

РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СЕРЕД СПОЖИВАЧІВ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ЖИТЛОВОГО СЕКТОРУ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Анотація. В результаті проведеного аналізу принципів роботи енергетичного ринку України, її енергосистеми, факторів впливу на формування електричного навантаження було сформовано математичне формулювання задачі та критеріїв розподілу електричної енергії, обрано метод оптимального розподілу електричної енергії між споживачами в умовах обмежень енергосистеми.

Ключові слова: енергосистема, розподільні мережі, багатокритеріальна оптимізація, функціонально-вартісний аналіз, числові методи оптимізації, блекаут, графіки електричних навантажень, середньоквадратична похибка.

Вступ. Після масштабних ракетних ударів по українській енергетиці з боку російського агресора в багатьох регіонах країни застосовувались і застосовуються обмеження електропостачання споживачам з метою балансування та стабільної роботи всієї електромережі. Станом на березень 2023 року збитки енергетиці України оцінюються [1] в 6,49 мільярдів доларів, пошкоджені лінії електропередач, електростанції або розподільчі підстанції, сотні промислових та енергоємних споживачів пошкоджені або повністю знищені, а мільйони мешканців держави мігрувало за кордон або стали внутрішньо переміщеними особами.

Всі ці фактори дуже негативно вплинули на генерацію, споживання і розподіл електричної енергії. З жовтня 2022 року по січень 2023 року енергетична система України могла надати дуже обмежений енергоресурс споживачеві і була значна проблема в балансуванні та стабілізації системи. При перевантаженні, небалансуванні споживання відбувається падіння частоти мережі, що може призвести до повного знеструмлення системи – блекауту. На подолання таких наслідків необхідні тижні і величезні затрати коштів. Питання енергетичної безпеки, а особливо забезпечення об'єктів критичної інфраструктури та військової промисловості є надважливим для держави.

На період квітня-травня 2023 року об'єднана енергосистема (ОЕС) України має перетоки від 1 до 10 МВт*год [2] з країнами ЄС, тобто енергія експортується. Але ситуації в ОЕС при яких відбуваються обмеження виникають час від часу у різних регіонах України і перед операторами передачі/розподілу постає задача оптимального розподілу ресурси, який має бути прозорим, недискримінуючим, обґрунтований техніко-економічними показниками.

Задача розподілу електричної енергії між споживачами зводиться до розподілу ресурсу (P , W) між споживачами таким чином, щоб в результаті досягався мінімум втрат для системи в цілому.

Мета та завдання. Мета – підвищення рівня ефективності споживання електричної енергії промисловістю та підприємствами різних категорій в умовах обмежень енергосистеми. Завдання: огляд стану енергосистеми України та принципи роботи енергетичного ринку, аналіз факторів впливу на формування електричного навантаження споживачами електричної енергії, визначення та оцінка критеріїв розподілу електричної енергії в умовах обмежень енергосистеми, аналіз та вибір методів розподілу енергоресурсу між споживачами електричної енергії.

Матеріал та результати дослідження. Системою передачі від виробничих потужностей до операторів систем розподілу (обленерго) керує оператор системи передачі НЕК «Укренерго» (ОСП), у володінні якого є відповідні мережі та обладнання: високовольні лінії електропередачі (ЛЕП), трансформаторні підстанції (ТП), підстанції (ПС) тощо. Розподіл електричної енергії здійснюють оператори систем розподілу (ОСР) через відповідне обладнання: лінії електропередачі (ЛП), кабельні лінії електропередачі (КЛ), ТП, розподільні підстанції (РП) та інше.

Споживачі електроенергії. Вони є невід'ємною складовою будь-якої електромережі – оскільки специфіка галузі полягає у тому, що у певний момент часу виробляється, передається та

розподіляється рівно стільки ж електрики, скільки й споживається. Тобто відбувається балансування ринку попиту й пропозиції.

ОСР отримують вироблену електричну енергію через високовольтні мережі та обладнання ОСП. За допомогою власних електромереж розподіляють, трансформують та передають електроенергію до точки під'єднання споживача. При цьому параметри якості електричної енергії у точці під'єднання споживача (а саме рівень напруги та її коливання) мають відповідати вимогам державного стандарту ДСТУ EN 50160:2014 [3].

Згідно Закону України «Про ринок електричної енергії» [4] регламентується діяльність, обов'язки операторів в тому числі в умовах військового стану. Але під час кризової ситуації наприкінці 2022 року було допущено ряд порушень збоку ОСР щодо необґрунтованого розподілу електричної енергії між споживачами, що показує необхідність покращення алгоритму прийняття рішень в енергетиці в екстрених умовах.

Відповідно до постанови НКРЕКП від 26.03.2022 № 349 [5] щодо захисту інформації, у тому числі щодо об'єктів критичної інфраструктури, у період воєнного стану доступ до інформації обмежений. Але інформація щодо рівня генерації (рис. 1) та споживання (рис.2) електричної енергії наявна в Міжнародному енергетичному агентстві [6]. З графіків чітко видно як 2022 рік в ОЕС вибивається зі статистики і рівень споживання та генерації електричної енергії зменшилась практично на 7 ГВт за добу у порівнянні з аналогічним періодом в 2021 році.

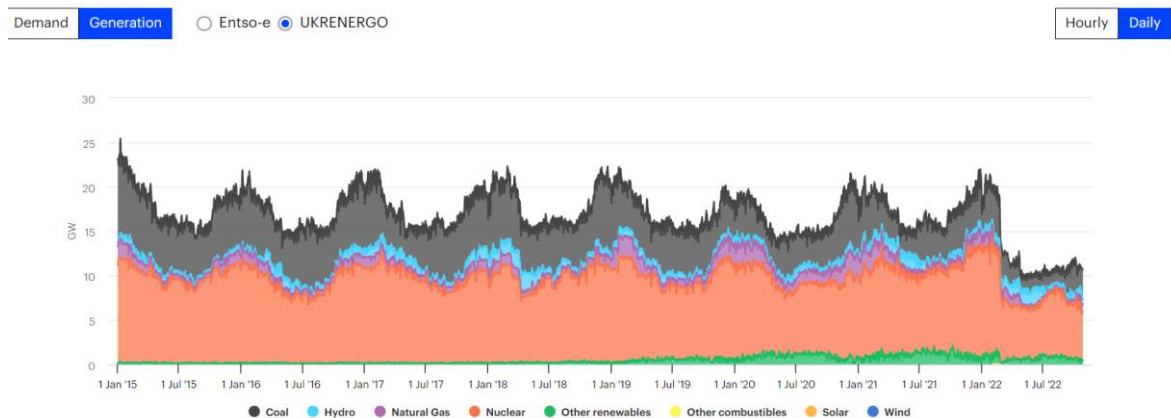


Рисунок 1 – Графік рівня генерації електричної енергії в період з 1 січня 2015 р. по 27 жовтня 2022 р.

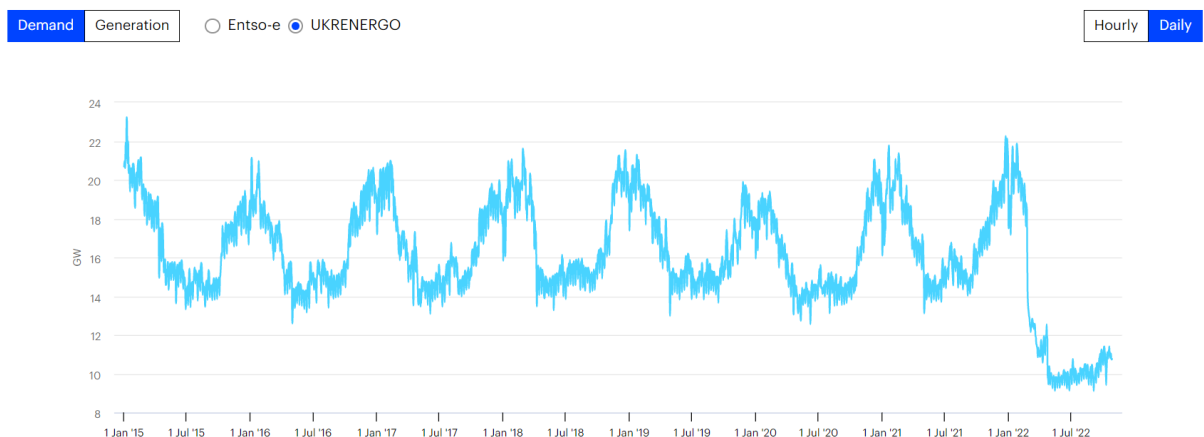


Рисунок 2 – Графік рівня споживання електричної енергії в період з 1 січня 2015 р. по 27 жовтня 2022 р.

Основні фактори, що впливають на рівень споживання енергоресурсу можна поділити на наступні категорії: сезонні фактори впливу, економічно-політичні та екстрені.

До сезонних факторів впливу належать час доби, тривалість світлового дня, пора року, температура навколишнього середовища, а з боку генерації енергії ГЕС – рівень поводків. Тим менша температура навколишнього середовища – тим більше енергії потрібно на обігрів приміщень, на приведення електроприводів чи інших електричних машин до робочої температури. А в жарку пору

року на більшості підприємств необхідно підтримувати комфорт для персоналу температуру і витрачати дещо більше електричної енергії. Великий вплив має і тривалість світлового дня, адже необхідно освітлювати робочі поверхні та приміщення, дороги, вулиці. Тому існують години-піки споживання електричної енергії які досягають максимальних значень у зимовий період.

Оператори мають балансувати графіки як і добового навантаження, так і місячного, опираючись на прогнозовані показники. Згідно з законом «Про енергетичний ринок» в ОЕС діє як внутрішньодобовий ринок так і ринок «на добу наперед», а також є певна пропускна спроможність міждержавних перетинів, що дозволяє не лише гнучко регулювати рівень споживання, а як імпортувати енергію у часи піку, так і експортувати у період спаду. Але внаслідок значного відхилення у прогнозуванні показників навантаження внаслідок перевищення рівня споживання окремими учасниками ринку відносно їх заявленого рівня може виникнути короточасний дефіцит електричної енергії.

Особливою проблемою для енергосистеми України є в першу чергу аварійні та екстрені ситуації – пошкодження лінії чи підстанції 110 кВ і вище, окупація виробника енергії (Запорізька АЕС забезпечувала до 10% нашого ринку) призводить до різкого і відносно тривалого обмеження енергосистеми і не всі заявки споживачів можуть бути задоволені повністю. Ситуація ускладнюється тим, що побутові споживачі часто нехтують рекомендаціями ОСР щодо зменшення споживання енергії у такі періоди у холодну пору року і підключають електрообігрівальні прилади та інші енергоємні побутові споживачі.

В рамках поставленої задачі розглянемо наступну модель: Система розподілу ресурсів електричної потужності й енергії включає в себе ОСП, ОСР, електропостачальника і кінцевого споживача. В кожний плановий період ОСП має у розпорядженні запас ресурсу P , W в кількості R , який видає кожному споживачеві в кількості, відповідно до запиту на ресурс s_i , і з урахуванням коефіцієнту пріоритетності надання електричної енергії k_i .

Ефективність використання енергоресурсу споживачем характеризується функцією $F_i(s_i, k_i)$, яка виражає збиток i -го споживача від недоотримання ресурсу $s_i = P$ або $s_i = W$. Мета оптимізації полягає в зведенні до мінімуму сумарного збитку системи F ;

$$F = \sum_{i=1}^n (S_i, k_i) \rightarrow \min \quad (1)$$

В роботі пропонується розділити задачу на 3 рівні. Перший це рівень ОСП – ОСР, коли НЕК «Укренерго» за наявною інформацією про дефіцит розділяє його між «обленерго». Другий – ОСР – електропостачальник, а третій – електропостачальник – споживач. Для кожного рівня формується свої критерії розподілу які зводяться до коефіцієнту пріоритетності надання електричної енергії. Вагу того чи іншого критерію пропонується визначити за рахунок функціонально-вартісного аналізу. Метод включає в себе експертні оцінки і шкалу до їх приведення, що дозволяє зменшити вплив несуттєвих критеріїв, при цьому не виключаючи останні.

Оцінки, отримані від експертів, можуть розглядатися як випадкова змінна, розподіл якої відображає думки фахівців про ймовірність того чи іншого результату події (ознака). Тому для аналізу розкиду та узгодженості експертних оцінок застосовуються узагальнені статистичні характеристики середніх та заходи розкиду. Не зупиняючись на визначенні середніх величин, розглянемо деякі заходи розкиду розподілів, використання яких є дуже корисним під час аналізу узгодженості експертних оцінок – середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт варіації та коефіцієнт конкордації.

Коефіцієнт конкордації W може змінюватися від 0 до 1, причому його рівність одиниці означає, що всі експерти дали однакові оцінки щодо всіх характеристик, а рівність нулю означає, що зв'язки між оцінками, отриманими від різних експертів не існує. У випадках, коли будь-який експерт не може встановити рангову різницю між декількома суміжними характеристиками і надає їм однакові ранги, розрахунок коефіцієнта конкордації провадиться за формулою:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \{ \{ \sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{1}{2} \cdot m(n+1) \}^2 \}}{\frac{1}{12} \cdot m^2(n^3 - n) - m \cdot \sum_{j=1}^e (\frac{1}{12} \cdot \sum_{k=1}^f (t_k^3 - t_k))} \quad (2)$$

де, e – кількість рядків, що містяться зв'язані ранги, f – число типів зв'язаних рангів в рядку, t – кількість рівних рангів в j -ому рядку, x_{ij} – варіанти оцінки критерію, m – кількість експертів.

На основі отриманого значення пріоритетності надання електричної енергії k_i споживача того чи іншого рівня методом зворотних пріоритетів визначається розподіл електричної енергії між споживачами.

Висновки. У ситуації дефіцитної енергосистеми, завдання розподілу активної електричної потужності та енергії є особливо актуальною, і може бути вирішена за рахунок застосування математичних апаратів і методів розподілу енергоресурсу. У цих умовах запропонований метод поділу на рівні, визначений коефіцієнт пріоритетності надання електричної енергії завдяки функціонально-вартісному аналізу, а задача розподілу рекомендується вирішити методом зворотних пріоритетів. При чому необхідно враховувати те, що критерії є змінними величинами.

Перелік посилань

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України за рік від початку повномасштабного вторгнення. *Київська школа економіки*, Березень 2023. 50 с. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/03/UKR_Feb23_FINAL_Damages-Report.pdf (дата звернення: 13.05.2023)
2. Інформація щодо обсягу експорту імпорту в розрізі країн постачання та порівняння цін DAM (РДН) у країнах Європейського Союзу. *Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг*: веб-сайт. URL: <https://www.nerc.gov.ua/monitoring-rinku-elektrichnoyi-energiyi/operativnij-monitoring-rinku-elektrichnoyi-energiyi/informaciya-shchodo-zdijsnennya-importueksportu-elektrichnoyi-energiyi/informaciya-shchodo-obsyagu-eksportu-importu-v-rozrizi-krayin-postachannya-ta-porivnyannya-cin-dam-rdn-u-krayinah-yevropejskogo-soyuzu> (дата звернення: 13.05.2023)
3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. [Чинний від 2014-10-01]. Київ, 2014, 32 с. (Інформація та документація). URL: https://chernihivoblenergo.com.ua/files/consumer/law_docs/ДСТУ%20EN%2050160-2014-1.pdf (дата звернення: 13.05.2023)
4. Про ринок електричної енергії: Закон України від 22 вересня 2016 р. №4493 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2019-19#n897> (дата звернення: 13.05.2023)
5. Про внесення змін до постанови Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, від 26 березня 2022 року № 349: Постанова від 20 квітня 2022 р. № 384. *Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг*: веб-сайт. URL: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vnesennya-zmin-do-postanovi-nacionalnoyi-komisiyi-shcho-zdijsnyuye-derzhavne-regulyuvannya-u-sferah-energetiki-ta-komunalnih-poslug-vid-26-bereznia-2022-roku-349> (дата звернення: 13.05.2023)
6. Ukraine Real-Time Electricity Data Explorer. *International Energy Agency*: веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ukraine-real-time-electricity-data-explorer> (дата звернення: 13.05.2023)

Науковий керівник: д.т.н. проф. Розен В. П.

A. Gorobets¹, student

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract. As a result of the analysis of the principles of operation of the energy market of Ukraine, its energy system, factors affecting the formation of electric load, a mathematical formulation of the problem and criteria for the distribution of electric energy was formed, and a method of optimal distribution of electric energy between consumers in conditions of energy system limitations was chosen.

Keywords: power system, distribution networks, multicriteria optimization, functional cost analysis, numerical optimization methods, blackout, graphs of electric loads, root-mean-square deviation.