

Орлов Є.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ТА ПРОДАЖУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ОТРИМАНОЇ ВІД ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ MICROGRID

У статті розглядається метод, завдяки якому можна вирахувати прибуток за продажу електроенергії із використанням відновлювальних джерел енергії в локальній системі MicroGrid. Представлено дослідження взаємодії факторів, що впливають на прибуток за продажу електроенергії з використанням регресійного аналізу. Виявлено основні показники, які мають найбільший вплив на прибуток, та зроблені висновки з приводу ефективного використання цього методу для локального ринку MicroGrid.

Ключові слова: соціально-економічний розвиток, регресія, кореляція, MicroGrid, прибуток за продажу електроенергії, «зелений» тариф.

Постановка проблеми. Сучасні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності використання електричної енергії у системах розподіленої генерації MicroGrid та перерозподіл енергетичних потоків на локальних віртуальних ринках [1–4], підкреслюють актуальність задач моніторингу, оцінки та прогнозування обсягів генерації енергії. З точки зору сумісного розглядання технічних та економічних факторів функціонування MicroGrid враховуються рівень попиту, ціна на електроенергію, «зелений» тариф, сезонність, надлишок енергії від альтернативних джерел. На підставі аналізу цих та інших показників формуються заявки на продаж та придбання енергії у гравців віртуального ринку.

Метою цієї статті є розроблення методу прогнозування кількості електроенергії, яка може бути підготовлена для реалізації на локальному ринку MicroGrid, з урахуванням підвищення або зниження цін на «зелений» тариф. При цьому на базі кореляційно-регресійного аналізу часових рядів, які попередньо підлягають екстраполяційній обробці [5], встановлюється статистичний взаємозв'язок між параметрами й оцінюється вплив обраних параметрів на значення попиту на електричну енергію в майбутньому на прогнозований період.

Одним з напрямів розвитку інтелектуальної електроенергетичної системи з активно-адаптивною мережею постає концепція MicroGrid. Система MicroGrid найчастіше включає в себе джерела розподіленої генерації, накопичувачі енергії і локальних споживачів [9]. Важливою власти-

вістю MicroGrid можна назвати те, що, незважаючи на функціонування в рамках розподільної системи, вони можуть автоматично переходити в ізольований режим роботи у разі аварій у мережі і відновлювати синхронну роботу з мережею після усунення аварії з підтриманням необхідної якості електричної енергії. Будучи автономними або підключеними до національної енергетичної мережі, об'єкти розподільної генерації розташовані в безпосередній близькості від споживачів (невеликих міст, сіл, заводів) і виробляють електроенергію «на місці», істотно знижуючи втрати у передачі по лініях і підвищуючи таким чином ККД. Електрична енергія, вироблена об'єктами розподільної генерації, буде безпосередньо залежати від попиту локальних споживачів, які, своєю чергою, будуть мати можливість коригувати поставки енергії відповідно до своїх потреб, що веде до підвищення їх ролі в керуванні енергосистемою.

Необхідність прогнозування електроспоживання в системах MicroGrid зумовлена економічними причинами. Причини пов'язані з появою ринку електроенергії, при цьому зростає важливість прогнозування енергоспоживання учасників цього ринку. Відхилення фактичного споживання від заявлених значень більше певного відсотка призводить до покупки електроенергії з балансууючого ринку за більшою ціною. Відхилення в менший бік теж карається оплатою недопоставленої електроенергії, яка визначається різницею між заявленим і фактичним споживанням за встановленими розцінками [10]. Складність прогнозу

електроспоживання зумовлена необхідністю обліку багатьох факторів, що впливають на споживання електроенергії (температура навколишнього повітря; ступінь освітленості; тривалість дня; день тижня; переходи з зимового на літній час і назад; наявність екстраординарних подій; прогнози погодних умов; стан інших факторів, що впливають на зміну споживання відповідно до даних, отриманих у результаті обробки статистики споживання; плановане включення/відключення енергоємних виробництв) [1]. Вибір того чи іншого методу прогнозування є досить складною задачею, від вирішення якої залежить як підвищення надійності системи MicroGrid, так і уникання невідповідності попиту і пропозиції електроенергії. Проблема привабливості інтелектуальної енергетики для споживачів полягає в принциповому розриві між потребою інтелектуальної енергетики в активній участі широкого класу споживачів в управлінні нею для забезпечення гнучкості та підвищення ефективності енергосистеми і нинішньою поведінкою споживачів, які не зацікавлені в участі в управлінні енергетикою і не розуміють, навіщо і як вони могли б це робити.

Очевидно, що точність прогнозу визначається кількістю параметрів, що беруться до розгляду, а також глибиною ретроспективи часового ряду цих параметрів. Для прикладу було проведено дослідження часового ряду, що містить дані про ціну на електроенергію мережі, «зелений» тариф [6] та обчислений прибуток від продажу надлишків електроенергії, згенерованої альтернативними джерелами MicroGrid. У табл.1 наведено приклад такого часового ряду за 2010–2018 рр. Ретроспективні статистичні дані надалі екстраполюються на майбутні періоди.

Таблиця 1

	Ціна за електроенергію мережі, грн/кВт*год (x_1)	«Зелений» тариф, грн/кВт*год (x_2)	Прибуток за продану електроенергію, грн/кВт*год (y)
2010	0,60	14,11	689,5
2011	0,72	13,12	701,4
2012	0,84	12,19	684,4
2013	0,95	11,19	650,3
2014	1,07	10,70	648,8
2015	1,31	10,06	645,6
2016	1,42	10,04	643,0
2017	1,50	10,01	642,2
2018	1,52	10,00	642,1

Спираючись на отримані дані, можна зробити прогноз, що ціна на електроенергію в мережі на 2019 р. становитиме 1,55 грн за 1 кВт/г.

Таблиця 2

y	x_1	x_2	$(y - \bar{y})^2$	$(x_1 - \bar{x}_1)^2$	$(x_2 - \bar{x}_2)^2$
689,50	0,60	14,11	823,052	0,253	8,07
701,40	0,72	13,12	1647,458	0,146	3,43
684,40	0,84	12,19	556,436	0,069	0,85
650,30	0,95	11,19	110,484	0,023	0,01
648,80	1,07	10,70	144,267	0,001	0,32
645,60	1,31	10,06	231,378	0,042	1,46
643,00	1,42	10,04	317,236	0,100	1,51
642,20	1,50	10,01	346,374	0,157	1,58
642,10	1,52	10,00	350,106	0,174	1,61

Де \bar{y} – середнє арифметичне значення прибутку за продану електроенергію (660.81 грн/кВт*год),

\bar{x}_1 – середнє арифметичне значення фактора x_1 (1,10 грн/кВт*год),

\bar{x}_2 – середнє арифметичне значення фактора x_2 (11,27 грн/кВт*год).

Часові ряди параметрів підлягають кореляційно-регресійному аналізу. При цьому необхідно встановити наявність кореляційних взаємозв'язків між параметрами, які розглядаються, як випадкові величини та, відповідно, підлягають статистичній оцінці. Кореляційні моменти (коваріації) характеризують наявність або відсутність зв'язку між випадковими величинами x_1, x_2 та y з табл.1 за формулою (1) та (2):

$$K_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{n} \quad (1)$$

$$K_{yx_1} = -6,4624$$

$$K_{yx_2} = 30,3868$$

$$K_{x_1x_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_1)(x_i - \bar{x}_2)}{n} = \frac{-4,0185}{9} = -0,4465 \quad (2),$$

де \bar{y} – середнє арифметичне значення прибутку за продану електроенергію (660.81 грн/кВт*год),

\bar{x}_1 – середнє арифметичне значення фактора x_1 (1,10 грн/кВт*год),

\bar{x}_2 – середнє арифметичне значення фактора x_2 (11,27 грн/кВт*год),

n – кількість значень (9).

Як бачимо, кореляційний момент у всіх випадках розглянутого прикладу відмінний від нуля, отже, кореляційний зв'язок є між усіма змінними. Нормоване значення коефіцієнта коваріації називається коефіцієнтом кореляції.

Для перевірки наявності кореляції парного лінійного зв'язку використовують лінійний коефіцієнт парної кореляції, який є мірою пропорційності ступеня залежності явищ, показником інтенсивності лінійного зв'язку. Для розглянутого випадку коефіцієнти кореляції приймають значення:

$$r_{yx_1} = \frac{\overline{x_1 \cdot y} - \overline{x_1} \cdot \overline{y}}{(\overline{x_1 - \overline{x_1}})^2 \cdot (\overline{y - \overline{y}})^2} = 0,88 \quad (3)$$

$$r_{yx_2} = \frac{\overline{x_2 \cdot y} - \overline{x_2} \cdot \overline{y}}{(\overline{x_2 - \overline{x_2}})^2 \cdot (\overline{y - \overline{y}})^2} = 0,94 \quad (4)$$

$$r_{x_1 x_2} = \frac{\overline{x_1 \cdot x_2} - \overline{x_1} \cdot \overline{x_2}}{(\overline{x_1 - \overline{x_1}})^2 \cdot (\overline{x_2 - \overline{x_2}})^2} = 0,94 \quad (5)$$

Коефіцієнт кореляції приймає чисельні значення в проміжку від -1 до +1. Якщо значення позитивне, це свідчить про прямий зв'язок, негативне – про зворотний.

Коефіцієнт кореляції перевіряється шляхом знаходження t-критерію Стьюдента [5]. Визначимо значення критерію t. Потім перевіримо на відсутність зв'язку між прибутком за продану електроенергію та факторами.

$$t_{роз(yx)} = \frac{|r| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 4,866 \quad (6)$$

$$t_{роз(yx_1)} = 4,866$$

$$t_{роз(yx_2)} = 7,059$$

$$t_{роз(x_1 x_2)} = 7,339$$

$$t_{табл} = 1,8331 \text{ з рівнем імовірності } 0,90$$

Обчислене за формулою (6) значення $t_{роз}$ порівнюється з $t_{табл}$, який отримують за таблицею Стьюдента [5]. У разі якщо $|t_{роз}| > |t_{табл}|$ зв'язок вважають суттєвим. Оскільки $|4,866| > |1,8331|$, $|7,059| > |1,8331|$ та $|7,339| > |1,8331|$, це означає, що зв'язок є суттєвим для будь-якої з пар розглянутих коефіцієнтів табл.1.

Регресійний аналіз є кількісним методом визначення виду математичної функції в причинно-наслідковій залежності між прибутком за продану електроенергію і факторами, які впливають на нього. Тому необхідно зробити прогноз результативного показника (y) побудовою рівняння регресії. Лінійне рівняння множинної регресії має вигляд:

$$\overline{y_{x_i}} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_i x_i + \dots + a_n x_n,$$

де x_i – факторні ознаки (в розглянутому випадку їх дві – x_1 та x_2);

a_i – невідомі параметри рівняння (коефіцієнти регресії).

Коефіцієнти регресії a_i показують, наскільки змінюється значення прибутку за продану елек-

троенергію у за збільшення її факторного значення x_i на одиницю у фіксованому значенні інших факторних ознак. Вільний член рівняння a_0 показує усереднений вплив на результативний показник усіх неврахованих факторів.

Для розглянутого випадку рівняння множинної регресії з двома факторами має вигляд:

$$\overline{y_{x_i}} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2.$$

Для знаходження коефіцієнтів лінійної двофакторної моделі необхідно вирішити систему рівнянь з трьома невідомими параметрами a_0 , a_1 , a_2 :

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 = \sum y \\ a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 = \sum x_1 y \\ a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 = \sum x_2 y \end{cases}$$

a_1 та a_2 є коефіцієнтами регресії, a_0 – вільним членом рівняння, n – кількість значень (9).

Отримаємо значення коефіцієнтів:

$$a_0 = 492,34; \quad a_1 = 1,40; \quad a_2 = 14,81.$$

Остаточо рівняння лінійної регресії має вигляд:

$$\overline{y_{x_i}} = 492,34 + 1,40x_1 + 14,81x_2$$

Розглянемо економічне трактування результатів побудованої двофакторної регресійної моделі. Лінійна регресія виражає залежність результативного показника – прибутку проданої електроенергії (y) – від ціни на «зелений» тариф (x_1) та ціни на електроенергію в мережі (x_2). Коефіцієнти рівняння підтверджують наявність впливу всіх факторів на результативний показник. У нашому разі за один рік ціна на електроенергію в мережі збільшується в середньому на 1,40 грн/кВт*год за збільшення ціни «зеленого» тарифу на 1 грн/кВт*год за незмінності ціни на електроенергію в мережі. Прибуток від проданої електроенергії за «зеленим» тарифом збільшується в середньому на 14,81 грн/кВт*год за збільшення ціни на електроенергію в мережі на 1 грн/кВт*год за незмінності ціни на «зелений» тариф.

Отримані дані дають змогу прогнозувати економічні параметри локального ринку MicroGrid та, відповідно, планувати обсяги закупівель та продажів електроенергії його учасниками.

Висновок. Таким чином, проведений кореляційно-регресійний аналіз підтверджує існування статистичного взаємозв'язку між прибутком від реалізації електроенергії за «зеленим» тарифом, цінами на «зелений» тариф та цінами на електроенергію в мережі. Обчислення коефіцієнтів двофакторної регресійної моделі встановлює рівень залежності між параметрами та дає змогу прогнозувати економічні параметри локального ринку MicroGrid для планування обсягів закупівель та продажів електроенергії його учасниками.

Список літератури:

1. Жуйков В.Я., Ямненко Ю.С., Бойко І.Ю., Клепач Л.Є. Статична та динамічна тарифікація електроенергії автономних MicroGrid. Вісник ЖДТУ, № 3 (78). 2016.
2. Yamnenko J., Tereshchenko T., Klepach L., Pali D. Forecasting of electricity consumption in SmartGrid. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2017, pp.
3. Thirugnanam K., Kerk S.K., Yuen C., Liu N., Zhang M. Energy Management for Renewable Micro-Grid in Reducing Diesel Generators Usage with Multiple Types of Battery. IEEE Trans. Ind. Electron. 2018.
4. Кириленко О.В., Білінов І.В., Попович В.І., Олефір Д.О., Методологія об'єктно орієнтованого моделювання для опису функціонування конкурентного оптового ринку електричної енергії. Проблеми загальної енергетики. 2011. Вип. 1(24). 5–10 с.
5. Харченко М.А. Корреляционный анализ: Учебное пособие для вузов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. – 31 с.
6. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії». URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19> (дата звернення 19.09.2018).
7. Военно-экономический анализ: учеб. / под общ. ред. С.Ф. Викулова. Ярославль: ВФЭИ, 2010.
8. Интеллектуальная энергетическая система России: проект реализации технологической платформы. Российское энергетическое агентство. М., 2010. 169 с.
9. Sustainable Energy Management Solution – GridLogic/SolarCity. URL: <http://www.solarcity.com/commercial/sustainable-energy-solution>
10. Conejo A.J., Morales J.M., Baringo L. Real-time demand response model, IEEE Trans. on Smart Grid. 2010, p. 236–242.
11. Ferreira R.S., Barroso L.A.N., Carvalho M.M. Demand response models with correlated price data: a robust optimization approach, App. Energy, 96, 2012, p. 133–149.
12. Lujano-Rojas J.M. Optimum residential load management strategy for real time pricing demand response programs. Energy policy, 45, 2012, p. 671–679.
13. Khalili A.H., Wu C., Aghajan H. Hierarchical preference learning for light control from user feedback, IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW 2010), 2010, p. 56–62.
14. Gottwalt S. Demand side management – a simulation of household behavior under variable prices. Energy policy, 2011, p. 8163–8174.
15. Li B. Predicting user comfort level using machine learning for smart grid environments, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT 2011), p. 1–6.
16. Hastie Trevor, Tibshirani Robert, and Friedman Jerome. The Elements of Statistical Learning, Springer New York Inc., USA, 2009.
17. Hyndman Rob and Athanasopoulos George. Forecasting: principles and practice. OTexts: Melbourne, Australia, 2013. URL: <http://otexts.org/fpp/>.
18. Zagdański Adam, Suchwałko Artur. Analiza i prognozowanie szeregów czasowych. Praktyczne wprowadzenie na podstawie środowiska R (in Polish). PWN, 2015.
19. Zhuikov V.Y., Tereshchenko T.O., Petergerya J.S. Preobrazovanie diskretnyih signalov na konechnyih intervalah v orientirovannom bazise. K.:Avers, 2004. 274 p.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОДАЖИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПОЛУЧЕННОЙ ОТ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ MICROGRID

В статье рассматривается метод, благодаря которому можно вычислить прибыль за проданную электроэнергию с использованием возобновляемых источников энергии в локальной системе MicroGrid. Представлены исследования взаимодействия факторов, влияющих на прибыль за проданную электроэнергию с использованием регрессионного анализа. Выявлены основные показатели, которые оказывают наибольшее влияние на прибыль, и сделаны выводы по поводу эффективного использования этого метода для локального рынка MicroGrid.

Ключевые слова: *социально-экономическое развитие, регрессия, корреляция, MicroGrid, прибыль за проданную электроэнергию, «зеленый» тариф.*

**ESTIMATION OF USE AND SALE OF THE ELECTRIC POWER
RECEIVED FROM ENERGY SOURCES IN MICROGRID SYSTEM**

The problem of attractiveness of intellectual energy for consumers lies in the fundamental gap between need of the active participation of wide range of consumers in its management to ensure the flexibility and efficiency of the power system, and current behavior of consumers who aren't interested in participating in energy management and don't understand why and how they could do it. This article is devoted to calculation of predicted profit for the sold electricity at local MicroGrid energy market with renewable energy sources. The choice of forecasting method is quite complicated task, its solution affects both on reliability of MicroGrid system, and avoiding mismatches of demand and proposal of electricity.

Key words: *socio-economic development, regression, correlation, MicroGrid, profit for electricity sold, green tariff.*