

УДК 621.311

С.О.Ужейко (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### Способи відображення показників вітрової та сонячної енергії

*Аналіз впливу відновлюваної енергетики на роботу енергосистем потребує коректного представлення даних та побудови адекватних аналітичних моделей. Важливу роль при виборі моделей грає особистий досвід дослідників і проектувальників та повнота розуміння процесів генерування енергії, які носять випадковий характер. Графічне представлення даних та візуалізація режимів роботи дозволяють краще уявити особливості використання вітрової та сонячної енергії для прийняття вірних рішень щодо конфігурації енергосистем на базі відновлюваних джерел енергії. Зручним інструментом для обробки наявних вхідних даних та графічного відображення статистичних залежностей є створення спеціального веб-додатку. Бібл. 13, рис. 8.*

**Ключові слова:** локальна енергосистема, вітроелектростанція, сонячна електростанція, математична модель, візуалізація, веб-додаток.

ORCID: 0000-0002-2789-8055

**Вступ.** Впровадження відновлюваної енергетики, зокрема використання вітрової та сонячної енергії, є одним із головних трендів сучасного суспільного розвитку, від якого важко залишатися осторонь в умовах України [1].

При проектуванні енергетичних об'єктів необхідно враховувати характерні особливості, притаманні цим відновлюваним джерелам енергії (ВДЕ), зокрема змінний режим надходження енергії, залежний від погодних умов. Можна виділити дві характерні форми використання – будівництво потужних електростанцій промислового типу та спорудження невеликих об'єктів (локальних енергосистем) індивідуального чи групового використання. Особливо бурхливого розвитку в Україні останнім часом набуло спорудження невеликих приватних сонячних (фотоелектричних) станцій, сотні яких будуються в останні роки [2]. При цьому проектування великих об'єктів вимагатиме особливої уваги до можливого їх впливу на стан об'єднаної (чи регіональної) енергосистеми [3]. Для локальних систем важливішим видається оцінка надійності енергозабезпечення та визначення оптимальної конфігурації такої системи [4] (співвідношення потужностей об'єктів вітрової, сонячної енергії та інших джерел, вибір системи акумуляування енергії тощо).

З точки зору користувача енергії процес її надходження виглядає як випадковий, обмежено

прогнозований. Точність прогнозу та його часова достовірність є також змінними величинами, які можна оцінити лише з певною імовірністю [5]. Тому при аналізі очікуваної продуктивності енергетичних об'єктів значна роль відводиться досвіду проектувальників, умінню оцінити ступінь похибок (а отже, імовірних ризиків) та вибрати належну аналітичну модель процесу надходження енергії [6]. Отже, окрім усталених методичних розробок, людський фактор також відіграє певну роль при прийнятті конкретних технічних рішень. І тут набуває ваги спосіб подання інформації про енергетичний потенціал, зокрема щодо збору, накопичення, статистичної обробки та представлення даних. Візуалізація цих даних здатна полегшити вибір математичної моделі та сприяти її адекватності.

#### **Математичне моделювання об'єктів ВДЕ.**

Аналіз початкових даних, як правило, здійснюється за такими показниками, як середні значення (математичні сподівання), максимальні та осереднені відхилення (дисперсії), допустимі зміни за одиницю часу, характер розподілу імовірності певних значень. При цьому до уваги беруться дані з різним часом усереднення – помісячні, середньодобові, поточні (або осереднені в хвилинних масштабах). За результатами багатьох досліджень для вітрових станцій осереднена крива може не мати вираженого добового ходу, що ро-

бить допустимим гіпотезу про постійність упродовж доби осередненої за місяць швидкості [7]. На рис. 1 в якості прикладу зображено дані 2016 року, отримані біля м. Мелітополь на висоті 94 м. Розподіл швидкості вітру як випадкової величини в загальному випадку не є нормальним, хоча може бути близьким до нього (рис. 2); загальноживаним 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. Наявність гра-

фічного представлення полегшує досягнення таких висновків і робить їх більш наочними.

Приклад представлення реального розподілу швидкості вітру різними моделями [8] зображено на рис. 2.

Приклад графічного зображення масиву даних щодо поточної потужності енергосистеми, що містить ВЕС [9], зображено на рис. 3. Тут прийнято гіпотезу постійності для добового ходу потужності ВЕС та відображено розмах коливань відносно середніх значень.

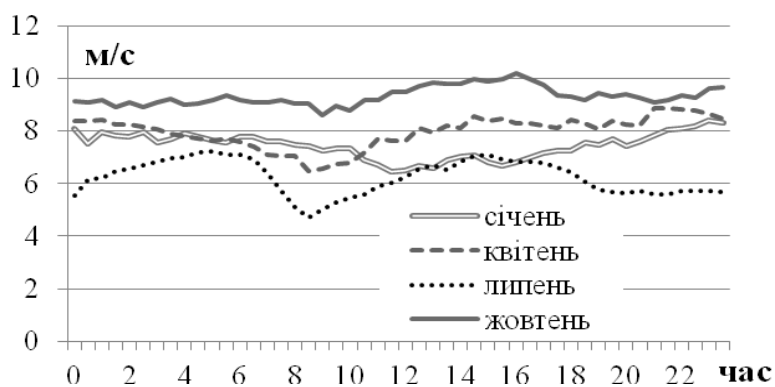


Рис. 1. Добовий хід швидкості вітру (інтервал 30 хв).

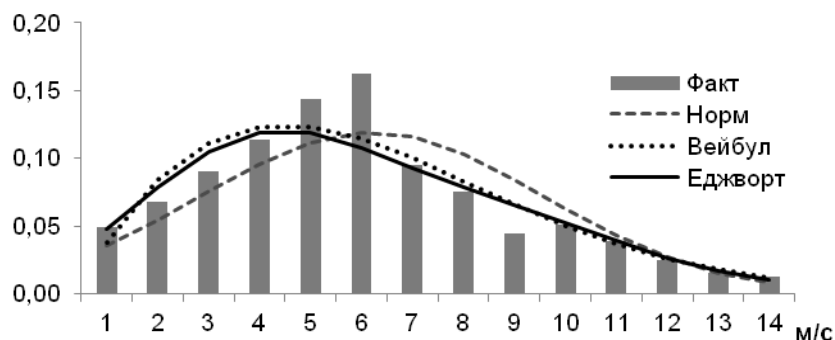


Рис. 2. Гістограма розподілу швидкості вітру та різні моделі її апроксимації.

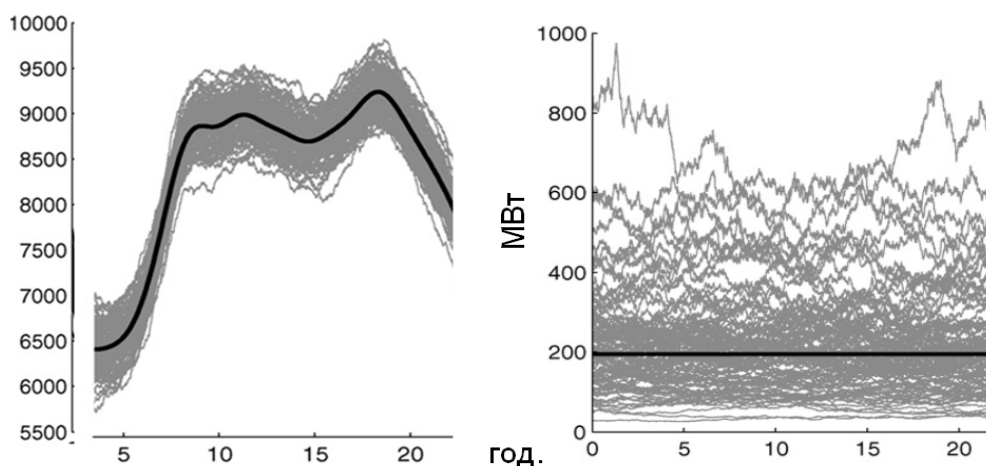


Рис. 3. Візуалізація погодинної потужності всієї енергосистеми (зліва) та ВЕС (справа).

Для стабільної роботи електричної мережі показовим є темп зміни генеруючої потужності, стійкість, оптимальність режимів роботи [10]. Отже, важливою характеристикою вітрового режиму є його поривчастість, в даному випадку темп зміни швидкості вітру за короткий часовий проміжок. Сонячна енергія також характерна різкими змінами рівня радіації. Сумісна робота вітрової та фотоелектричної станцій може дещо згладити їх природну нестабільність. Математична модель,

що описує сумісну роботу ВЕС та СЕС в однакових параметрах і з часовим кроком 10-15 хв, наведена зокрема в [11]. Імовірнісна природа флуктуацій енергії, генерованої цими станціями, потребує спеціального дослідження [3]. Зокрема, гістограми стрибків потужності дають наочне уявлення як про розмах, так і про частість таких флуктуацій. Графічне порівняння фактичного, нормального та коригованого розподілів відхилень потужності від середнього значення наведено на рис. 4.

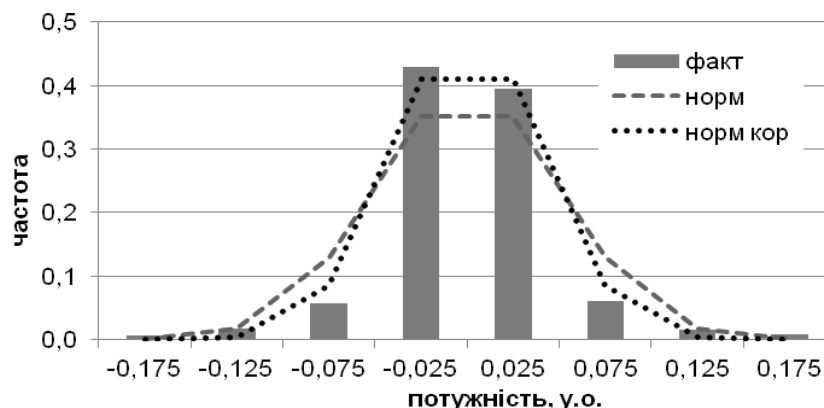


Рис. 4. Гістограма стрибків потужності ВЕУ та її апроксимація.

Моделювання рівнів сонячної радіації, як і потужності вітру, здійснюється за такими показниками, як середні значення (математичні сподівання), дисперсії, відхилення від середнього за одиницю часу, характер розподілу імовірності певних значень. При цьому до уваги беруться дані з різним часом усереднення. Визначальними є емпіричні значення, характерні для певного сезону та місцевості, рівень інсоляції упродовж доби як функція часу. Характер випадкових коливань сонячної радіації, спричинених змінною хмарністю, досліджувався рядом авторів, однак усталеного висновку щодо розподілу імовірності нема. Так, у роботі [12] стверджується, що розподіл імовірності рівня сонячної радіації відрізняється від нормального. Автори перевіряли на придатність такі розподіли, як експоненційний, Вейбула, логнормальний, геометричний, гама- та бета-розподіли. Вимірювалися пряме та розсіяне випромінювання. За рівнем середньоквадратичної похибки, яку дає застосування вказаних розподілів порівняно з фактичними даними, в різні місяці кращі результати забезпечували різні розподіли, проте помітної переваги жоден з них не

отримав. Приклади моделювання сонячної радіації наведено зокрема в роботі [6]. Графічне представлення різних моделей розподілу в порівнянні з реальною гістограмою дозволяє зробити попередні висновки щодо їх адекватності, оскільки цифрових показників точності моделювання є декілька і вони можуть бути суперечливими.

Отже, досліджувані показники вітрового режиму та рівня інсоляції дозволяють точніше спрогнозувати роботу ВДЕ в певному регіоні та її вплив на характер постачання електроенергії при роботі у складі об'єднаної чи локальної енергосистеми. При цьому перелік досліджених параметрів не є вичерпним, потреба в дослідженнях визначається особливостями роботи енергосистеми як у частині генерування, так і споживання електроенергії.

Розглянуті характеристики поведінки потужностей електростанцій на базі сонячної та вітрової енергії, отримані з фактичних метеоданих, надалі можуть бути використані як тестові при розробці математичної моделі роботи сумісної вітро-сонячної станції. Така модель необхідна для оптимального вибору розмірів генеруючих та

акумулюючих потужностей відповідно до режимів споживання енергії, для розрахунку показників надійності забезпечення енергією тощо.

Математична модель миттєвої потужності ВЕС розглянута зокрема в роботі [13]. 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. Математична модель поточного рівня сонячної радіації як випадкового процесу, змінного в часі упродовж доби, запропонована зокрема в роботі [6]. Вибір конкретної моделі та оцінка її адекватності базуються в тому числі і на візуальному представленні даних, що є важливою складовою аналізу. Таке представлення має базуватися на значному обсязі статистичних метеорологічних та інших даних і давати можливість розглядати та аналізувати різні обсяги та вибірки початкових даних, їх агрегування та статистичну обробку.

#### Створення веб-застосунку для обробки статистичних даних.

В останні роки в сфері інформаційних технологій все більшу перевагу лідери ринку та просто розробники програмного забезпечення надають веб-застосункам, або веб-додаткам. В загальному вигляді веб-застосунок – це клієнтська програма, що дає змогу вирішувати прикладні задачі користувача. На відміну від звичайного застосунку, зазвичай містить серверну частину, що виконується на віддаленому веб-сервері, і клієнтську

частину, що виконується у браузері безпосередньо на пристрої користувача. Головною перевагою такого застосунку є те, що він не залежить від конкретної операційної системи користувача, версії встановленого програмного забезпечення, драйверів та інших бібліотек, а також може виконуватись не лише на персональних комп'ютерах, а й на планшетних комп'ютерах, смартфонах тощо. Це робить веб-застосунки максимально доступними з будь-яких пристроїв, легкими для запуску, швидкими в роботі, оскільки за оптимізацію в більшій мірі відповідає саме браузер, розвиток і підтримка яких знаходиться на високому рівні.

Саме тому був створений веб-додаток, призначений для обробки статистичних даних по сонячній радіації, збережених у текстовому вигляді або у форматі *Microsoft Excel*. Функціонал додатку можна гнучко змінювати для отримання інших залежностей або розрахунків потенціального рівня генерації фотоелектричного модуля, встановленого в заданих географічних координатах.

На даний момент додаток дозволяє відобразити в графічному вигляді наступні залежності.

1. Рівень сонячної радіації протягом дня для будь-якого числа будь-якого місяця, для якого існують статистичні дані. В даному прикладі розглянуто дані, що презентують всі сезони року (для січня, квітня, липня та жовтня 2016 р.). На рис. 5 зображено приклад графічного представлення. Вздовж горизонтальної осі  $X$  показаний час доби, а вздовж вертикальної осі  $Y$  – рівень радіації у  $Вт/м^2$ .

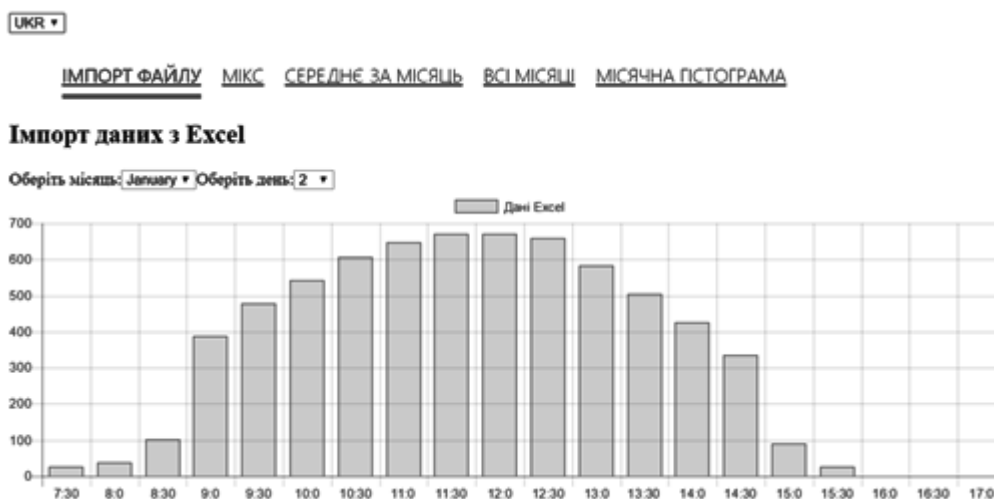


Рис. 5. Графічне представлення сонячної радіації для 2 січня.

2. Середньомісячний рівень інсоляції для обраного місяця. Значення осей аналогічні рис. 5.

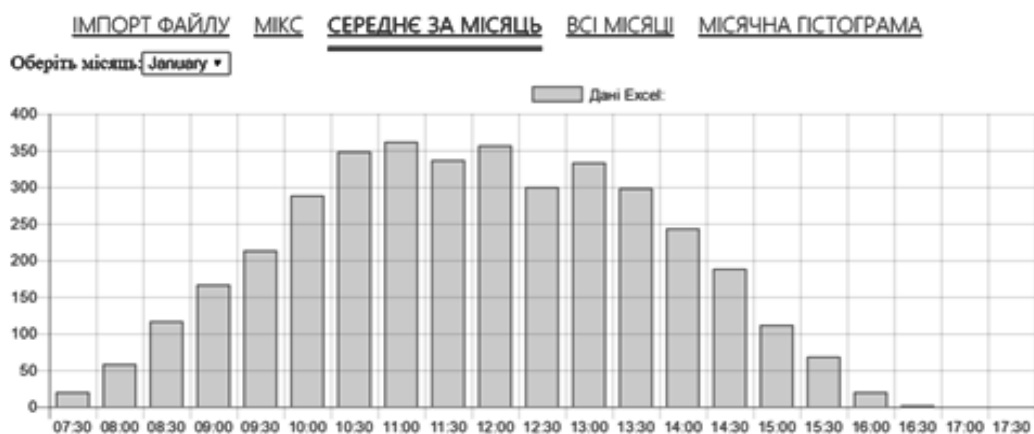


Рис. 6. Графічне представлення осередненої сонячної радіації для січня.

Як видно з рис. 6, із таких графіків можна отримати середнє значення, яке може бути корисним для довгострокового прогнозування рівня сонячної радіації або рівня виробітку СЕС. Це значення буде враховувати погодні умови для кожного конкретного місяця.

3. Графічні дані у вигляді стовпчастої діаграми або гістограми, які показують кількість замірів протягом обраного місяця і значення яких вписуються в обмеження, показані вздовж осі X, у Вт/м<sup>2</sup>. Вздовж осі Y показана кількість таких замірів.

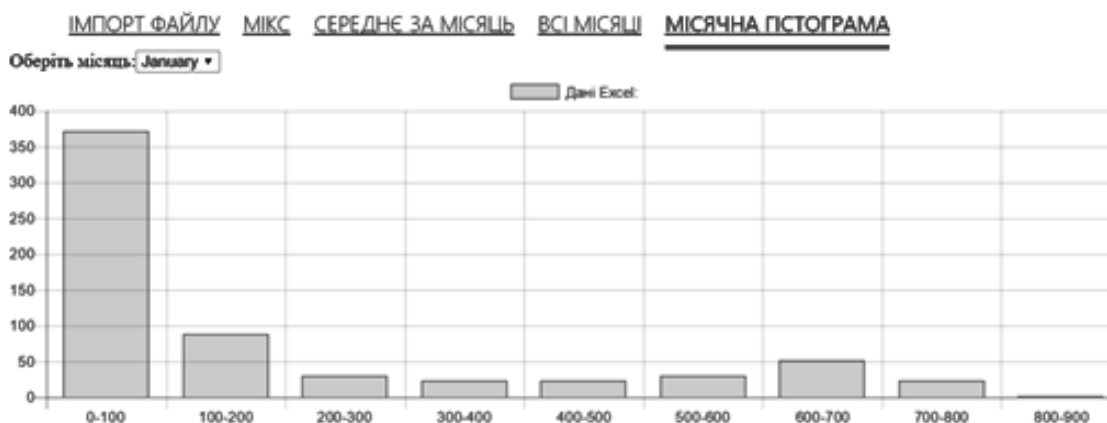


Рис. 7. Гістограма частоти певного рівня сонячної радіації протягом січня.

З показаної залежності можна зробити висновки про кількість відрізків часу, коли СЕС працює в режимі максимального виробітку, а також у будь-якому іншому режимі, виходячи з частоти попадання у певний діапазон інсоляції. Видно, що у січні рівень інсоляції майже ніколи не перевищує 800 Вт/м<sup>2</sup>, а найбільша кількість вимірів припадає на рівень до 100 Вт/м<sup>2</sup>. У квітні розподілення за відрізками найбільш рівномірне, а сам максимум (більше 900 Вт/м<sup>2</sup>) досить тривалий. У липні кількість вимірів з рівнями більше 900 Вт/м<sup>2</sup> найбільша, відповідно і тривалість ро-

боти СЕС у режимі максимального виробітку найбільша. У жовтні ситуація подібна до квітня, але набагато менша кількість відрізків з максимальним рівнем радіації.

4. Зведений графік середнього значення сонячної радіації за кожен місяць в одній системі координат. Вздовж осі X показаний час протягом дня, а вздовж осі Y – рівень радіації у Вт/м<sup>2</sup>. Оскільки у веб-додатку є можливість зміни мови інтерфейсу з української на англійську, на рис. 8 зображено приклад англійського інтерфейсу.

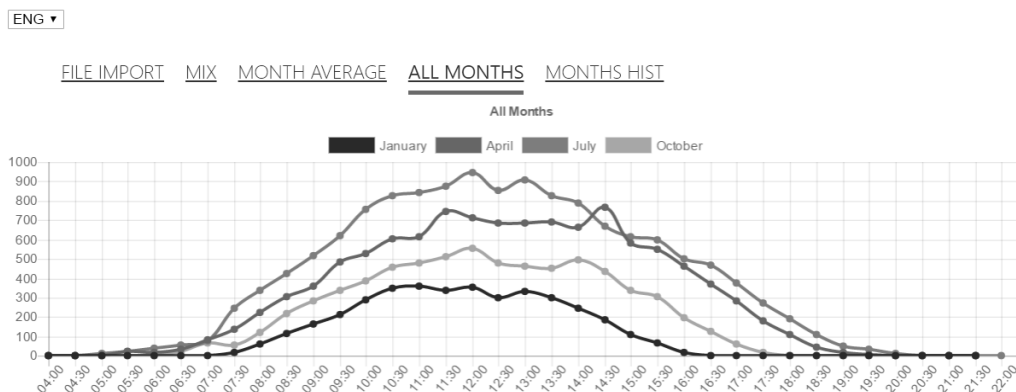


Рис. 8. Графічне представлення осередненої сонячної радіації для різних місяців.

При достатній кількості статистичної інформації такий графік може дати уяву про зміну рівня сонячної радіації або виробітку СЕС протягом року з урахуванням погодних умов, а також граничні значення виробітку енергії.

**Висновки.** Графічне представлення та візуалізація даних є важливим інструментом аналізу роботи відновлюваних джерел енергії, що мають випадкову природу. Створений веб-додаток, як метод представлення даних, на даний момент є фундаментом, який дозволяє графічно відобразити необхідні статистичні залежності стосовно рівня інсоляції відповідно до вхідних статистичних даних. У майбутньому функціонал може значно розширюватись відповідно до вимог, враховувати технічні параметри обладнання для прогнозування рівня виробітку електроенергії, а також враховувати існуючу інформацію для створення коротко- та довгострокових прогнозів роботи фотоелектричних станцій. Також можлива комбінація з обробкою статистичних даних як сонячної радіації, так і швидкості вітру, для симуляції гібридних сонячно-вітрових станцій.

1. *Вітроенергетичний сектор України 2016*. Огляд ринку [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://uwea.com.ua>.

2. *Відновлювана енергетика* [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://saee.gov.ua>.

3. Кузнєцов М.П., Ужєйко С.О. Імовірнісні аспекти використання відновлюваних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС // *Відновлювана енергетика* – 2016, №3. – С. 6–12.

4. Кузнєцов М.П. Особливості оптимізації гібридних енергосистем. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енер-

гоефективність у XXI столітті". 29-30 вересня 2016 року, м. Київ: 2016. С. 102–107.

5. Кузнєцов М.П., Лисенко О.В. Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії // *Відновлювана енергетика*. – 2017, №1. – С. 25–32.

6. Кузнєцов М.М. Моделювання спільної роботи вітрової та сонячної електростанцій // *Відновлювана енергетика*. – 2016, № 1. – С. 12–16.

7. M.Olsson, M.Perninge, L.Soder. Modeling real-time balancing power demands in wind power systems using stochastic differential equations // *Electric power systems research*. – 2010. – No.80. – P. 966–974.

8. Кузнєцов М.П. Застосування нормального розподілу до опису швидкості вітру // *Відновлювана енергетика*. – 2013, №2. – С. 53–58.

9. Кузнєцов М.П. Стохастичні моделі роботи енергосистеми, яка містить вітрові електростанції // *Відновлювана енергетика*. – 2012. – № 1. – С.34–41.

10. Ужєйко С.О. Особливості впливу відновлюваних джерел енергії на електричну мережу. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті". 29-30 вересня 2016 року, м. Київ: 2016. С. 163–167.

11. Кузнєцов М.П. Деякі особливості автономної роботи вітрової та сонячної електростанцій // *Відновлювана енергетика* – 2016, №2. – С.15–21.

12. Y.D.Arthur, K.B.Gyamfi, S.K.Appiah. Probability Distributional Analysis of Hourly Solar Irradiation in Kumasi-Ghana. *International Journal of Business and Social Research (IJBSR)*, 2013, No.3. – P. 63–75.

13. Кузнєцов Н.П. Математическое моделирование работы ветровых электростанций // М.: Альтернативная энергетика и экология. – 2013, № 3. – С.79–83.

#### REFERENCE

1. Wind energy in Ukraine 2016. Market review. Electronic resource: <http://uwea.com.ua>.

2. Renewable energy. Electronic resource: <http://saee.gov.ua>.

3. M.Kuznietsov, S.Uzheiko. Probabilistic aspects of renewable energy using in the Chernobyl Zone // *Kyiv, Ukrainian: Renewable Energy*. – 2016, No.3. – P.6-12.

4. M.Kuznietsov. Features to optimize hybrid power systems. Materials of XVII International Scientific Conference "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century". 2016, Kyiv. – P.102-107.

5. M.Kuznietsov, O.Lysenko. Capabilities of short-term forecasting of solar energy // Kyiv, Ukrainian: Renewable Energy. – 2017, No.1. – P.25-32.

6. M.Kuznietsov. Modeling of the wind and solar power common work. – 2016, № 1. – P.12-16.

7. M.Olsson. Modeling real-time balancing power demands in wind power systems using stochastic differential equations / M.Olsson, M.Perninge, L.Soder // Electric power systems research. – 2010. – No.80. – P. 966–974.

8. M.Kuznietsov. Application of normal distribution to describe the wind speed // Kyiv, Ukrainian: Renewable Energy. – 2013, No.2. – P.53-58.

9. M.Kuznietsov. Stochastic models of power system containing wind farms // Kyiv, Ukrainian: Renewable Energy. – 2012, No.1. – P.34-41.

10. S.Uzheiko. Features of the impact of renewable energy on the electrical grid. Materials of XVII International Scientific Conference "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century". 2016, Kyiv. – P.163-167.

11. M.Kuznietsov. Some features of autonomous work of wind and solar power stations // Kyiv, Ukrainian: Renewable Energy. – 2016, No.2. – P.15-21.

12. Y.D.Arthur, K.B.Gyamfi, S.K.Appiah. Probability Distributional Analysis of Hourly Solar Irradiation in Kumasi-Ghana. International Journal of Business and Social Research (IJBSR), 2013, No.3. – P.63-75.

13. M.Kuznietsov. Mathematical modeling of wind farms capacity // Moscow: Alternative Energy and Ecology. – 2013, No.3. – P.79-83.

**С.О.Ужейко** (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

### Способы отображения показателей ветровой и солнечной энергии

*Анализ влияния возобновляемой энергетики на работу энергосистем требует корректного представления данных и построения адекватных аналитических моделей. Важную роль при выборе моделей играет личный опыт исследователей и проектировщиков, и полнота понимания процессов генерации энергии, которые носят случайный характер. Графическое представление данных и визуализация режимов работы позволяют лучше представить особенности использования ветровой и солнечной энергии для принятия верных решений по конфигурации энергосистем на базе возобновляемых источников энергии. Удобным инструментом для обработки имеющихся входных данных и графического отображения статистических зависимостей является создание специального веб-приложения. Библ. 13, рис. 8.*

**Ключевые слова:** локальная энергосистема, ветроэлектростанция, солнечная электростанция, математическая модель, визуализация, веб-приложение.

*станция, солнечная электростанция, математическая модель, визуализация, веб-приложение.*

**Uzheyko S.** (Institute of renewable energy, NAS, Ukraine, Kyiv)

### Ways to display the wind and solar energy

*Analysis of the power impact of renewable energy require to work correctly presenting and building adequate analytical models. Important role in models choosing plays a personal experience of researchers and designers and completeness of understanding the random processes of energy generation. Graphical data representation and visualization of operating modes allows us to better imagine the wind and solar peculiarities to make correct decisions about the configuration of power systems based on renewable energy sources. A handy tool available for processing incoming data and graphical display of statistical dependencies is to create a Web application. References 13, figures 8.*

**Keywords:** local grid, wind power, solar power, mathematical model, visualization, Web application.

### SYNOPSIS

Using of wind and solar energy is one of the main trends of contemporary social development. Designing of energy facilities must take into account the characteristics inherent in these renewable energy sources, including dependence on weather conditions. From a user perspective the process of energy flow looks like a random, limited projected. Therefore, the is significant role of designers experience for analysis of the expected performance of energy facilities, the ability to assess the extent of errors and of possible risks. The role of the information presenting is growing. Visualization of the data is able to facilitate the choice of mathematical model and promote its adequacy. For example, for wind power stations present may not be pronounced diurnal, making feasible the hypothesis of continuity characteristics averaged over a day. Having graphical representation facilitates the achievement of such findings and makes them more visible. Instead, solar energy clearly distinguished day and night, and the intensity of the cloud can be considered high or low. Graphical representation of different models of possible distribution of radiation compared with the actual histogram allows to draw preliminary conclusions on their adequacy. Create a Web application for processing statistical data makes it possible to solve application problems, including graphical display, making them as accessible to the user, easy to run fast at work. As a test a web application was created, designed for the processing of statistical data on solar radiation stored in text form or spreadsheet. Functional application can flexibly change for various dependences. The application allows you to display graphically the level of solar radiation during the day for any month, the average level of insolation, the histogram distribution of insolation, summary charts and other indicators as needed. Also combination of statistical data processing as solar radiation and wind speed is possible with it Web application.

Стаття надійшла до редакції 10.05.17

Остаточна версія 07.06.17