

УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.055>

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ МАНЕВРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ЗАДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВАРТОСТІ СПОЖИТОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Ю.Г. Качан*, докт. техн. наук, О.А. Шрам**, канд. техн. наук, К.О. Братковська***, канд. екон. наук

Національний університет «Запорізька політехніка»,

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна

e-mail: alexshrum@yahoo.com, bratkovskaja@gmail.com

Метою роботи є оцінка економічної доцільності маневрування навантаженням промислових підприємств задля зменшення вартості спожитої електроенергії. Для досягнення поставленої мети проведено розрахунки вартості добового споживання електричної енергії та добової вартості небалансів для промислового підприємства м. Запоріжжя. Зростання генерації ВДЕ та невідповідність заявленого споживання електроенергії фактичному призводять до виникнення небалансів і, як наслідок, до додаткових фінансових витрат на їхнє покриття. Водночас на промислових підприємствах є споживачі, які мають можливість маневрувати своїм навантаженням задля вирівнювання добових графіків споживання електроенергії та зменшення небалансів. Для оцінки здатності маневрування навантаженням промисловими підприємствами та окремими їхніми підрозділами запропоновано коефіцієнт маневрових можливостей, який характеризує теоретичну спроможність споживача електроенергії брати участь у вирівнюванні добового графіка навантаження та зменшення небалансів електричної енергії. У результаті застосування споживачів-регуляторів на підприємстві добова вартість небалансів зменшилась на 29 %, а загальна добова вартість спожитої електричної енергії – на 1,94 %. Бібл. 7, рис. 3, табл.

Ключові слова: вартість електричної енергії, коефіцієнт маневрових можливостей, енергоринок, небаланс електроенергії, графік навантаження.

З огляду на необхідність забезпечення енергетичної безпеки України, а також у зв'язку з переходом до низьковуглецевої енергетики відбувається постійне зростання частки відновлювальних джерел енергії в об'єднаній енергетичній системі України. Згідно з "Проектом плану відновлення України", розробленим Національною радою з відновлення України від наслідків війни, в Україні до 2032 року планується збудувати нові об'єкти ВДЕ потужністю понад 10 ГВт [1]. Для цього потрібно залучити понад 11 млрд. дол. США інвестицій.

Але через високу залежність обсягів генерації електроенергії об'єктами ВДЕ від погодних умов погіршуються технічні можливості інтеграції сонячних та вітрових електростанцій в енергосистему країни [2]. Крім стохастичного характеру генерації відбуваються також періодичні обмеження щодо залучення потужності сонячних та вітрових електростанцій в об'єднану енергосистему через різке зменшення навантаження в останній.

Таким чином, зростання генерації ВДЕ, невідповідність заявленого споживання фактичному, певна його стохастичність призводять до суттєвих розбіжностей між погодинними заявленими обсягами продажу та купівлі електроенергії на ринку на добу наперед (РДН). Це зі свого боку призводить до необхідності врегулювання зазначених невідповідностей (небалансів) на балансуєчому ринку, що вимагає додаткових фінансових витрат. З метою зменшення останніх постачальники поєднуються в балансуєчі групи, а споживачі намагаються більш точно здійснювати прогнозування обсягів споживання електроенергії та маневрувати своїми навантаженнями [3].

Розділення послуг із передачі та розподілу електроенергії поміж різними учасниками ринку (ОСП, ОСР) сприяє появі конкуренції між постачальниками електроенергії. Вони зі свого боку пропонують споживачам електричну енергію за різною ціною, яка формується з вартості електричної енергії на ринку на добу наперед (РНД), тарифів на її передачу й розподіл та вартості послуг (маржі) постачальника. Водночас можуть ураховуватися націнка регу-



лятора ринку (НКРЕКП), послуги з диспетчеризації та плата за небаланс. Останні складові можуть бути внесені у формулу розрахунку вартості електроенергії або враховані у вартості послуг постачальника.

Промислові підприємства, як і решта споживачів, мають право купувати електроенергію для власного використання за двосторонніми договорами на РДН та внутрішньодобовому ринку (ВДР). Ураховуючи, що ціна електроенергії на ринку ДД найнижча, а найбільшу вартість доведеться сплачувати за небаланс (якщо така складова є у формулі розрахунку вартості електроенергії згідно з договором на постачання електроенергії), актуальність прогнозування заявлених обсягів споживання електроенергії суттєво зростає.

Для мінімізації витрат на електричну енергію промисловими підприємствами може розглядатися низка заходів. До них відносяться організація приєднання в точці продажу електричної енергії зі ступенем напруги 27,5 кВ і вище, заміна постачальника електроенергії з метою отримання більш привабливої пропозиції, а також безпосередня участь підприємства в добовому балансуванні ринку з управлінням навантаженням, яке дасть змогу зменшити відхилення фактичних обсягів споживання електроенергії від заявлених, змінити профіль навантаження відповідно до найнижчих цін на відповідних погодинних сегментах ринку електроенергії.

Перехід до I-го класу напруги вимагає від споживача величезних капітальних витрат і до того ж не завжди може бути технічно реалізований. Привабливість другого з перерахованих раніше напрямків пов'язана з тим, що конкуренція серед постачальників електроенергії активізувала їхню діяльність щодо розробки різних комерційних пропозицій. Останні враховують наявність базового навантаження, обсяги споживання, спосіб розрахунків за спожиту електроенергію, вимогу сплачувати за небаланс. Для споживачів, які відносяться до групи «А», фактична вартість електроенергії визначається за цінами РДН на поточні обсяги споживання ними електроенергії та іншими складовими формули комерційної пропозиції постачальника:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n [W_i \cdot (C_{РДН i} + C_{ОСП} + C_{ОСР} + C_{ПОСТ}) + W_{НБ i} \cdot C_{НБ i}]}{W_{факт}}, \quad (1)$$

де n – кількість годин у місяці; $W_{факт}$ – фактичне споживання електроенергії за місяць, кВт·год; W_i – погодинне споживання електроенергії, кВт·год; $W_{НБ i}$ – погодинний небаланс електроенергії, кВт·год; $C_{РДН i}$ – погодинна ціна за електроенергію на РДН, грн/кВт·год; $C_{ОСП}$ – тариф на послуги з передачі електричної енергії, грн/кВт·год; $C_{ОСР}$ – тариф на послуги з розподілу електричної енергії, грн/кВт·год; $C_{ПОСТ}$ – маржа постачальника, грн/кВт·год; $C_{НБ i}$ – погодинна ціна за небаланс, грн/кВт·год.

Для забезпечення необхідної гнучкості енергосистеми вітчизняні та закордонні науковці пропонують впроваджувати заходи з управління попитом на електроенергію [3–5]. Одним із таких ефективних заходів щодо мінімізації витрат на електричну енергію є балансування та управління піковим навантаженням. Зазвичай за таких умов пропонується обмежувати споживання електричної енергії вдень, коли вона використовується найбільше і відповідно коштує найдорожче, та переносити робочі процеси на нічний час [6]. Водночас необхідно зазначити, що сьогодні недостатньо уваги приділяється можливостям промислових підприємств маневрувати своїм навантаженням задля такої оптимізації.

Так, у роботі [7] зазначається, що на промислових підприємствах є багато споживачів електричної енергії, які мають можливість обмежувати тривалість своєї роботи чи переносити її на інші години впродовж доби. Такі споживачі можуть збільшувати власне споживання електроенергії в години мінімального навантаження та зменшувати його в пікові години без суттєвого впливу на технологічний процес. Таким чином, використовуючи споживачі-регулятори для маневрування навантаженням підприємство може не тільки покращити форму добового графіка, але й зменшити небаланси електроенергії, які викликані зазначеними вище причинами. У результаті можна суттєво зменшити витрати за спожиту підприємством електричну енергію. Можливості підприємства щодо маневрування навантаженням залежать

від багатьох факторів, а саме: від характеру технологічних процесів, потужності та кількості споживачів-регуляторів тощо.

Для визначення споживачів-регуляторів та потенційної можливості промислового підприємства маневрувати своїм навантаженням у роботі [7] пропонується охарактеризувати режим роботи споживачів за такими параметрами: тривалість роботи за зміну/добу, обсяги спожитої електричної енергії за зміну/добу, тривалість циклів роботи та паузи за імпульсної роботи за зміну/добу, а також інтервали часу, коли споживача не можна відключати через обмеження технологічного процесу або режиму його роботи. Використовуючи зазначену характеристику споживачів можна визначити коефіцієнт маневрових можливостей усього підприємства або його окремих підрозділів за формулою:

$$k_M = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (T_{Pi} / 1440)}{m}, \quad (2)$$

де T_{Pi} – тривалість паузи робочого циклу i -го споживача електроенергії, хв; m – наявна кількість споживачів електроенергії.

Цей коефіцієнт дає змогу оцінити потенційну можливість підприємства або його окремого підрозділу маневрувати навантаженням задля зменшення коливань потужності, покращення форми добового графіка навантаження та зменшення небалансів електричної енергії.

Розглянемо можливість і економічну доцільність використання зазначених споживачів-регуляторів на одному з промислових підприємств м. Запоріжжя. Установлена потужність споживачів-регуляторів підприємства складає 498 кВт, коефіцієнт маневрових можливостей $k_M = 0,442$ [7]. На добовому графіку його навантаження, зображеному на рис. 1, прогнозоване споживання електроенергії не співпадає з фактичним, через що виникають додаткові витрати, пов'язані з необхідністю оплачувати погодинні небаланси. Погодинні ціни електроенергії на ринку на добу наперед, а також ціни за позитивний та негативний небаланс, які були використані в розрахунку, показано на рис. 2. У результаті проведених розрахунків визначено, що вартість добового споживання електроенергії цим підприємством складає 199 792,51 грн. Добова вартість небалансу становить 17 329,61 грн, що відповідає 8,67 % від вартості добового споживання електроенергії.

Аналізуючи погодинно фактичне та прогнозоване споживання цим підприємством електроенергії, можна виділити їхні неспівпадіння та знайти відповідні споживачі-регулятори, які можуть бути задіяні для зменшення небалансів. Так, на зображеному добовому графіку (рис. 1) спостерігається перевищення фактичного споживання над заявленим на інтервалі 3:00...4:00 години, яке можна усунути шляхом вимкнення групи споживачів сумарною потужністю 250 кВт. Зазначені вище споживачі можна ввімкнути в інший період часу, коли фактичне споживання електроенергії буде менше прогнозованого, зокрема на інтервалі часу 5:00...6:00 годин. Під час вибору таких інтервалів доцільно брати до уваги не тільки ціну електроенергії на РДН, але і відповідність величини небалансу потужності задіяних споживачів-регуляторів та їхньої можливості брати участь у маневруванні електричним навантаженням. Остання характеризується відповідним коефіцієнтом маневрування, запропонованим у [7], який враховує кількість хвилин {проміжок часу}, на які можна зупинити або перенести роботу споживача-регулятора без порушення технологічного процесу.

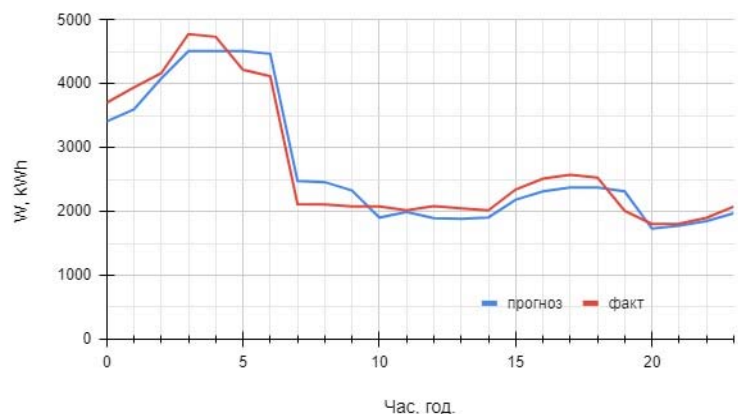


Рис. 1

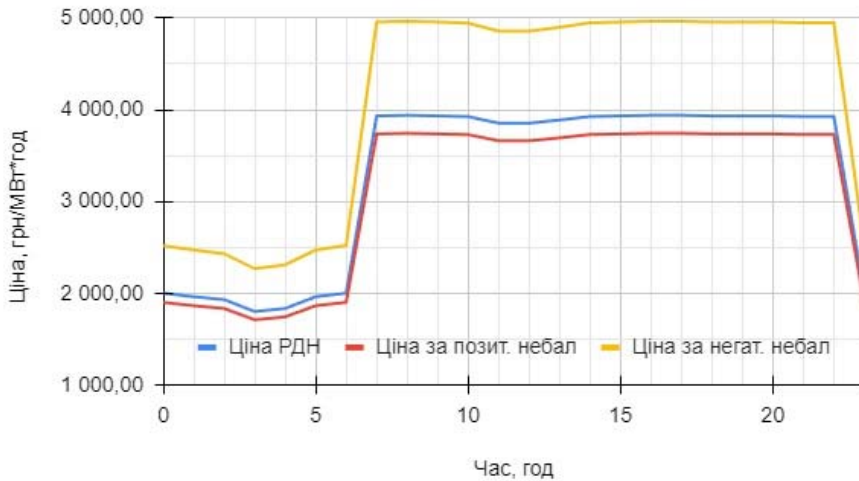


Рис. 2

сті в електричних мережах підприємства та небалансів наведено на рис. 3.

У результаті проведених аналогічних розрахунків вартість добового споживання електроенергії складає 195 920,03 грн. Добова вартість небалансу становить 12 288,70 грн, що

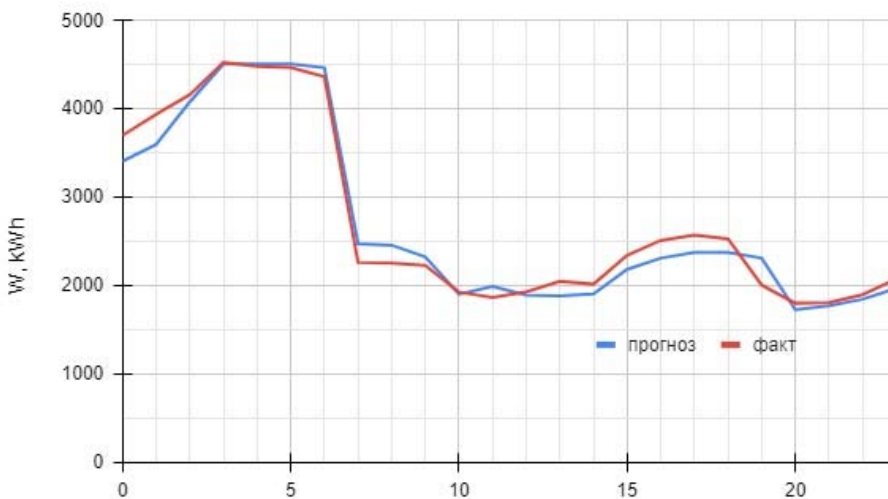


Рис. 3

го профілю навантаження підприємства з погодинними цінами на РДН, застосування його маневрових можливостей щодо запропонованого підходу.

Аналогічним чином можна забезпечити збільшення фактичного споживання до заявленого, використовуючи групу споживачів-регуляторів потужністю 150 кВт на інтервалі часу 7:00...9:00 з наступною перервою в їхній роботі на проміжку 10:00...12:00 годин.

Добовий графік навантаження в разі зазначеного використання споживачів-регуляторів для зменшення коливань потужності

відповідає 6,27 % від вартості добового споживання електроенергії. Отже, завдяки залученню споживачів-регуляторів до маневрування електричним навантаженням підприємства вартість небалансу зменшилася на 29 %, що призвело до зменшення вартості добового споживання електроенергії на 1,94 %. Ця величина може суттєво відрізнятися залежно від ступеню співпадіння вихідного

	Без маневрування навантаженням	З використанням споживачів-регуляторів
Вартість добового споживання ЕЕ, грн	199 792,51	195 920,03
Вартість добового небалансу, грн	17 329,61	12 288,70
Відсоток небалансу від добової вартості, %	8,67	6,27

Висновки. 1. Постійне зростання встановленої потужності ВДЕ, певна стохастичність споживання електроенергії, невідповідність фактичного навантаження промислових підприємств прогнозованому призводять до виникнення небалансів електроенергії та додаткових фінансових витрат для їхнього врегулювання.

2. Сьогодні недостатньо уваги приділяється можливостям промислових підприємств маневрувати своїм навантаженням задля управління піковим навантаженням та зменшення невідповідності фактичного споживання електроенергії прогнозованому.

3. Деякі споживачі електроенергії промислових підприємств мають можливість обмежувати тривалість своєї роботи або переносити її на інші години протягом доби. Залучення таких споживачів до маневрування навантаженням дає змогу вирівняти добовий графік, а також зменшити погодинні небаланси електроенергії. Для розглянутого підприємства використання таких споживачів-регуляторів дало змогу зменшити вартість небалансів на 29 %, а добову вартість споживання електроенергії – на 1,94 %.

4. За умови значно більшої потенційної можливості підприємства маневрувати своїм навантаженням та наявності у нього програмних засобів щодо формування динаміки такого маневрування вартість небалансів та добова вартість спожитої електроенергії значно зменшиться.

1. Проект Плану відновлення України. Національна рада з відновлення України від наслідків війни. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf> (Дата звернення: 03.05.2023).
2. Sun S., Dong M. and Liang B. Distributed Real-Time Power Balancing in Renewable-Integrated Power Grids With Storage and Flexible Loads, *IEEE Transactions on Smart Grid*. Sept. 2016. Vol. 7. No. 5. Pp. 2337–2349. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2445794>.
3. Gomis-Bellmunt O., Tavakoli S.D., Lacerda V.A., Prieto-Araujo. E.Grid-Forming Loads: Can the Loads Be in Charge of Forming the Grid in Modern Power Systems? *IEEE Transactions on Smart Grid*. March 2023. Vol. 14. No. 2. Pp. 1042–1055, DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3202646>.
4. Basit A., Ahmad T, Yar Ali A., Ullah K., Mufti G., Hansen AD. Flexible Modern Power System: Real-Time Power Balancing through Load and Wind Power. *Energies*. 2019. No 12(9). Pp.1710. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12091710>.
5. Sun Yalu, Ding Kun, Du Wenlu, Yang Changhai, Li Yalong. Power-balancing compensation mechanism and method for controllable load reduction. *Frontiers in Energy Research*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1037624.10.3389/fenrg.2022.1037624>.
6. Panda S., Mohanty S., Rout P.R., Sahu B.K., Bajaj M., Zawbaa H.M., Kamel S.. Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 3727–3766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.300>.
7. Качан Ю. Г., Шрам О. А. Оцінка маневрових можливостей електронавантажень промислових підприємств. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. Вип. 2 (58). С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.17-23>.

ASSESSMENT OF THE ECONOMIC FEASIBILITY OF LOAD MANEUVERING BY INDUSTRIAL ENTERPRISES TO REDUCE THE COST OF CONSUMED ELECTRICITY

Yu.G. Kachan, O.O. Shram, K.O. Bratkovska

Zaporizhzhia Polytechnic National University,
Zhukovsky str., 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine

e-mail: alexshrum@yahoo.com, bratkovskaja@gmail.com

The purpose of the study is to assess the economic feasibility of load maneuvering by industrial enterprises to reduce the cost of consumed electricity. To achieve this goal, calculations of the cost of daily electricity consumption and the daily cost of imbalances for an industrial enterprise in Zaporizhzhia were made. The growth of renewable energy generation and the mismatch between the estimated electricity consumption and the actual consumption lead to imbalances and, as a result, additional financial costs to cover them. At the same time, industrial enterprises have consumers who can maneuver their load to level daily electricity consumption diagrams and reduce imbalances. To assess the ability of load maneuvering by industrial enterprises and their individual subdivisions, the article proposes a maneuvering capability coefficient, which characterizes the theoretical ability of an electricity consumer to participate in the leveling of the daily load diagram and reduce electricity imbalances. As a result of the use of consumer-regulators at the enterprise, the daily cost of imbalances decreased by 29 %, and the total daily cost of electricity consumption decreased by 1.94 %. Ref. 7, fig. 3, table.

Keywords: cost of electricity, maneuvering capacity coefficient, energy market, electricity imbalance, load diagram.

1. Draft Plan for the Recovery of Ukraine. The National Council for the Recovery of Ukraine from the War. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf> (Accessed: 03.05.2023). (Ukr)

2. Sun S., Dong M. and Liang B., Distributed Real-Time Power Balancing in Renewable-Integrated Power Grids With Storage and Flexible Loads, *IEEE Transactions on Smart Grid*. Sept. 2016. Vol. 7. No. 5. Pp. 2337–2349. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2445794>.
3. Gomis-Bellmunt O., Tavakoli S.D., Lacerda V.A., Prieto-Araujo E..Grid-Forming Loads: Can the Loads Be in Charge of Forming the Grid in Modern Power Systems? *IEEE Transactions on Smart Grid*. March 2023. Vol. 14. No. 2. Pp. 1042–1055, DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3202646>.
4. Basit A., Ahmad T., Yar Ali A., Ullah K., Mufti G., Hansen AD.. Flexible Modern Power System: Real-Time Power Balancing through Load and Wind Power. *Energies*. 2019. No 12(9). P. 1710. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12091710>.
5. Sun Yalu, Ding Kun, Du Wenlu, Yang Changhai, Li Yalong. Power-balancing compensation mechanism and method for controllable load reduction. *Frontiers in Energy Research*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1037624.10.3389/fenrg.2022.1037624>.
6. Panda S., Mohanty S., Rout P.K., Sahu B.K., Bajaj M., Zawbaa H.M., Kamel S. Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 3727–3766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.300>.
7. Kachan Yu.G., Shram O.A. Estimation of the electrical loads' maneuvering capabilities of industrial enterprises. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*. 2022. Vol. 2 (58). Pp. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.17-23>. (Ukr)

Надійшла: 12.06.2023
Прийнята: 27.06.2023

Submitted: 12.06.2023
Accepted: 27.06.2023