

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОСТІ ПРОЦЕСІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

О. В. Лисенко

Таврійський державний агротехнологічний університет

Анотація. Досліджено особливості процесу споживання електричної енергії різноманітними групами споживачів. Це особливо актуально при аналізі можливих обсягів використання вітрової та сонячної енергії. Виділення прогнозованих та стохастичних складових процесу споживання електричної енергії, і оцінка їх стаціонарності в подальшому дозволить розробити математичні моделі роботи енергетичної системи при різноманітних об'єднаннях споживачів та джерел генерації.

Ключові слова: споживання електричної енергії, прогнозування, стохастичність, стаціонарність, варіативність.

Вступ

Останнім часом у світі відбуваються зміни в підходах до формування енергетичної політики держав. Здійснюється перехід від застарілої моделі функціонування енергетичного сектора, в якій домінували великі виробники енергії, вичерпне паливо, неефективні мережі, недосконалі конкуренція на ринках природного газу, вугілля, електроенергії, до нової моделі, в якій створюється конкурентне середовище, вирівнюються можливості для розвитку ринку та мінімізується домінування одного виду виробництва енергії. Разом з цим віддається перевагу підвищенню енергоефективності та використання енергії відновлюваних і альтернативних джерел енергії, таких як енергія вітру і сонця. Це ставить перед Україною нові економічні та технологічні виклики, але одночасно відкриває нові можливості для пошуку і впровадження інноваційних розробок в області виробництва, трансформації, постачання та споживання енергії. [1]

Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у електроенергетиці, особливо вітрової та сонячної енергії, призводить до зростання варіативної складової при генеруванні електроенергії. Реальні умови споживання електроенергії також мають значну випадкову складову. Отже, можливості забезпечення енергетичного балансу при масштабному впровадженні ВДЕ ускладнюються.

Для дослідження можливих обсягів використання вітрової та сонячної енергії при електропостачанні споживачів (населених пунктів, виробничих об'єктів, регіональних та об'єднаних енергосистем,) потрібно враховувати можливі неконтрольовані зміни споживаної потужності. Робота ВДЕ зазвичай оцінюється в термінах ви-

падкових величин. Споживання енергії також має випадкові складові, і може бути описане як випадковий процес.

1. Аналіз останніх досліджень.

Математична модель енергетичного балансу як результуючого випадкового процесу потребує знання особливостей процесу, зокрема виділення прогнозованих (детермінованих, або трендових) та стохастичних складових, і оцінки їх стаціонарності.

У роботах вітчизняних на зарубіжних вчених аналіз наявних даних базується на методиці статистичного аналізу [2-4], а моделювання процесу часто проводять з використанням штучних нейронних мереж.

Так в роботі [5] проведений аналіз добових графіків електроспоживання сільськогосподарського виробництва, який показав, що процес споживання електричної енергії представляє собою адитивну суміш постійної регулярної складової і стаціонарного імовірного процесу. Отримана модель процесу електроспоживання у вигляді дробно-раціональної спектральної щільності. Її параметри мало залежать від сезону, чим забезпечується можливість побудови оптимальної системи оперативного прогнозування в умовах невизначеності для найбільш тяжких технологічних умов.

Робота [6] присвячена емпіричному аналізу споживання електроенергії на Кіпрі. Використовуючи щорічні дані за період з 1960 по 2004 рік, було проведено дослідження споживання електроенергії в житлово-комунальному господарстві та секторі послуг, які є найбільш швидко зростаючими споживачами електроенергії на острові, та її взаємодії з доходами, цінами та погодою. Аналіз проводився за допомогою методів аналізу часових рядів, таких як коректні тести з блоку-

ванням та без структурного розриву рівнів, коінтеграційних тестів, векторних корекцій помилок, тестів Грейнджера і функцій імпульсної відповіді.

В [7] представлені три методи моделювання для прогнозування споживання електроенергії. Окрім традиційного регресійного аналізу, розглядається дерево рішень та нейронні мережі. Показано, що з появою методу інтелектуального аналізу даних для прогнозного моделювання можна побудувати різні типи моделей на єдиній платформі.

Таким чином наявність моделі дозволяє розглядати різноманітні конфігурації енергосистем як в частині генеруючих потужностей, так і щодо різних варіантів об'єднань споживачів.

2. Мета та завдання дослідження.

Проведені дослідження ставили за мету дослідити особливості процесу споживання елект-

ричної енергії різноманітними групами споживачів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- виділення прогнозованих (детермінованих, або трендових) та стохастичних складових процесу споживання електричної енергії;

- оцінки їх стаціонарності, що в подальшому дозволить розробити математичні моделі роботи енергетичної системи при різноманітних об'єднаннях споживачів та джерел генерації. .

3. Основний матеріал дослідження.

Розглянуто в якості прикладу дані про потужність ОЕС у 1-му півріччі 2017 р. [8] (рис.1).

Візуальний аналіз рис.1 показує наявність стаціонарних часових проміжків для середніх значень потужності впродовж холодних (січень-лютий) та теплих (травень-червень) місяців, з тижневою циклічністю.

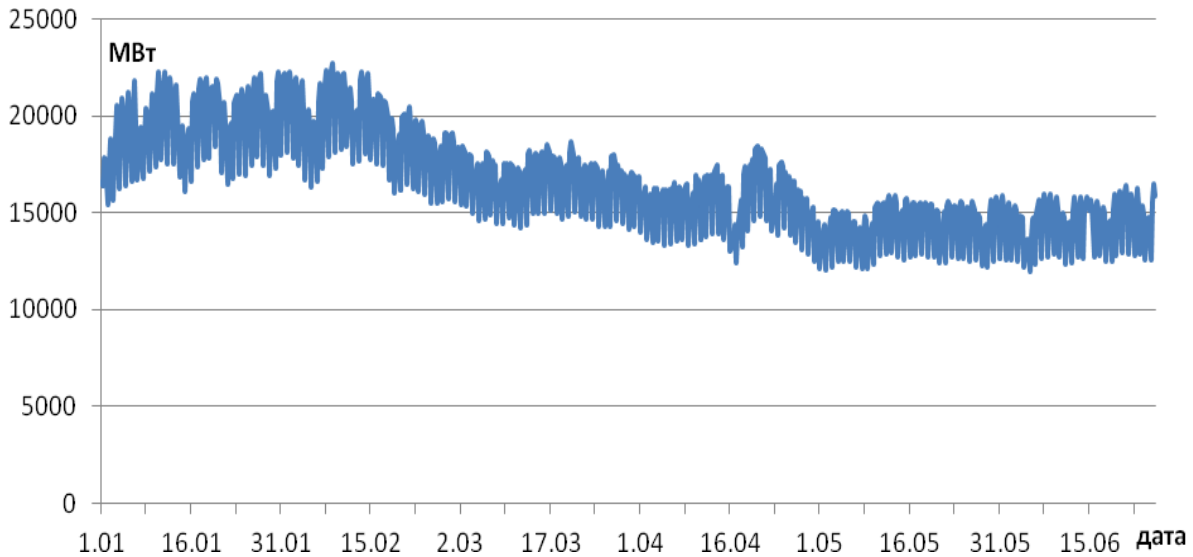


Рис. 1. Поточна потужність ОЕС, 2017 р.

Це ж стосується дисперсії значень. У міжсезоння наявні як лінійний тренд (березень), так і випадкові викиди (квітень).

Рівень варіативності поточних значень потужності як випадковий процес має певну трендову складову впродовж року для ОЕС, тому не може вважатися стаціонарним. Для окремих населених пунктів рівень варіативності дещо вищий (з коефіцієнтами варіації в межах 0,2-0,3), а трендові складові менш виражені [9]. Однак для окремих сезонів поведінка варіацій досить стабільна, особливо в межах місяця.

Про стаціонарність часового ряду, що відображає випадковий процес, можна пересвідчитись, використовуючи наприклад метод серій [10], а саме порівнюючи кількість знакозмін дис-

кретної випадкової послідовності з відповідними критеріями, і оцінюючи гіпотезу стаціонарності за обраним рівнем значимості [11].

Так, для рівня значимості $\alpha=0,05$ (тобто імовірності 95%) при кількості вимірів N , відповідно до формули [10] $r_{N/2;1-\alpha/2} < r < r_{N/2;\alpha/2}$, середня на добу кількість знакозмін r має бути в межах від 7-9 до 14-16 (при часовій дискретності 1 год.).

Аналіз поведінки відхилень потужності ОЕС від осереднених погодинно значень (лінії тренду) впродовж доби показав, що для відхилень поточних значень від трендової лінії добового ходу характерна повільна мінливість, з наявністю деякої (локальної по часу) систематичної складової

(рис. 2). За критерієм серій такий ряд не відповідає вимогам незалежності (оскільки $r \approx 4$).

При отриманні оцінки похідної $x'(t)$ від випадкового процесу $x(t)$ математичне сподівання кількості нульових значень (знакозмін) становитиме [10]:

$$\bar{N}_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_{x'}}{\sigma_x} \right), \quad (1)$$

де σ – відповідне середньоквадратичне відхилення.

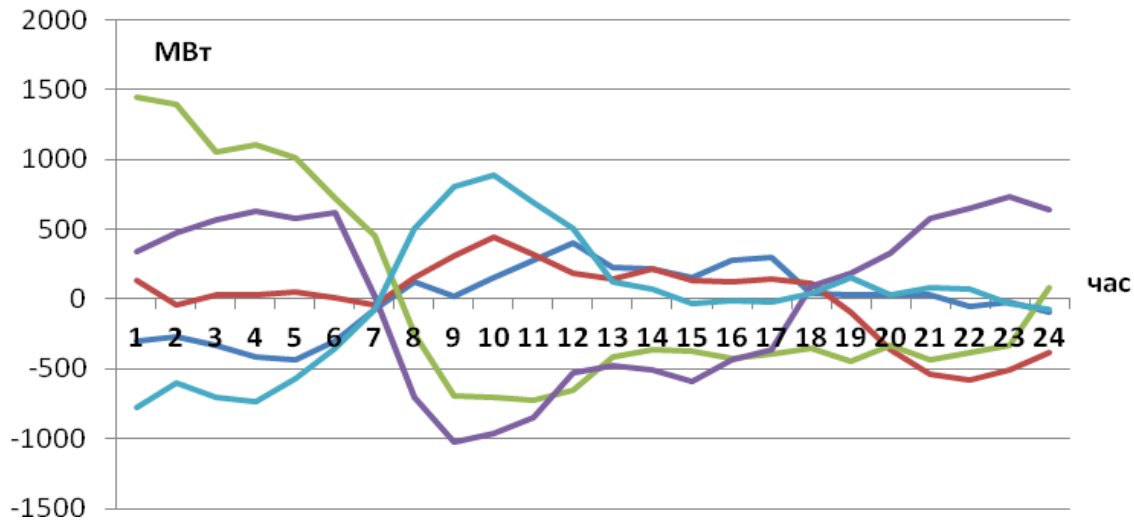


Рис. 2. Приклад відхилень від тренду ОЕС

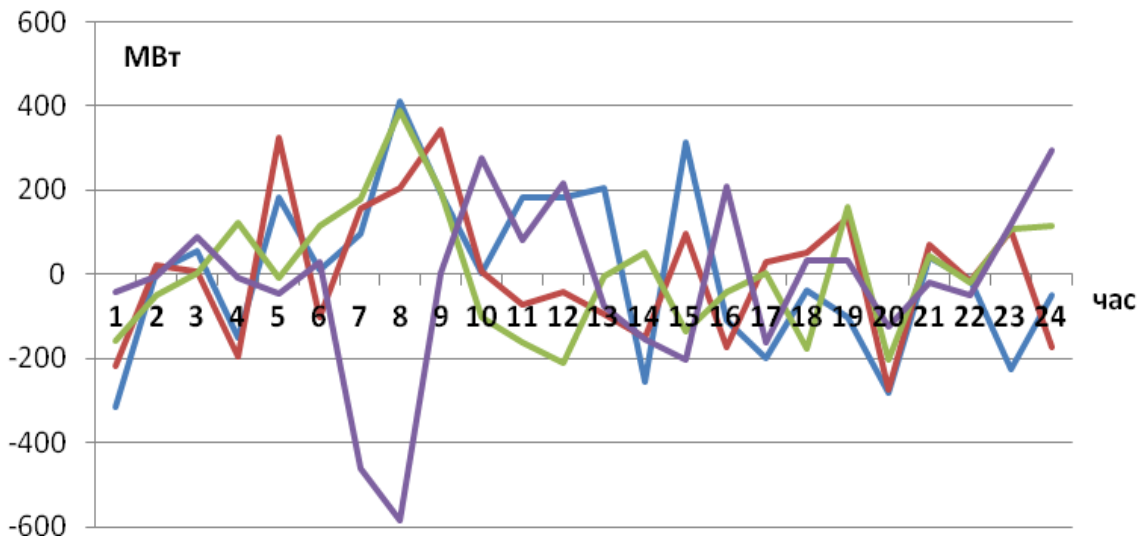


Рис. 3. Приклад стрибків поточної потужності ОЕС

При моделюванні випадкового процесу лінійною декомпозицією [12] для опису поточних флуктуацій краще орієнтуватися на різницю суміжних значень ряду. При використанні авторегресії це відповідає проінтегрованій моделі (тобто АRI, чи АRIМА у випадку урахування ковзного середнього) [13].

В даному випадку отримаємо такі ж результати для r за виразом (1).

Натомість для відхилення поточних значень від попередніх, тобто для різничевого ряду, характерна більша хаотичність (рис. 3), і умови стаціонарності для добових наборів даних вже виконуються ($r \approx 10$). При цьому обидва ряди мають нульове середнє, але дисперсія різничевого ряду (тобто амплітуда відхилень) менша.

Для аналогічних показників ДнЕС вже відхилення поточних значень від трендової лінії добового ходу можуть відповідати вимогам незалежності при обмеженій (кілька днів) вибірці, а в деяких випадках і для місячного набору даних (за підрахунками $r=7-9$). Щоправда, значення критерію серій знаходяться на нижній межі довірного діапазону.

Для населених пунктів (н.п.), де заміри потужності виконувались з інтервалом 30 хв., критерій серій має знаходитись в діапазоні 17-32 для добового набору даних. Відхилення поточних значень від трендової лінії добового ходу у ви-

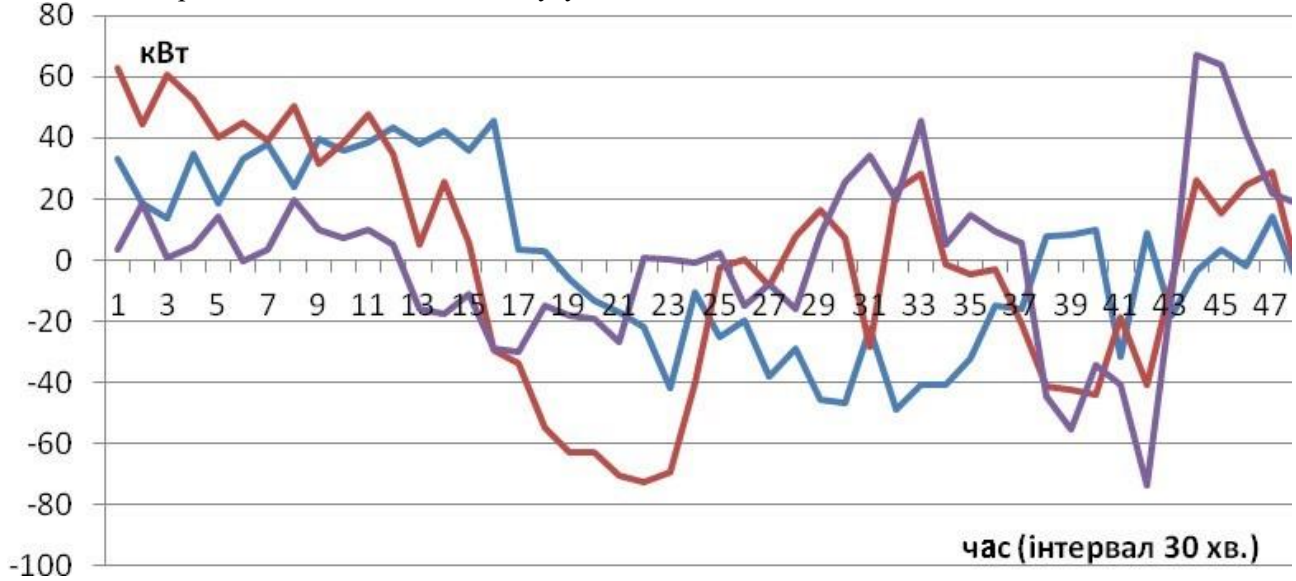


Рис. 4. Приклад зміни потужності н.п. відносно добового тренду

Відхилення від лінії добового тренду мають повільний темп змін, і впродовж доби можуть містити певну систематичну складову у вигляді низькочастотних коливань, на яку накладено високочастотні флуктуації малої амплітуди (рис. 2, 4). Однак характер цих коливань має відмінності для різних днів, хоча для кількох взятих послідовно днів їх поведінка може бути схожою. Візуальний аналіз даного випадкового процесу вказує на наявність більш тривалих, ніж година, інтервалів осереднення, для яких послідовні значення матимуть ознаки стаціонарності. Ці значення можуть стосуватися середніх величин (як у розглянутих вище прикладах), дисперсії і інших параметрів залежно від того, розглядається слаба чи строга стаціонарність [10]. Для практичних потреб достатнім видається підтвердження стаціонарності в широкому сенсі. Про достатню тривалість часових інтервалів можна судити, зокрема, по затуханню коваріаційної функції [10].

Якщо розглядати послідовні 6-годинні осереднені значення як вибіркові оцінки місячних наборів даних, то після їх декомпозиції для ОЕС отримаємо за критерієм серій: для січня-лютого $r=68$; для березня-квітня $r=70$; для травня-червня

падку однієї підстанції (ПС) (рис. 4) такому критерію не відповідають, в різні місяці r змінюється в межах 8-10. При групуванні по 2-4 н.п. величина r змінюється незначно, на 1-2 одиниці.

$r=72$ при граничних значеннях від 50 до 74, тобто умови стаціонарності для флуктуацій споживання в ОЕС виконуються з імовірністю 95%.

Для 1-годинних флуктуацій потужності ДнЕС (рис. 5) кількість знакозмін r знаходиться на нижній межі довірчого інтервалу (тобто $r=8-9$). Для 6-годинних інтервалів осереднення маємо (по останніх роках): у січні $r=70$; квітень – 63; липень – 65; жовтень – 68. Тобто для інтервалів у 6 годин критерій стаціонарності ($50 < r < 74$) також виконується.

Для окремих населених пунктів чи їх невеликої групи (розглядалися сумарні потужності 2-4 н.п.) при застосуванні 3-годинного осереднення отримано: $r = 45-50$ при граничних значеннях від 50 до 74, тобто умови стаціонарності майже не виконуються, лише в окремі місяці є на межі довірчого інтервалу. Характер споживання окремого н.п. суттєво відрізняється від укрупненої енергосистеми за рівнем нерівномірності (рис. 6), статистичні закономірності тут менш помітні.

Для 4-годинних інтервалів осереднення умови стаціонарності вже виконуються в усі місяці, $r = 56-61$ при тих же граничних значеннях, або $r = 84-92$ при граничних значеннях $80 < r < 107$.

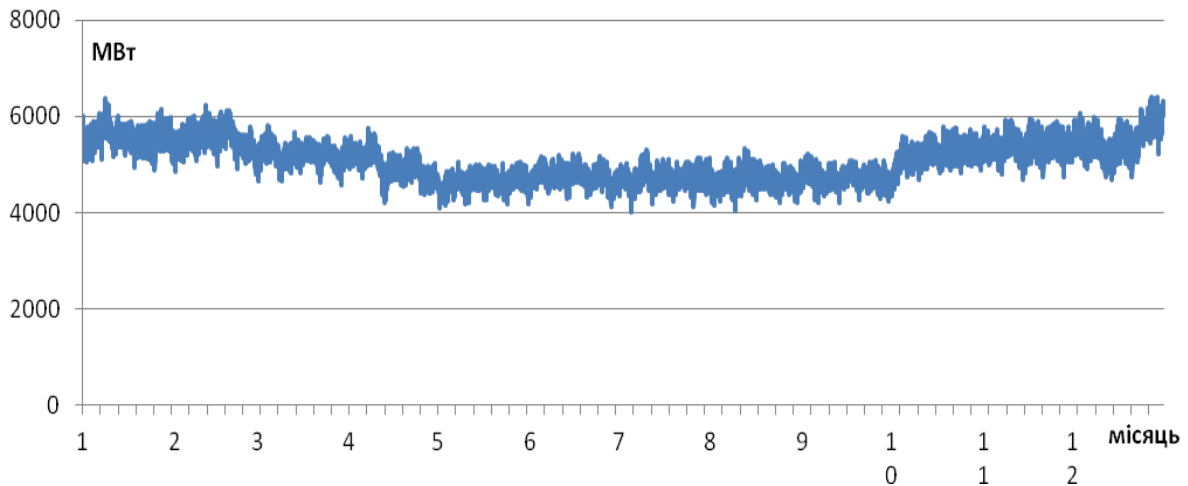


Рис. 5. Поточна потужність ДнЕС впродовж року

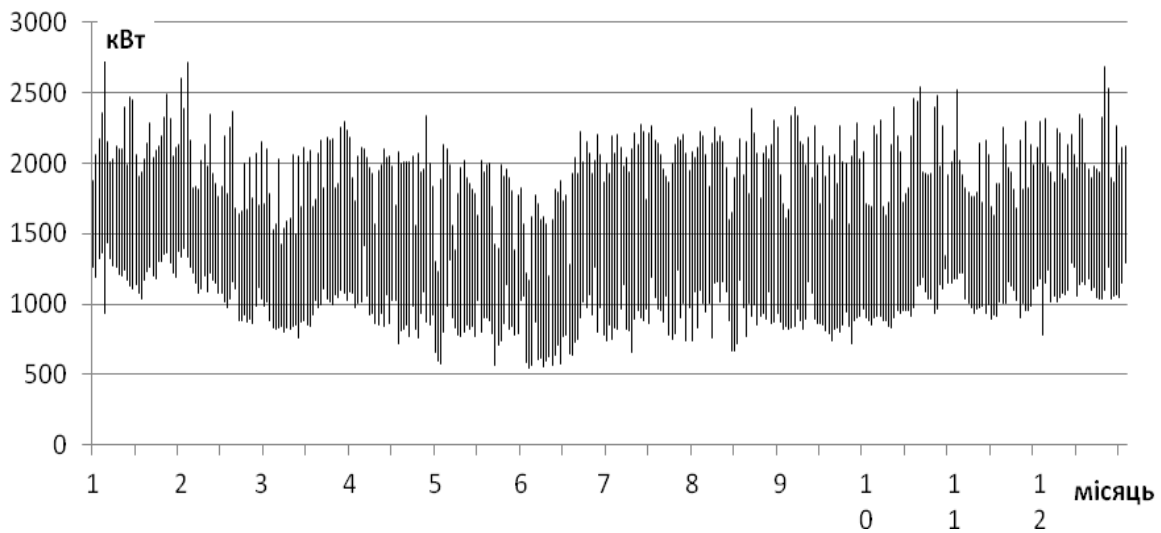


Рис. 6. Поточна потужність н.п. (с.Терпіння) впродовж року

Різниця у розмірах довірчого інтервалу спричинена різною кількістю вимірів, які аналізуються, тобто розміром випадкової вибірки, залежної від часової дискретності.

4. Висновки

Отже, при кількогодинних інтервалах осереднення послідовності даних (середніх значень та їх дисперсій) можуть вважатися стаціонарними в межах одного-двох місяців, залежно від пори року, звичайно після відповідної декомпозиції. При більшій дискретності даних (до години) впродовж доби спостерігаються певні систематичні компоненти, лінійні та циклічні, які усуваються взяттям різниць суміжних даних. Тому при моделюванні короткотермінових змін варто враховувати однокрокову авторегресію даних, яка відображає марківські властивості випадкових послідовностей.

В окремі проміжки часу процес споживання енергії може бути представлений як стаціонарний після виділення систематичних складових (лінійної та періодичної декомпозиції), що дозволяє говорити про принаймні посезонну стаціонарність процесів споживання електроенергії.

Врахування означених вище факторів стаціонарності дозволить сформулювати адекватні математичні моделі роботи енергосистеми при різних масштабах об'єднання споживачів. Та, як свідчить виконане дослідження, таке моделювання допустиме на різних часових горизонтах та з різною дискретністю даних.

Список використаної літератури

1. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: проект [Електронний ресурс]. – Режим доступу :

<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>

2. Nelson, W. B. Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis [Text] / W. B. Nelson // John Wiley & Sons. – 2009. – Vol. 344. – P.p. 233–301.

3. Schabenberger, O. Statistical methods for spatial data analysis [Text] / O. Schabenberger, C. A. Gotway - CRC Press, 2017.

4. Ramsey, F. The statistical sleuth: a course in methods of data analysis [Text] / F. Ramsey, D. Schafer - Cengage Learning, 2012.

5. Плешков, С. П. Автоматизація управління енергоспоживанням в сільськогосподарському виробництві. [Текст]: автореф. канд. техн. наук: 05.13.07 / С. П. Плешков Кіровоградський ДТУ. – Кіровоград, 2003. – 20 с.

6. Zachariadis, T. An empirical analysis of electricity consumption in Cyprus [Text] / T. Zachariadis, N. Pashourtidou - Energy Economics. – 2007. – Т. 29, №. 2. – С. 183–198.

7. Tso, G. K. F. Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks [Text] / G. K. F. Tso, K. K. W. Yau – Energy. – 2007. – Т. 32, № 9. – P. 1761–1768.

8. Data.gov.ua : Єдиний державний веб-портал відкритих даних [Електронний ресурс]. - on-line. - Режим доступу: <http://data.gov.ua>.

9. Кузнецов, М. П. Побудова математичної моделі режиму споживання електроенергії [Текст] / М. П. Кузнецов // Відновлювана енергетика : наук.-прикл. жур. / НАН України, Ін-т відновлюваної енергетики. - К., 2017. – № 4. – С.32–44

10. Бендат, Д. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Д. Бендат, А. Пирсол - М. : Мир, 1989. – 540 с.

11. ДП НЕК «Укренерго». Національна енергетична компанія [Електронний ресурс]. – on-line. – / Режим доступу: <http://ua.energy/>.

12. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель – 9-е изд. - М.: Academia, 2003. – 576 с.

References

1. “ New Energy Strategy of Ukraine until 2035: "Security, Energy Efficiency,

Competitiveness": project. [Nova enerhetychna stratehiya Ukrainy do 2035 roku: «Bezpeka, enerhoefektyvnist', konkurentospromozhnist'» : proekt] Retrieved from: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>

2. Nelson, W. B. (2009). Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis. John Wiley & Sons, 344, 233–301.

3. Schabenberger, O., Gotway, C. A.(2017). Statistical methods for spatial data analysis . CRC Press, 2017.

4. Ramsey, F., Schafer, D. (2012). The statistical sleuth: a course in methods of data. Cengage Learning, 2012.

5. Pleshkov, S. P. (2003). Automation of power consumption management in agricultural production. [Avtomatyzatsiya upravlinnya enerhospozhyvannyam v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi] Kirovograd, 20 p.

6. Zachariadis, T., Pashourtidou, N. (2007). An empirical analysis of electricity consumption in Cyprus.

7. Tso, G. K. F., Yau, K. K. W.(2007). Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks . Energy, 32(9), 1761–1768.

8. Data.gov.ua: The only state web-portal of open data. [Yedyny derzhavnyy veb-portal vidkrytykh danykh] Retrieved from: <http://data.gov.ua>. Energy Economic, 29(2), pp. 183–198.

9. Kuznetsov, M. P.(2017). Construction of a mathematical model of the mode of electricity consumption. [Pobudova matematychnoyi modeli rezhymu spozhyvannya elektroenerhiyi] Renewable energy, 4, pp. 32–44

10. Bendat, D., Pysol, A. (1989). Application analysis of random data. [Prikladnoy analiz sluchaynykh danykh] M., 540 p.

11. NP NEC "Ukrenergo". National Energy Company. [DP NEK «Ukrenerho». Natsional'na enerhetychna kompaniya] Retrieved from: <http://ua.energy/>.

12. Ventsel, E.S.(2003). Theory of Probability. [Teoriya veroyatnostey] Moscow, 576 p.

RESEARCH OF POWER CONSUMPTION PROCESSES STATIONARITY IN GRIDS

O. V. Lysenko

Tavriya State Agrotechnological University

Abstract. *The use of renewable energy sources (RES) in electricity, in particular wind power and solar energy, leads to an increase in the variable component of electricity generation. The investigations aimed to explore the features of the electricity consumption of different groups of consumers, such as the allocation of predictable and stochastic components.*

To obtain guaranteed stationary processes, a time series decomposition is performed with the allocation of the averaged component, average monthly values and current fluctuations.

An analysis of the behavior of the power system deviations of Ukraine from the average hourly values over the course of the day has shown that for deviations of current values from the trend line of the daily turnover characterized by slow variation, with the presence of some systematic component

For settlements where power measurements are performed at intervals of 30 minutes, the series criterion should be in the range 17-32 for the daily data set. Deviation of current values from the daily trend line in case of one substation does not meet this criterion.

When considering consecutive 6-hour averaged values after their decomposition for the combined power system, we obtain according to the series of criteria that the stationary conditions for the fluctuations of consumption in the combined power system are fulfilled with a probability of 95%.

The stationary criterion is fulfilled for 1 hour fluctuations in the power of the Dnipro power system.

For individual settlements or their small group, with the application of a 3-hour averaging, stationary conditions are almost non-existent, only in certain months are at the confines of confidence intervals. The nature of the consumption of a separate settlement is significantly different from the enlarged power system by the level of unevenness, the statistical laws are less noticeable here. For 4-hour averaging interval stationary conditions are already fulfilled in all months of the year.

So at some intervals, the energy consumption process can be presented as stationary. Taking into account the above-mentioned factor of stationary will allow forming adequate mathematical models of the power system's operation at different scales of consumer associations.

Keywords: *electric power consumption, forecasting, stochasticity, stationary, variability.*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

О. В. Лысенко

Таврический государственный агротехнологический университет

Аннотация. *Исследованы особенности процесса потребления электрической энергии различными группами потребителей. Это особенно актуально при анализе возможных объемов использования ветровой и солнечной энергии. Выделение прогнозируемых и стохастических составляющих процесса потребления электрической энергии, и оценка их стационарности в дальнейшем позволит разработать математические модели работы энергетической системы при различных объединениях потребителей и источников генерации.*

Ключевые слова: *потребления электрической энергии, прогнозирования, стохастичность, стационарность, вариативность.*

Получено 28.02.2018



Лысенко Ольга Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електроенергетика і автоматизація» Таврійського державного агротехнологічного університету. Просп. Б. Хмельницького 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна, E-mail: Helga_vl@ukr.net, тел. +38-098-98-15-133

Olga Lysenko, PhD, Associate Professor of the Department of Power Engineering and Automation, Tavriya State Agrotechnological University, B. Khmelnitsky av. 18, Melitopol, Zaporozhye region, Ukraine, E-mail: Helga_vl@ukr.net, tel. +38-098-98-15-133

ORCID ID: 0000-0001-7085-7796