

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАКУПІВЛІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПОТУЖНИМИ СПОЖИВАЧАМИ З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРІВ РИЗИКУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ІГОР

Вінницький національний технічний університет

Анотація

З розвитком відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та ухваленням низки стратегічних документів, спрямованих на прискорення переходу до сталої енергетики в Україні та в Європі, споживання електроенергії з відновлюваних джерел стало важливим фактором у забезпеченні ефективності промислового виробництва та позитивного іміджу компаній. Однак, з огляду на ризики, пов'язані з нестабільністю виробництва електроенергії з ВДЕ, а також змінним споживанням і, як наслідок, зміною цін на ринку електроенергії, забезпечення мінімальних витрат на електропостачання промислових споживачів є складним завданням перспективного планування й оперативного управління. У доповіді для розв'язання цієї задачі використовується модель некооперативної гри між постачальниками електроенергії різних типів на верхньому рівні та оптимізацією вартості купівлі електроенергії великими споживачами на нижньому рівні. На основі концепції вартості з ризиком запропоновано алгоритм прямих закупівель електроенергії великими споживачами з урахуванням невизначеності цін на спотовому ринку. Результати дослідження показали, що великі споживачі можуть знизити витрати на купівлю електроенергії, комбінуючи операції довгостроковому, середньостроковому та спотовому ринках електроенергії. Зменшення ризику під час купівлі енергії з відновлюваних джерел для великих споживачів пов'язане з переходом від спотового ринку до середньострокового, довгострокового ринку або ринку опціонів на електроенергію.

Ключові слова: теорія ігор, очікувана корисність, пряма купівля електроенергії, енергетичні ринки.

Abstract

With the development of renewable energy sources (RES) and the adoption of a number of strategic documents aimed at accelerating the transition to sustainable energy in Ukraine and in Europe, the consumption of electricity from renewable sources has become an important factor in ensuring the efficiency of industrial production and the positive image of companies. However, given the risks associated with the instability of RES electricity production, as well as variable consumption and, as a consequence, changing prices on the electricity market, ensuring minimum costs of electricity supply to industrial consumers is a challenging task of forward planning and operational management. In the paper, a non-cooperative game model between different types of electricity suppliers at the upper level with optimization of the cost of electricity purchase by large consumers at the lower level is used to solve this problem. Based on the concept of cost with risk, an algorithm for direct purchase of electricity by large consumers is proposed, taking into account the uncertainty of spot market prices. The results show that large consumers can reduce their power purchase costs by combining power purchase operations in the long-term, medium-term and spot power markets. Risk reduction in renewable energy purchases for large consumers is associated with shifting from the spot market to the medium-term, long-term market or the electricity options market.

Keywords: game theory, expected utility, direct purchase of electricity, energy markets

Вступ

Через розвиток індустріалізації та урбанізації викиди вуглекислого газу за останні 50 років істотно збільшилися. Для пом'якшення наслідків зміни клімату європейські країни, зокрема й Україна, розробили стратегічні програми, спрямовані на скорочення викидів вуглекислого газу та стимулювання розвитку відновлюваних джерел енергії.

Зі збільшенням встановленої потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) протиріччя між переходом до сталої енергетики та розвитком відновлюваної енергетики посилилося неготовністю споживачів електроенергії до роботи в нових умовах. Щоб стимулювати бажання споживати відновлювану енергію, було розроблено та введено в дію механізм гарантій споживання електроенергії з відновлюваних джерел. Реалізація політики гарантованого споживання енергії з ВДЕ передбачає реалі-

зацію споживачем наступних функцій: купівлю електроенергії на енергоринку, купівлю доступних зелених сертифікатів та купівлю надлишкового споживання (якщо закуплена електроенергія не відповідає реальному споживанню або порушено квоти на споживання «зеленої» енергії).

Щоб знизити вплив нестабільних цін на електроенергію, ринкової конкуренції та інших чинників на витрати, пов'язані з купівлею електроенергії великими споживачами, вони можуть укладати прямі договори на постачання електроенергії безпосередньо з постачальниками електроенергії, минаючи традиційний оптовий ринок електроенергії. Таким чином можливо отримувати електроенергію за нижчою ціною. При цьому, основним методом торгівлі для великих споживачів є двостороння торгівля, перевагами якої є формування ціни на електроенергію на основі побажань продавців і покупців, а також гнучкість способів торгівлі.

У процесі двосторонньої торгівлі кожен постачальник електроенергії прагне отримати максимальний прибуток, тим самим спричиняючи некооперативну конкуренцію між постачальниками електроенергії під час її продажу електроенергії. Великі споживачі у відповідь на зміни балансу енергії, базового споживання і вартості соціальних зобов'язань прагнуть досягти мінімальної вартості купівлі електроенергії за рахунок зміни пропорцій купівлі електроенергії на основі різних ринкових механізмів. Однак, купівля електроенергії на різних ринках електроенергії передбачає різні ризики. Тому, визначати частку купівлі електроенергії на кожному ринку слід з урахуванням ринкових ризиків, що є важливим фактором, який впливає на процес прийняття рішень великих споживачів.

Існуючі дослідження, спрямовані на оптимізацію взаємодії великих споживачів з постачальниками на основі багатосторонньої моделі ринку електроенергії, часто зводяться до двосторонньої торгової моделі гри між різними учасниками ринку. У доповіді розглядається модель подвійної гри, що дає змогу більш повно врахувати взаємодії великих споживачів з декількома ринками електроенергії, а також врахувати фактори ризику під час купівлі електроенергії на різних ринках.

Результати дослідження

Для оптимізації взаємовідносин між продавцями електроенергії в [1] запропоновано кількісну модель обмеження потужності енергії ВДЕ з погляду балансу попиту і пропозиції в енергосистемі. При цьому на середньо- і довгостроковому ринку електроенергії та на ринку на добу наперед розглядаються витрати на купівлю електроенергії, виторг від продажу електроенергії, вартість оцінки відхилень і ризик купівлі та продажу електроенергії для енергозбутової компанії.

У [2] запропоновано двошарову модель стохастичної оптимізації для формування оптимальних стратегій віртуальних торгів для роздрібного продавця електроенергії на балансуєчому ринку електроенергії. Для формування стратегії взаємодії між продавцями електроенергії та споживачами в [3] запропоновано метод поліпшення портфеля Марковіца на основі вартості з урахуванням ризику. Автори досліджували оптимальні стратегії закупівель для операторів систем розподілу та роздрібних продавців електроенергії в умовах дерегульованих ринків електроенергії.

У [4] запропоновано дворівневу ігрову оптимізаційну модель для торгів між постачальниками зеленої та теплової енергії на основі RPS (Rock-Paper-Scissor) і прямої купівлі електроенергії великими споживачами. Автори запропонували розв'язання оптимізаційної задачі ухвалення рішень про торги кількох постачальників електроенергії та угоди прямої купівлі електроенергії кількома великими споживачами.

У [5] запропоновано використовувати некооперативну модель Штакельберга для вивчення характеристик реагування на попит з боку декількох типів споживачів відповідно до принципів споживчої психології. Було оцінено вплив коливань навантаження мережі на прибуток енергопостачальних компаній. Отримано рівноважний розв'язок моделі за Нешем за допомогою алгоритму NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) і проведено аналіз чутливості коефіцієнтів кореляції.

У [6] запропоновано оптимальний механізм взаємодії для трьох суб'єктів ринкових взаємовідносин: державних контролюючих органів, постачальників і споживачів електроенергії. Для розв'язання задачі запропоновано дворівневу гру Штакельберга. Показано існування та єдиність рівноваги Штакельберга. Наведено оптимальні стратегії взаємодії для кожного учасника.

Таким чином, у більшості поточних досліджень розглядаються різні ринки електроенергії та умови стимулювання споживання енергії ВДЕ великими споживачами. При цьому не аналізується механізм торгівлі надлишковим споживанням на балансуєчому ринку за результатами прямої купівлі електроенергії великими споживачами. Запровадження механізму торгівлі надлишковим споживан-

ням відновлюваної енергії, врахування зміни тарифів на відновлювану енергію, цін на зелені сертифікати та обмежень споживання вплинуть на вартість і ризики великих споживачів. Тому розробка стратегії купівлі та продажу електроенергії в таких умовах є актуальною для промислових споживачів.

У доповіді розглядається подвійна ігрова модель для прямої купівлі електроенергії великими споживачами. Запропоновано модель конкурентної некооперативної гри між кількома постачальниками електроенергії, у якій кожен постачальник електроенергії формулює стратегію торгів і прагне виділитися серед кількох постачальників електроенергії, щоб отримати більший прибуток від реалізації електроенергії великим споживачам. Модель гри будується за принципом «ведучий-ведений» між кількома постачальниками електроенергії та кількома великими споживачами. Тут кожен постачальник електроенергії прагне збільшити прибуток від продажу електроенергії і коригує свої торги, щоб стимулювати купівлю електроенергії великими споживачами. Споживачі ж формулюють стратегії купівлі електроенергії на основі торгів з постачальниками, щоб мінімізувати свої витрати і виконати внутрішні або директивні вимоги щодо споживання відновлюваної електроенергії.

На рисунку 1 показано архітектуру взаємовідносин між учасниками ринку після прямої купівлі електроенергії великими споживачами з урахуванням стимулювання споживання електроенергії з ВДЕ.

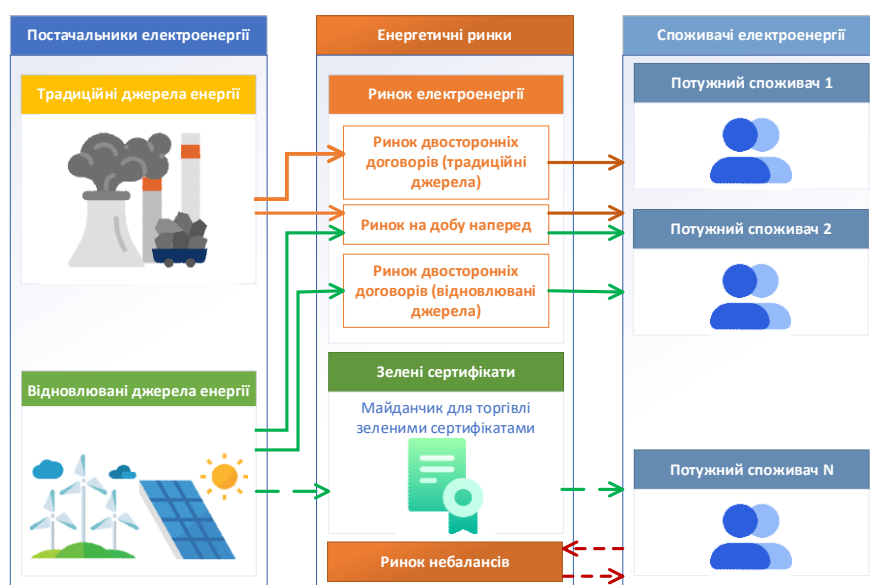


Рисунок 1. Транзакційні відносини між учасниками ринку

Для оптимізації стратегій учасників запропоновано подвійну гру, яка включає:

1. (Внутрішня гра). Кілька постачальників електроенергії та кілька великих споживачів утворюють ігрові відносини «ведучий - ведений»: постачальники електроенергії коригують ціни та пропозицію для стимулювання великих споживачів до купівлі електроенергії. Мета - максимізувати прибуток від продажу електроенергії. Великі споживачі реагують на ставки постачальників електроенергії, формуючи стратегії купівлі електроенергії, і торгують на ринку зелених сертифікатів. Надлишкове споживання компенсується через балансуючий ринок з метою забезпечити загальний баланс електроенергії, а також виконати вимоги щодо споживання відновлюваної енергії. Мета - досягти мінімальну вартість купівлі електроенергії, вартість угоди із зеленими сертифікатами та вартість угоди з надлишковим споживанням.

2. (Зовнішня гра). Постачальники електроенергії створюють конкурентну некооперативну гру між собою та укладають двосторонні договори з великими споживачами через стратегії торгів. Кожен постачальник електроенергії прагне зробити свої торги конкурентоспроможними серед торгів інших постачальників електроенергії, щоб отримати більше контрактів на постачання електроенергії великим споживачам і максимізувати свій прибуток.

Висновки

У доповіді розглядається оптимізаційна задача прямої купівлі електроенергії великими споживачами та прийняття рішень про участь у торгах кількох постачальників електроенергії в контексті ваги відповідальності за споживання електроенергії з відновлюваних джерел. Розглядається застосування подвійної ігрової оптимізаційної моделі участі постачальників «зеленої» та традиційної електроенергії в торгах для прямої купівлі електроенергії великими споживачами.

За результатами досліджень показано, що у разі формування двосторонніх угод щодо прямої купівлі електроенергії великими споживачами, постачальники енергії можуть збільшити свої доходи завдяки власних торгів (торгів між постачальниками). Великі споживачі можуть зменшити витрати на закупівлю електроенергії та зменшити свою залежність від ринку на добу наперед.

Пропозиції постачальників електроенергії в основному залежать від ціни на спотовому ринку та попиту на електроенергію з боку великих споживачів. Вибір обґрунтованої ціни для забезпечення власної частки контрактованої електроенергії є визначальним фактором для максимізації доходу.

Через стимулювання споживання електроенергії з ВДЕ постачальники зеленої електроенергії збільшуватимуть торги, щоб отримати найвищий дохід. Постачальники «зеленої» електроенергії з сертифікатами гарантій походження та електроенергією мають вищу контрактну ціну в конкурентному середовищі. Але через вищі темпи зростання граничних витрат для споживачів (вартість електроенергії з урахуванням вартості сертифікату), остаточна вартість проданої електроенергії за такими контрактами буде нижчою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yang Jiajia, Zhao Junhua, Luo Fengji, Wen Fushuan, Dong Zhao Yang. Decision-Making for Electricity Retailers: A Brief Survey[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5).
2. Wu C, Zhao Q, Xi M. A retailer-supplier supply chain model with trade credit default risk in a supplier-Stackelberg game[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017,112.
3. Yin Linfei, Li Shengyuan, Gao Fang. Equilibrium Stability of Asymmetric Evolutionary Games of Multi-Agent Systems With Multiple Groups in Open Electricity Market[J]. IEEE Access, 2020,8.
4. LI Fei, LI Xianshan, LU Mingfang, ZHANG Lei. Optimization model of direct power purchase game between power producers and large users taking into account the quota assessment constraint[J]. High Voltage Technology, 2023, 49(01):128-137
5. Qing L, Yufeng Z. A multi-objective optimization model considering users' satisfaction and multi-type demand response in dynamic electricity price[J]. Energy, 2022, 240.
6. Bo S, Mingzhe L, Fan W, et al. An incentive mechanism to promote residential renewable energy consumption in China's electricity retail market: A two-level Stackelberg game approach[J]. Energy, 2023, 269.

Стружко Ірина Геннадіївна – студентка групи *1ЕСМ-21б*, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: strujko_ira@gmail.com

Кулик Володимир Володимирович – докт. техн. наук, професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua

Iryna Strujko – student of group *1ESM-21b*, Faculty of Electric Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: strujko_ira@gmail.com

Volodymyr Kulyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua