. Одним з шляхів підвищення надійності енергозабезпечення повного використання генерованої енергії є застосування систем акумуляування. Для оцінки можливостей накопичення енергії та її використання в якості резерву запропоновано модель енергетичного балансу у формі суперпозиції випадкових процесів. Параметри математичної моделі визначаються на основі статистичного аналізу синхронних даних про режим споживання конкретним споживачем та погодних факторів, що визначають доступну потужність відновлюваних джерел. Прийнято, що графік постачання енергії складається на підставі прогнозу споживання електроенергії та погодних факторів. Вивчаються відхилення поточної генерації від прогнозованих потреб; вважаються добре прогнозованими середньодобові показники, а за їх відсутності за основу приймаються ретроспективні дані за тривалий час. Встановлено їх зв'язок з точністю прогнозу та варіативністю випадкових процесів генерування та споживання енергії. При цьому зазначено, що поточні флуктуації споживання і генерації на коротких часових інтервалах практично незалежні. За відомими показниками мінливості процесів споживання та генерації електроенергії можна підібрати характеристики акумуляування, такі як досяжна потужність та ємність, для надійного енергозабезпечення з заданою імовірністю.

Ключові слова: локальна енергосистема, відновлювана енергія, баланс потужності, випадковий процес, акумуляування енергії.

Постановка проблеми. Активна розбудова об'єктів електричної генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним з



головних напрямів розвитку сучасної енергетики. Широке впровадження відновлюваної енергетики є предметом ряду міжнародних угод та зобов'язань України. Енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає зростання частки електричної енергії з таких ВДЕ, як сонячна, вітрова та гідроенергетика, до 20%, і цей обсяг багатьма експертами вважається заниженим. Однак зростання частки ВДЕ вимагає посиленої уваги до можливостей енергосистеми із забезпечення належної надійності постачання [1], зважаючи на змінний і слабо прогнозований в короткостроковій перспективі характер видачі потужності, властивий вітровій та сонячній енергетиці. Це стосується і збалансованості динамічних процесів в системах електропостачання. Розосереджений характер розташування потужностей ВДЕ і їх наближення до кінцевого споживача дають змогу розглядати частину енергосистеми регіонального чи муніципального рівня як локальну. Такий режим генерування створює можливості для більш ефективного використання ВДЕ з одночасним покращенням якості постачання енергії на місцевому рівні.

Аналіз останніх досліджень. Проблемі визначення якості роботи електроенергетичних систем присвячено значну кількість публікацій відомих наукових шкіл, однак поставлені задачі носять переважно детермінований характер і стосуються традиційної енергетики. Не менш важливими є питання узгодженої роботи відновлюваних та традиційних електростанцій з урахуванням того, що рівень споживання електроенергії також містить випадкову складову. Дослідження випадкового характеру потужності ВДЕ виконуються з початку активного розвитку відновлюваної енергетики. Однак існуючі підходи базуються в основному на осереднених даних та апараті детермінованих функцій. Моделювання роботи енергосистеми на основі стохастичних диференціальних рівнянь було здійснено, зокрема, стосовно Північного енергетичного пулу (об'єднаної енергосистеми Норвегії, Швеції, Фінляндії) [2], однак вихідні умови дослідження істотно відрізнялися від особливостей роботи української енергосистеми.

Постановка завдання. Резервування генеруючих потужностей дозволяє уникнути недопоставок енергії, тобто компенсувати негативну складову небалансу [3]. Натомість позитивна (надлишкова) складову може бути збережена шляхом акумуляування, яке одночасно слугуватиме і як резерв потужності. Наявність значних обсягів ВДЕ збільшує імовірність відхилень генерації від графіка споживання, що робить більш актуальним використання технологій акумуляування. Оптимальність системи акумуляування визначається, виходячи з

обмежень на імовірність небалансу та допустимі його рівні (технологічна складова). Надалі необхідно буде брати до уваги також вартість обладнання та власне енергії, в тому числі враховуючи штрафні санкції за відхилення від графіка споживання (економічна складова). Отже, потрібен аналіз комплексного використання різнотипних джерел генерації, з оцінкою можливостей балансування поточної потужності та відповідних потреб у ємності акумулювання.

Основна частина. На відміну від резервування потужності, для якого важливим є розмах відхилень навантаження від графіка, для роботи акумуляторів енергії важлива також послідовність відхилень. Небаланс енергії як інтегральна характеристика небалансу потужності залежить від тривалості та знаку відхилень генерованої потужності від споживаної, а можливість накопичення певної енергії визначає потрібну ємність акумуляторів. Переходячи від значень небалансу потужності до кумулятивних обсягів незбалансованої енергії, можна визначити імовірність накопичення надлишкової енергії при різних рівнях інтеграції ВДЕ до даної локальної енергосистеми.

Приклади режимів споживання в Запорізькій області наведено в роботі [4], де співставлення рівнів споживання та генерації ВДЕ виконано на основі річного масиву синхронних даних щодо швидкості вітру, сонячної радіації і поточного споживання електроенергії різними споживачами. Зокрема, споживач М1 (окремий населений пункт) має середню потужність 700-1100 кВт залежно від пори року, споживач Т1-4 (група населених пунктів) – 4000-5000 кВт. Для переходу від погодних даних до потужності ВДЕ враховано нормовані енергетичні характеристики сучасних вітрових (ВЕС) та сонячних (СЕС) електростанцій.

Для розглянутих споживачів природний режим споживання (без ВДЕ) характеризується наявністю трендової лінії та випадкових відхилень від неї (флуктуацій поточної потужності). При цьому спостерігається відмінність між середньодобовими рівнями, а розподіл відхилень середньодобових значень відносно місячного тренду має нормальний характер [5]. Поточну потужність можна представити у вигляді

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

де $\omega(t)$ – осереднене значення для заданого сезону (трендова крива);

σ^* – стандартне відхилення середньодобових значень;

ε – стандартна нормально розподілена випадкова величина.

$U(t)$ – стохастичний процес, що відображає флуктуації потужності.



Складова $\omega(t)$ може розглядатись як плановий графік генерації, з уточненням $\sigma^* \varepsilon$ як поправкою на прогноз середньодобового значення. Для визначення параметрів представлення випадкового процесу $U(t)$ застосовуються набори фактичних значень, зафіксованих протягом тривалого часу, достатнього для статистично стійких результатів. Цей процес описує відхилення від прогнозованого на наступну добу рівня (варіант прогнозування), або про відхилення від традиційного для даної пори року (чи місяця) режиму споживання, тобто варіант роботи без поточного прогнозування. При цьому прогноз середньодобових значень на практиці є досить точним [6, 7] (погодинний прогноз наразі не розглядається). Осереднені дані про потужність ВДЕ також можна вважати добре прогнозованими, а результуючі відхилення від графіка навантаження, складеного з урахуванням ВДЕ, вважати поточними небалансами потужності для конкретної доби:

$$p_i = (a_i - a_{i0}) - [(w_i - w_{i0}) + (s_s - s_{i0})], \quad (2)$$

де a_x – рівень споживання електроенергії;

w_x та s_x – потужності ВЕС та СЕС відповідно;

i – індекс часу (в наведених нижче прикладах крок по часу 30 хв.).

Показники з 0-індексом – осереднені на певну годину дня (добовий хід), зокрема a_{i0} має відповідати плановому графіку споживання.

Переходячи до кумулятивних обсягів потужності, що розглядаються як незбалансована енергія (з урахуванням часових інтервалів), розглянемо імовірність накопичення та використання певних обсягів енергії. Спочатку розглянемо варіант щоденного прогнозування, коли добовий баланс зводиться з нульовим підсумком (добова циклічність). Приклади зміни кумулятивного небалансу енергії для трьох послідовно взятих днів січня (споживач М1) зображено на рис.1. Очевидно, середні рівні небалансу енергії для різних днів можуть мати різні знаки, залежно від послідовності значень небалансу потужності. Так, 21-го спочатку спостерігався дефіцит генерації, компенсований до кінця доби (середній баланс негативний), 23-го – спочатку був надлишок (позитивний баланс), а 22-го режим споживання був близьким до графіка.

На рис. 2 зображено послідовність середньодобових небалансів енергії впродовж місяця, яка виглядає як випадкова величина.

Розподіл поточних значень кумулятивного небалансу енергії (за умови добової циклічності) зображено на рис.3. Розподіл близький до нормального.

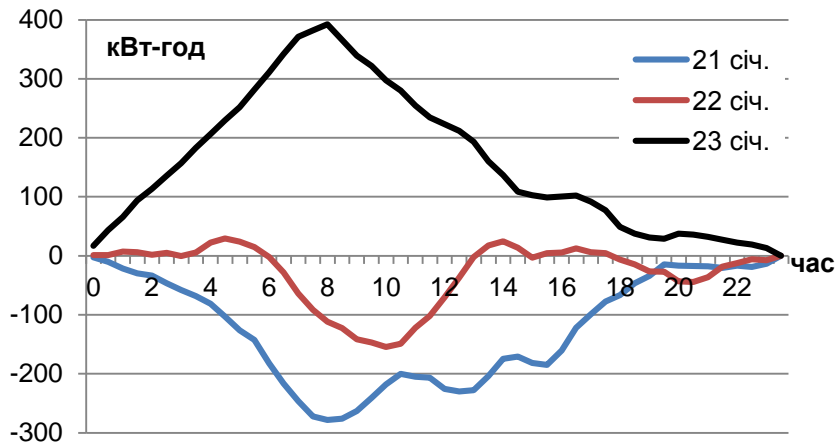


Рис. 1. Небаланси енергії навантаження протягом доби

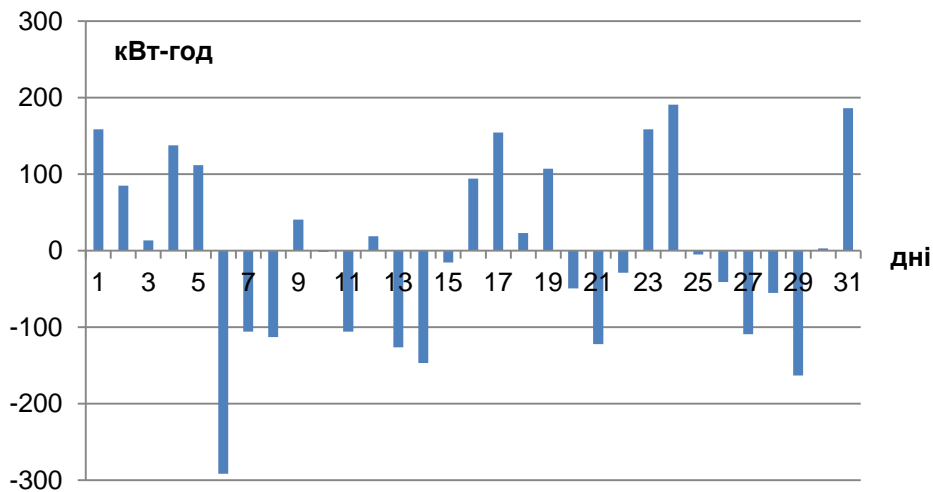


Рис. 2. Середньодобові небаланси енергії (М1, січень)

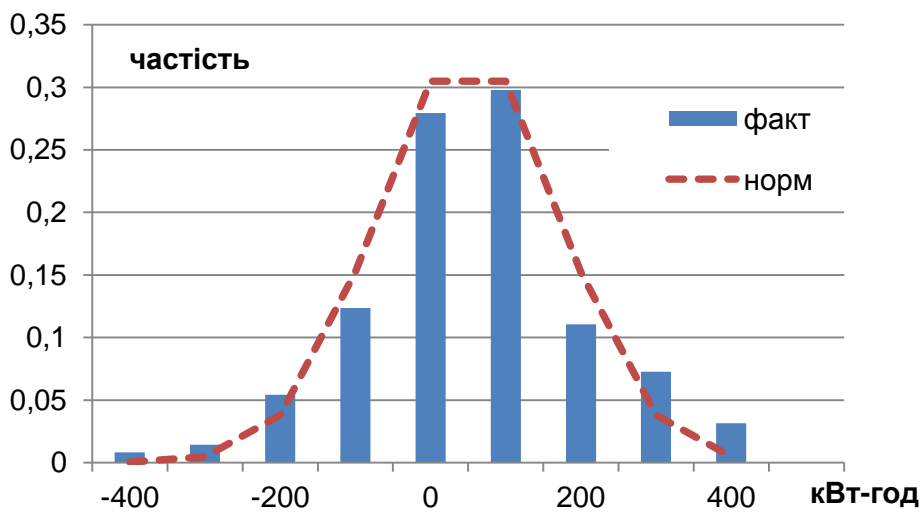


Рис. 3. Розподіл кумулятивного небалансу енергії (М1, січень)

За умови відсутності поточного прогнозування графік роботи енергосистеми базується на багаторічних статистичних даних,

приведених до середньомісячних показників. Отже, плановий графік споживання має відповідати місячним значенням, відповідно отримаємо місячну циклічність небалансів потужності та енергії. Режим балансування енергії для даних за січень зображено на рис.4.

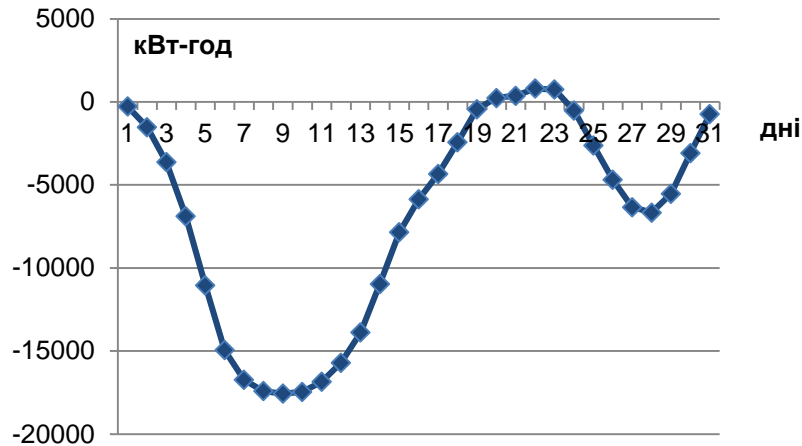


Рис. 4. Кумулятивний небаланс енергії без добового прогнозу (M1)

В даному прикладі на початку місяця спостерігався дефіцит потужності відносно середньомісячних значень, який потім було компенсовано зменшенням навантаження у другій декаді. Гістограму поточних рівнів кумулятивного небалансу енергії для варіанту без прогнозу (місячна циклічність) зображено на рис.5.

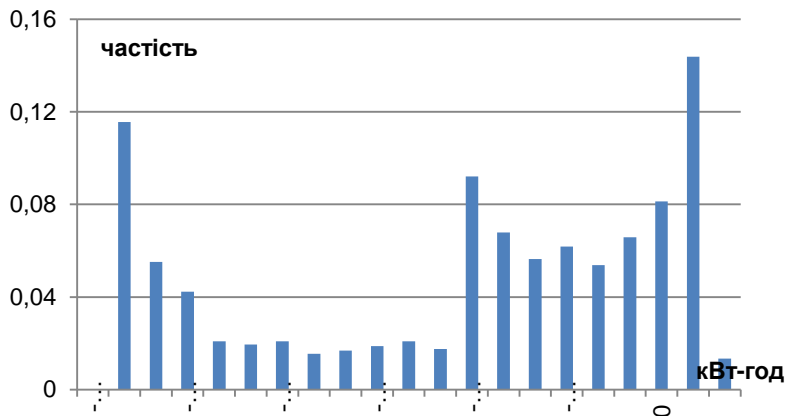


Рис. 5. Розподіл кумулятивного небалансу без добового прогнозу (M1)

Розподіл в даному випадку несиметричний, відмінний від нормального і скоріше нагадує «білий шум», хоча помітно значні відхилення від середнього значення. При рівномірному розподілі СКВ мало б становити 5500, а по факту маємо 9300 (кВт-год).

Для даних за липень характер гістограми розподілу аналогічний зимовому; при рівномірному розподілі СКВ мало б становити 3720 (кВт-год), а по факту маємо 3790. Для літнього місяця кумулятивний небаланс мав переважно позитивні значення (надлишкову генерацію), тобто ситуація протилежна зимовій. Насправді це лише відмінності між першою та другою половинами місяця, тобто знак кумулятивного небалансу залежить від точки відліку. Якщо порівняти синхронний хід накопичення незбалансованої енергії різними розташованими поряд споживачами, наприклад М1 та Т1-4, він може суттєво різнитися – в одному випадку баланс є переважно від'ємним, в іншому додатним, тобто випадковим чином залежить від початку відліку. Натомість характер розподілу для різних випадків схожий, і подібний до рівномірного.

Якщо порівняти характер накопичення незбалансованої енергії при наявності ВДЕ при синхронному порівнянні погодних умов, то діапазон імовірних значень зміщується. При складанні випадкових процесів як набору випадкових величин дисперсія суми визначається як сума окремих складових [8]

$$\sigma_{\Sigma}^2 = D(p_{ij}) = D(a_{ij}) + D(w_{ij}) + D(s_{ij}) + 2[\text{cov}(a, w) + \text{cov}(a, s) + \text{cov}(w, s)]. \quad (3)$$

Зазначимо, що кореляція значень потужності споживання та генерації ВДЕ досить незначна [4]. Короткотермінові флуктуації в загальному випадку можна вважати незалежними, тобто $\text{cov}(x, y) = 0$. При відомих СКВ для споживання (σ_0) вітрової (σ_w) та сонячної (σ_s) складових сумарне СКВ (σ_{Σ}) небалансу поточної потужності: $\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_w^2 + \sigma_s^2$. Для визначення параметрів сумарного випадкового процесу p_i (2) при різних рівнях впровадження ВДЕ скористаємось значеннями розрахункової потужності відповідно до погодних умов.

Дисперсія небалансу енергії повинна враховувати інтервал часу Δt , на якому визначено середній небаланс потужності, та тривалість T загального часу накопичення, де $T = n \cdot \Delta t$. Для розрахунку дисперсії кумулятивних значень небалансу потужності, тобто накопичення енергії, можна скористатися залежностями [9]:

$$D_E = \sigma_K^2 \approx \left(\frac{\sigma_0^2}{(1-\alpha)^2} + \frac{n\eta^2}{2(1-\alpha^2)} \right) (\Delta t)^2. \quad (4)$$

де параметри α , η характеризують випадковий процес небалансу:

$$p_i = \alpha p_{i-1} + \eta \varepsilon_i. \quad (5)$$

Тут процес (5), що описує поточні відхилення від прогнозованого значення, розглядається як дискретна модель блукання, в якому поточні значення знаходяться в певному коридорі відносно середнього. Константа α може розглядатися як параметр авторегресії, а η – СКВ похибок [10]; вони розраховуються за значеннями σ_0 та σ_s . Застосовуються набори даних, зафіксованих протягом тривалого часу, достатнього для отримання статистично стійких результатів.

При моделюванні місячного обсягу кумулятивної енергії окремі дні можна розглядати як незалежні реалізації процесу. Якщо при цьому робити добавку міждобових відхилень (адитивну складову кожної доби), то це може розглядатися як перехід від прогнозованого накопичення (добової циклічності) до непрогнозованого – тобто з урахуванням міждобових варіацій. Результируюча дисперсія буде рівна сумі добових, характер розподілу при складанні не грає ролі.

Запропонована математична модель дозволяє розрахувати параметри дисперсії небалансів поточної потужності та накопиченого небалансу енергії, що в межах прийнятих гіпотез про характер розподілу цих випадкових величин дає можливість визначити їх максимальні з заданою імовірністю значення, довірчі інтервали небалансів, тощо. Такі розрахунки потрібні як для визначення індексів надійності енергосистеми та очікуваних втрат енергії й споживання, так і для оптимального вибору систем акумулювання енергії. При виборі акумуляторів їх номінальна потужність може оцінюватися за величиною $k_\gamma\sigma_\Sigma$, а ємність – $k_\gamma\sigma_K$, де k_γ – квантиль порядку γ , тобто $Prob\{p_i < k_\gamma\sigma\} = \gamma$.

Розглянемо приклади вибору акумуляторів за різних умов роботи енергосистеми. Нехай традиційне споживання має параметри $\sigma_0=35$ кВт, $\sigma_K=152$ кВт-год (споживач М1, місяць січень), прогнозування щоденне. Для довірчої імовірності $\gamma=0,9$ при нормальному розподілі маємо $|k|_{0,9} = k_{0,95} = 1,65$. Отже, гарантоване з імовірністю не нижче 90% збереження надлишкової енергії для забезпечення нульового балансу потужності потребує ефективної ємності акумулювання 250 кВт-год та потужності 58 кВт.

При наявності ВДЕ, наприклад, при наявності 200 кВт ВЕС та такої ж СЕС матимемо $\sigma_\Sigma=55$ кВт, $\sigma_K=244$ кВт-год. Тоді за тої ж довірчої імовірності $\gamma=0,9$ матимемо потребу в ефективній ємності акумулювання 400 кВт-год та потужності 90 кВт. Отже, додаткова потреба в потужності акумулювання складе 32 кВт, або 8% від потужності ВДЕ.



Висновки. За відомими показниками мінливості процесів споживання та генерації електроенергії, отриманими з оцінки статистичних даних, можна підібрати характеристики акумулювання для енергозабезпечення з заданою імовірністю. Пропонована схема дозволяє оцінити порядок величин, їх взаємозалежність, та порівнювати варіанти побудови енергосистеми при різних рівнях її локалізації. Модель небалансу може бути отримана статистичним аналізом даних щодо конкретного споживача та відповідних природних факторів. Важливим фактором є також можливість прогнозування поточного споживання електроенергії і інтенсивності вітрової й сонячної енергії. Так, наявність прогнозу хоча б середньодобового рівня потужностей дозволяє в півтора рази збільшити обсяг впровадженої відновлюваної енергії при збереженні стабільності енергопостачання.

Список використаних джерел

1. Кузнецов Н. П., Лысенко О. В. Вероятностные аспекты использования возобновляемых источников энергии на пустующих и непригодных для сельского хозяйства территориях. *Topical researches of the World Science: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference (June 28, 2017, Dubai, UAE)*. С. 45-51.
2. Olsson M., Perninge M., Soder L. Modeling real-time balancing power demands in wind power systems using stochastic differential equations. *Electric Power Systems Research*. 2010. № 80. Р. 966-974.
3. Кузнецов Н. П. Оценка влияния ВЭС на размер резервных мощностей энергосистемы. *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 15. С. 50-54.
4. Лисенко О. В. Оцінка випадкових властивостей рівнів споживання електроенергії. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 1. С. 26-35.
5. Кузнецов М. П. Побудова математичної моделі режиму споживання електроенергії. *Відновлювана енергетика*. 2017. № 4. С. 33-42.
6. Кузнецов М. П., Лисенко О. В. Возможности короткотерминового прогнозування сонячної енергії. *Відновлювана енергетика*. 2017. № 1. С. 25-32.
7. Кузнецов М. П. Особливості короткотерминового прогнозування потужності ВЕС. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 27-29 вересня 2017)*. Київ, 2017. С. 497-500.



8. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. Москва: Academia, 2003. 576 с.

9. *Kuznietsov M., Vyshnevskaya Y., Brazhnyk I., Melnyk O.* Modeling of the Generation-Consumption Imbalance in the Heterogeneous Energy Systems with Renewable Energy Sources. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*. Kyiv, 2019. P. 196-200.

10. *Миллер Б. М., Панков А. Р.* Теория случайных процессов в примерах и задачах. Москва: Физматлит, 2002. 320 с.

ХАРАКТЕР БАЛАНСИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ В ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Кузнецов Н. П., Лысенко О. В.

Аннотация - целью работы является решение задачи комплексного обеспечения электрической энергией с использованием изменчивых возобновляемых источников энергии. Предметом исследования являются локальные энергосистемы регионального или муниципального уровня, содержащие группы потребителей и дополнительные источники рассредоточенной генерации на базе ветровых или солнечных электростанций. Для эффективного использования потенциала возобновляемой энергии нужен учет динамических свойств характера потребления энергии, случайной природы поступления ветровой и солнечной энергии. Одним из путей повышения надежности энергообеспечения и более полного использования генерируемой энергии является применение систем аккумуляирования. Для оценки возможностей накопления энергии и дальнейшего ее использования предложена модель энергетического баланса в форме суперпозиции случайных процессов. Параметры математической модели определяются на основе статистического анализа синхронных данных о режиме потребления конкретным потребителем и погодных факторов, определяющих доступную мощность возобновляемых источников. Принято, что график поставки энергии составляется на основании прогноза потребления электроэнергии и погодных факторов. Изучаются отклонения текущей генерации от прогнозируемых потребностей; считаются хорошо прогнозируемыми среднесуточные показатели, а при их отсутствии за основу принимаются ретроспективные данные за продолжительное время. Установлена их связь с точностью прогноза и вариативностью случайных процессов генерации и потребления энергии. При этом отмечено, что текущие флуктуации потребления и генерации на коротких временных интервалах практически независимы. По известным показателям изменчивости процессов потребления и генерации электроэнергии можно подобрать характеристики аккумуляирования, такие как достижимая мощность и емкость, для надежного энергообеспечения с заданной вероятностью.

Ключевые слова: локальная энергосистема, возобновляемая энергия, баланс мощности, случайный процесс, аккумуляирование энергии.



FEATURES OF POWER BALANCING IN THE LOCAL ENERGY SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

N. Kuznetsov, O. Lysenko

Summary

The aim of the work is to consider the problem of the complex electricity supply with using of changeable renewable energy sources. Local energy systems of a regional or municipal level is the subject of this research, containing consumer groups and additional sources of dispersed generation based on wind or solar power. To effectively use the potential of renewable energy, we need to take into account the dynamic properties of energy consumption, the random nature of the wind and solar energy. One of the ways to improve the reliability of energy supply and more fully utilize of the generated energy is to use the storage systems. To assess the possibilities of energy storage and its further use, a model of energy balance in the form of a superposition of random processes is proposed. The parameters of a mathematical model are determined on the basis of a statistical analysis of synchronous data about the mode of consumption by a specific consumer and weather factors that determine the available power of renewable sources. It is accepted that the energy supply schedule is compiled based on the forecast of electricity consumption and weather factors. Current generation deviations from projected needs are examined; average daily indicators are considered to be well predicted, and in their absence, retrospective data for a long time are taken as a basis. Their connection with the forecast accuracy and variability of random processes of energy generation and consumption has been established. It was noted that the current fluctuations in consumption and generation over short time intervals are practically independent. According to the known indicators of the variability of the electricity consumption and generation processes it is possible to choose the characteristics of accumulation, such as achievable power and capacity, for reliable energy supply with a given probability.

Keywords: local power system, renewable energy, power balance, random process, energy storage.