

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ
ІМ. Г.Є. ПУХОВА**

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

ЄВДОКІМОВ ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 004.94 : 621.311.001.57

**ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ
В ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні
методи
(технічні науки)

Галузь знань – інформаційні технології
Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____В.А.Євдокімов

Науковий консультант - Борукаєв Зелімхан Харитонович,
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Євдокімов В.А. Методи та засоби комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу ціноутворення в організаційно-технічних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки). – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України, Київ, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу функціонування складної організаційно-технічної системи (СОТС) ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації інформаційно-технологічного забезпечення всебічного дослідження процесу ціноутворення та утворення нових механізмів управління СОТС ціноутворення.

У дисертації викладено отримані результати огляду й аналізу досліджень процесу ціноутворення. Визначено, що складна система управління ціноутворенням на ринку електричної енергії належить до числа централізованих, динамічних, розподілених СОТС і є ієрархічно побудованою, багаторівневою, багатoeлементною (мультиагентною), територіально розподіленою системою, яка складається з множини підсистем і елементів, взаємопов'язаних між собою вертикально та горизонтально системоутворювальними зв'язками.

Розглянуто сучасний стан досліджень загальної проблеми математичного та комп'ютерного моделювання процесу формування цін у СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації інформаційно-технологічного забезпечення розв'язання завдань із моделювання й обчислення в процесі ціноутворення

в умовах енергетичного переходу, пов'язаного з упровадженням сучасних вимог концепції Smart Grid, зокрема декарбонізації, децентралізації, діджиталізації до електроенергетичних систем. У процесі дослідження віокремлено коло науково-практичних проблем функціонування сучасних систем ціноутворення на ринку електричної енергії (ЕЕ).

Обґрунтовано на основі проведення аналізу публікацій, що актуальною є науково-прикладна проблема розроблення методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу функціонування СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації та оптимізації процесів підготовки та використання моделюючих систем як носіїв моделей СОТС, організації інформаційно-технологічного забезпечення всебічного дослідження процесу ціноутворення та впровадження нових механізмів управління.

Запропоновано підхід для складання математичного опису процесів ціноутворення в СОТС ринку ЕЕ з урахуванням реальних особливостей організаційної, технологічної та інформаційної взаємодії суб'єктів ринку, особливістю якого є декомпозиція подання процесу ціноутворення у вигляді сукупності взаємопов'язаних підсистем фізичного й економічного потокорозподілу, що складені з різних за кількісним складом множин елементарних вузлів, сформованих із вузлових точок трансформації енергії, які одночасно стають локальними вузлами ціноутворення.

Розроблено мультиагентне подання процесу ціноутворення, зокрема здійснено функціональний опис агентів, побудовано архітектуру агента в мультиагентній системі, побудовано мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення.

Розроблено агентно-орієнтовану архітектуру комунікаційного середовища взаємодії агентів у процесі ціноутворення у вигляді сукупності множин автономних агентів, агентів навколишнього середовища, агентів

зовнішнього середовища в єдиному просторі у складі системи управління й координації, системи комунікації й математичного та інформаційно-технологічного забезпечення.

Запропоновано метод аналізу вузлової трансформації процесу ціноутворення та метод оцінювання результатів сполучення ринків ЕЕ «на добу наперед» України з європейськими країнами. Наведено приклади їх застосування для розв'язання завдань щодо аналізу й дослідження особливостей процесу формування цін на ринку ЕЕ.

Побудовано комп'ютерні моделі розв'язання оптимізаційної задачі щодо моделювання рівноважного стану сегмента ринку «на добу наперед» задля визначення рівноважної ціни електроенергії на підставі цінкових заявок виробників та постачальників, процесу підготовки пропозицій ТЕС на підставі розрахунку ціни та обсягів на аукціон сегмента ринку «на добу наперед».

Розроблено засоби інформаційно-технологічного забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесу ціноутворення, запропоновано програмно-апаратне середовище, яке ґрунтується на утворенні в складі системи структурних програмних модулів з інформаційно-моделюючої та інформаційно-розрахункової підсистем, а водночас спрямоване на розроблення нових підсистем.

Наведено приклади практичного використання теоретичних результатів із розроблення математичних моделей та комп'ютерної системи моделювання.

Ключові слова: агент, алгоритм, інформаційно-технологічне забезпечення, комп'ютерна модель, математична модель, комп'ютерна система моделювання, мультиагентна система, процес ціноутворення, ринок електроенергії, складна організаційно-технічна система.

ABSTRACT

Evdokimov V.A. Methods and means of computer modeling of the multi-agent pricing process in organizational and technical systems. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods (technical sciences). – Institute of Modeling Problems in Energy named after G.E. Pukhov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and applied problem of developing methods of mathematical and computer modeling of the multi-agent process of the functioning of a complex organizational and technical system (SOTS) of pricing, software and hardware of a computer modeling system for the organization of information and technological support for a comprehensive study of the pricing process and introduction of new management mechanisms of SOTS pricing.

The results are presented in the dissertation review and analysis of studies of the pricing process. It was determined that the complex system of pricing management in the electricity market belongs to the number of centralized dynamic distributed SOTS and is a hierarchically built multi-level multi-element (multi-agent) territorially distributed system, which consists of a set of subsystems and elements interconnected vertically and horizontally by system-forming connections .

The current state of research on the general problem of mathematical and computer modeling of the process of price formation in the SOTS of pricing, software and hardware of the computer modeling system for the organization of information and technological support for solving modeling and calculation problems in the process of pricing in the conditions of the Energy transition, related with the application of modern requirements of the concept Smart Grid ,

namely decarbonization, decentralization, digitalization of electric energy systems. A separate set of scientific and practical problems of the functioning of modern pricing systems on the electricity market.

It is substantiated on the basis of the analysis of publications that the scientific and applied problem of developing methods of mathematical and computer modeling of the multi-agent process of the operation of the SOTS pricing, software and hardware of the computer modeling system for the organization and optimization of the processes of preparation and use of modeling systems as model carriers is justified SOTS, the organization of information technology support for a comprehensive study of the pricing process and the introduction of new management mechanisms.

An approach is proposed for compiling a mathematical description of pricing processes in the SOTS of the EE market, taking into account the real features of the organizational, technological and informational interaction of market subjects, a distinctive feature of which is the decomposition of the presentation of the pricing process in the form of a set of interconnected subsystems of physical and economic flow distribution, consisting of different in quantitative composition of sets of elementary nodes, formed from nodal points of energy transformation, and which at the same time become local nodes of price formation.

A multi-agent presentation of the pricing process was developed, namely a functional description of agents, the architecture of an agent in an integrated multi-agent system, a multi-agent simulation model of the pricing process was built.

An agent-oriented architecture of the communication environment of the interaction of agents in the pricing process has been developed in the form of a set of autonomous agents, environment agents, and external environment agents in a single space as part of the management and coordination system, the communication system and mathematical and information technology support.

A method of analyzing the nodal transformation of the pricing process and a method of evaluating the results of the "day-ahead" electricity markets of Ukraine and European countries are proposed. Examples of their application for solving the tasks of analysis and research of the peculiarities of the price formation process in the electricity market are given.

Computer models were built to solve the optimization problem of modeling the equilibrium state of the market segment "a day ahead" in order to determine the equilibrium price of electricity based on the price bids of producers and suppliers, the process of preparing TPP offers based on the calculation of prices and volumes for the auction of the market segment "a day ahead" .

The means of information and technological support of the computer system for modeling the pricing process have been developed, and a software and hardware environment has been proposed, which is based and oriented on the formation of structural subsystems-program modules from the information-modeling and information-calculation subsystems as part of the system.

Examples of practical use of theoretical results from the development of mathematical models and computer modeling systems are given.

Keywords: agent, algorithm, information technology support, computer model, mathematical model, computer modeling system, multi-agent system, pricing process, electricity market, complex organizational and technical system.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати.

Монографії:

1. Borukaiev Z., Ostapchenko K., Chemerys O., Evdokimov V. Information Technology Platform for Automation of Decision-Making Processes by the Organizational Management System. In Power Systems Research and Operation: Selected Problems II. Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham: Collective monograph. 2023, vol 220. P.257-279. ISSN 2198-4182. ISBN 978-3-031-17553-4. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_12 (розділ колективної монографії) (Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57857542800>).

2. Євдокімов В.А. Математичне та інформаційно-технологічне забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення енергоринку. Монографія. ISBN 978-617-8126-95-7. DOI <https://doi.org/10.36074/Yevdokimov-monograph.2023> Published 30.09.2023 (особиста монографія).

Статті у фахових періодичних виданнях:

3. Євдокімов В.А., Іванов Г.А. Методи визначення обсягів та цін на електричну енергію в контрактах в умовах лібералізованого ринку. *Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”*, 2017, вип.81. С. 142-152. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Mtit_2017_81_22. (фахове видання).

4. Євдокімов В.А. Деякі питання дослідження технічного і організаційно-економічного впливу розподіленої генерації на функціонування енергосистеми та ринок електричної енергії. *Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”*, 2019, вип.88.

С. 134-143. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Mtit_2019_88_22. **(фахове видання).**

5. Ostapchenko K., Lisovychenko O., Evdokimov.V. Functional organization of system of support of decision-making of organizational management. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління»*. 2020. №1,(36). С. 17-31. ISSN 2522-9575 (Онлайн), ISSN 1560-8956 (Друк). UDC 004.89:65.011.56. <https://www.google.com.ua/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://asac.kpi.ua/article/download/209753/209815&ved=2ahUKEwjhkeXi39eGAxV4gv0NHTi-BA8QFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw2AjfGW4kVjLezdZSDOzUos> **(фахове видання).**

6. Мохор В.В., Євдокімов В.А. Створення мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2020. Том 43, №6. С. 3-17. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.003> **(фахове видання).**

7. Євдокімов В.А. Формулювання задачі побудови мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2021. Том 43, №3. С. 47-63. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.047> **(фахове видання).**

8. Євдокімов В.А. Інформаційно-моделююча система аналізу процесу ціноутворення на ринку електричної енергії. *Журнал «Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки»*. 2021. № 3. С. 10-18. ISSN:2786-4588 (Print), 2786-4596 (Online). DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.3.2> **(фахове видання).**

9. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Створення інформаційно-моделюючої системи аналізу процесів ціноутворення на

ринку електричної енергії. *Електронне моделювання*. 2021. Том 43, №4. С. 51-68. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.051> **(фахове видання)**.

10. Євдокімов В.А., Полухін А.В. Оптимізація доходу учасників ринку «на добу наперед» шляхом моделювання процесів визначення ціни на цьому ринку. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №4. С. 121-129. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.04.121> **(фахове видання)**.

11. Остапченко К.Б., Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х. Сховище оперативних даних системи підтримки прийняття рішень для організаційного управління ринком електроенергії. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №3. С. 101-112. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.03.101> **(фахове видання)**.

12. Лукашевич Я.П., Євдокімов В.А. Інформаційна система моніторингу динаміки розвитку альтернативної електроенергетики. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №5. С. 90-101. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.05.090> **(фахове видання)**.

13. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Обчислювальний метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. №5. С. 67-76. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.067> **(Scopus фахове видання категорії А)**.

14. Polukhin A., Evdokimov V. Conceptual principles of forecasting demand on the day-ahead market using changes in hourly bidded demand between previous similar days. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023) 22/05/2023 - 26/05/2023*. Kryvyi Rih, Ukraine. Volume 1254. 2023. Online ISSN: 1757-

899XPrint ISSN: 1757-8981. **(Scopus)** doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012035.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1254/1/012035/pdf>

15. Євдокімов В.А. Функціональна організація інтерфейсу користувача програмно-апаратної комп'ютерної системи Equant Cloud. *Електронне моделювання*. 2023. Том 45, №2. С. 83-94. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.02.083> **(фахове видання)**.

16. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Стан та перспективи організації децентралізованої торгівлі електроенергією на регіональному рівні. *Електронне моделювання*. 2023. Том 45, №3. С. 11-27. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.011> **(фахове видання)**.

17. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Побудова архітектури мультиагентного середовища імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2023. Том 45, №6. С. 15-30. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.06.015> **(фахове видання)**.

18. Остапченко К.Б., Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А. Методика побудови моделі оперативного прогнозування показників стану ринку електричної енергії (цін та обсягів). *Журнал «Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки»*. 2023. № 2. С. 106-117. ISSN:2786-4588 (Print), 2786-4596 (Online). DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.12> **(фахове видання)**.

19. Парус Є.В., Євдокімов В.А. Оцінка результатів сполучення ринків електричної енергії на ринку «на добу наперед». *Технічна електродинаміка*. 2024. №1. С. 69-76. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.069> **(Scopus, фахове видання категорії А)**.

20. Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б. Комп'ютерна система моделювання процесів ціноутворення на оптовому ринку

електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2024. №2. С. 72-81. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.072> (**Scopus, фахове видання категорії А**).

21. Lukashevych Y, Evdokimov V, Polukhin A, Maksymova I, Tsvilii D. Innovation In The Energy Sector: The Transition To Renewable Sources As A Strategic Step Towards Sustainable Development. *AFRICAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH*. 2024. 10(1), P. 43–56. ISSN:2408-7920 (**Scopus**). <https://doi.org/10.26437/ajar.v10i1.665>.
<https://www.ajaronline.com/index.php/AJAR/article/view/665>

Праці апробаційного характеру:

22. Євдокімов В.А. Про особливості впливу розподіленої генерації на функціонування енергосистеми. *Abstracts of I International Scientific and Practical Conference* (Kharkiv, Ukraine, 16-17 December 2019.) P. 329-334. https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2020/01/science-society-education_topical-issues-and-development-prospects_16-17.12.2019.pdf (дата звернення 13.06.2024).

23. Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х. Про особливості впливу розподіленої генерації на кібербезпеку функціонування енергосистеми. *Науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН*. Україна, Київ, 20 грудня 2019 року. С.5. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Програма-КБЕЕЦ-2019.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

24. Ostapchenko K., Lisovychenko O., Borukaev Z., Evdokimov.V. Information and Simulation System for Processes. *Analysis in the Liberalized Electricity Market. Actual trends of modern scientific research. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference*. May 9-11, 2021. Munich, Germany: MDPC Publishing. 2021. P.165-171. URL: <https://sci->

conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/05/ACTUAL-TRENDS-OF-MODERN-SCIENTIFIC-RESEARCH-9-11.05.21.pdf (дата звернення 13.06.2024).

25. Борукаєв З.Х., Лісовиченко О.І., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Information and Simulation System for Processes Analysis in the Liberalized Electricity Market. *Applied scientific and technical research. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції*. 5-7 квітня 2021р. Івано-Франківськ: Академія технічних наук України. 2021. С. 30-32 URL: http://ukrtsa.org.ua/media/docs/6-prikladni-naukovo-tekhichni-doslidzhennia/ATSU_2021.pdf (дата звернення 13.06.2024).

26. Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б. Кібербезпека організаційних і організаційно-технічних систем в енергетиці України. *Безпека енергетики в епоху цифрової Трансформації. Матеріали III науково-практичної конференції*. 22 грудня 2021року, м.Київ. 2021, Інститут проблем моделювання енергетики ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.54-60.
https://www.researchgate.net/publication/358783849_FUNKCIONALNA_SKLADOVA_BEZPEKI_ASU_TP_ZA_NIST_SP_800-82 (дата звернення 13.06.2024).

27. Євдокімов В.А. Комп'ютерна система equant cloud моделювання процесів ціноутворення на ринку електроенергії України. *Комп'ютерні системи та мережні технології: XIII Міжнародна науково-практична конференція. (CSNT 2021), Київ, 15-17 квітня 2021 року*. Національний авіаційний університет. Київ, 2021. С. 36–39.
<https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/50655/1/Євдокімов%20В.А..pdf> (дата звернення 13.06.2024).

28. Євдокімов В.А. Мультиагентні технології в дослідженнях електроенергетики у нових умовах роботи ринку електричної енергії України. *XXXIX НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова*

НАН України. Київ, 12 травня 2021. С. 10-12. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/05/Програма-конференції-2021.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

29. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Інтерфейс взаємодії з базою даних «Моделі процесів функціонування ринку електричної енергії». *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України*. Матеріали, 27 травня 2022 р. Київ. 2022. С. 70-79. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Матеріали-КБЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

30. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Кібербезпека організаційних і організаційно-технічних систем в енергетиці України. *III науково-практичної конференції, Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації (22 грудня 2021 року) ІПМЕ*. Збірник тез 2021. С. 55-61. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/12/Матеріали-КБЕЕЦ-2021-1.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

31. Лукашевич Я.П., Євдокімов В.А. Обґрунтування задачі створення бази даних об'єктів «зеленої» енергетики України для визначення складових розвитку та механізмів підтримки галузі. *XL Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, м. Київ. 11 травня 2022 р. Збірник тез ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2022. С. 65-68. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Збірник-тез-конференція-молодих-вчених-ІПМЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

32. Євдокімов В.А., Полухін А.В. Важливість прогнозування обсягів попиту на ринку «на добу наперед» в процесі моделювання визначення цінової позиції на продаж на ринку електричної енергії. *XL Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем*

модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ. 11 травня 2022 р. Збірник тез ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2022. С. 69-71. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Збірник-тез-конференція-молодих-вчених-ІПМЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

33. Борукаєв З. Х., Остапченко К. Б., Євдокімов В. А. Інтерфейс взаємодії з базою даних «Моделі процесів функціонування ринку електричної енергії». *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України 27 травня 2022 р. Київ*. Матеріали конференції. 2022. С.70-79. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Матеріали-КБЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

34. Ostapchenko K., Borukaiev Z., Evdokimov V. Information environment for the organizational management system of the electricity market. *The 10th International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects", June 25-27 2022*. SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. P.99-105. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/06/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-25-27.06.22.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

35. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Особливості побудови моделі короткострокового прогнозування електроспоживанням постачальниками на оптовому ринку електроенергії. *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України. 24 листопада 2022 року. м.Київ., 2022. С. 41-46*. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/12/Матеріали-КБЕЕЦ-2022.doc.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

36. Євдокімов В.А. Програмно-апаратна комп'ютерна система модельовання в енергетиці - «Equant Cloud». *Восьма міжнародна науково-*

технічна конференція «Модельовання і комп'ютерна графіка», 11-14 квітня 2023 року в м. Луцьк та м. Києві. Програма конференції. 2023. С.8. https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/04/MCG_2023_-_Programm_Fin.pdf (дата звернення 13.06.2024).

37. Bekmagambetova G., Polukhin A., Evdokimov V., Kasmin D., Dmytriienko O. Algorithmic means of ensuring network security and websites: trends, models, future cases. *Amazonia Investiga*. 2023 12(65), P. 149-163. (Scopus) <https://doi.org/10.34069/AI/2023.65.05.15> (дата звернення 13.06.2024).

38. Євдокімов В.А. Децентралізація ринку, як основа побудови резильєнтної енергосистеми України. *Науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України*. 21 червня 2023 року. Київ, ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2023. С. 45-47. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/06/Матеріали-конференції-Critical-Infrastructure-Resilience---2023.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

39. Євдокімов В.А., Остапченко К.Б., Цвілій Д.Р. Комп'ютерна система модельовання, як інструмент організаційного управління енергетичними ринками. *VI International Scientific and Practical Conference «Old and new technologies of learning development in modern conditions»*, 13-16 лютого 2024 р., Берлін, Німеччина. <https://isg-konf.com/old-and-new-technologies-of-learning-development-in-modern-conditions/> (дата звернення 13.06.2024).

40. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А., Цвілій Д.Р. Особливості реалізації комп'ютерної системи модельовання процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України*. 29 травня 2024 року. м.Київ., 2024. С. 86-89. <https://ipme.kiev.ua/wp->

content/uploads/2024/06/Матеріали-КБЕ-2024.pdf (дата звернення 13.06.2024).

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. Євдокімов В. А. Алгоритм функціонування фонду врегулювання вартісного дисбалансу / Євдокімов В.А., Комова С.К., Вишинський О.С. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 6. – С. 29-42.

2. А.С. 74797. Україна. Комп'ютерна програма «Платформа алгоритмічного моделювання для учасників ринку електричної енергії «Equant Cloud»». Євдокімов В.А., Іванов Г.А.; дата реєстрації 17 листопада 2017 р. №112221; заявл.18.09.2017; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.

3. А.С. 112221 Україна. База даних «Моделі процесів функціонування ринку електроенергії». Євдокімов В.А., Остапченко К.Б., Борукаєв З.Х.; дата реєстрації 9 березня 2022 р. №112221; опубл. URL: <https://sis.ukrpatent.org>.

4. А.С. 115332 Україна. Науковий твір «Математична модель рівноваги на ринку електроенергії «на добу наперед» .Саух С.Є, Євдокімов В.А.; дата реєстрації 17 жовтня 2022 р. №115332; опубл. URL: <https://sis.ukrpatent.org>

5. А.С. 115256 Науковий твір «Обчислювальний метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії». Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б.; дата реєстрації 13 жовтня 2022 р. № 115256; опубл. URL: <https://sis.ukrpatent.org>.

6. А.С. 119846 Науковий твір «Алгоритм розрахунку прогнозу погодинного попиту на ринку «на добу наперед». Євдокімов В.А.; дата реєстрації 19 червня 2023 р. №119846; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.

7. А.С. 119898 Комп'ютерна програма «Алгоритм розрахунку прогнозу погодинного попиту на ринку електричної енергії «на добу наперед». Євдокімов В.А., Полухін А.В., Цвілій Д.Р.; дата реєстрації 20 червня 2023 р. №119898; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	39
1.1. Подання організаційно-технічної системи ціноутворення.....	39
1.1.1. Формальний опис організаційно-технічної системи ціноутворення ринку електроенергії.....	42
1.1.2. Аналіз стану досліджень проблеми математичного та комп'ютерного моделювання процесу ціноутворення.....	46
1.2. Проблеми функціонування систем ціноутворення.....	55
1.2.1. Приклади недосконалості систем ціноутворення.....	56
1.2.2. Інформаційно-технологічне забезпечення процесу ціноутворення... ..	64
1.3. Аналіз стану досліджень мультиагентних організаційно-технічних систем.....	66
1.4. Висновки до розділу 1	70
РОЗДІЛ 2 ПРОЦЕС ЦІНОУТВОРЕННЯ НА РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЯК СКЛАДНА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНА СИСТЕМА.....	71
2.1. Етапи процесу ціноутворення.....	73
2.2. Стадії технологічної процесу ціноутворення.....	77
2.3. Формалізація процесу ціноутворення.....	79
2.4. Архітектура мультиагентного середовища процесу ціноутворення на ринку електроенергії.....	81
2.4.1. Мультиагентне імітаційне моделювання.....	81
2.4.2. Формалізація процесу ціноутворення для мультиагентної імітаційної моделі.....	85
2.4.3. Концептуальна схема інтегрованої мультиагентної системи ціноутворення.....	86
2.4.4. Функціональна модель мультиагентної системи ціноутворення.....	90

2.4.5. Структура мультиагентного подання системи ціноутворення.....	93
2.4.6. Комунікаційне середовище агентів мультиагентної системи ціноутворення.....	94
2.5. Висновки до розділу 2.....	96
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	97
3.1. Метод аналізу вузлової трансформації процесу ціноутворення.....	97
3.1.1. Позначення змінних та параметрів процесу ціноутворення.....	98
3.1.2. Обчислювальні процедури методу вузлової трансформації процесу ціноутворення.....	99
3.1.3. Схема візуалізації вузлової трансформації у процесі ціноутворення.....	105
3.2. Задача аналізу динаміки попиту електроенергії на сегментах оптового ринку.....	106
3.2.1. Алгоритмічна модель аналізу динаміки попиту на електроенергію на ціноутворюючих сегментах оптового ринку.....	106
3.2.2. Аналіз результатів розрахунково-експериментального дослідження моделі.....	109
3.3. Метод оцінки результатів сполучення ринків електричної енергії «на добу наперед» України з європейськими країнами.....	113
3.3.1. Теоретичне підґрунтя розроблення методу оцінки сполучення ринків.....	114
3.3.2. Формалізація методу оцінки сполучення сегментів ринків «на добу наперед».....	115
3.3.3. Алгоритмічна організація імітаційної моделі оцінки сполучення ринків.....	118
3.4. Задача оцінки сполучення двох ринків електричної енергії.....	119
3.4.1. Вхідні дані імітаційної моделі.....	119
3.4.2. Аналіз результатів імітаційного моделювання.....	121

3.5. Висновки до розділу 3.....	125
РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЦІНИ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ НА СЕГМЕНТІ РИНКУ "НА ДОБУ НАПЕРЕД"....	127
4.1. Формування ціни на електроенергію на сегменті оптового ринку «на добу наперед».....	127
4.2. Комп'ютерна модель розв'язання оптимізаційної задачі визначення рівноважних погодинних цін на сегменті ринку «на добу наперед».....	130
4.2.1. Математична модель задачі.....	131
4.2.2. Алгоритмічна організація розв'язання задачі.....	138
4.2.3. Аналіз результатів обчислювальних експериментів, перевірка адекватності моделі.....	140
4.3. Комп'ютерна модель розв'язання задачі з розрахунку ціни та обсягів у пропозиціях теплових електростанцій.....	143
4.3.1. Алгоритмічна модель процесу підготовки заявок теплових електростанцій на сегменті оптового ринку «на добу наперед».....	143
4.3.2. Аналіз результатів обчислювальних експериментів, адекватність моделі.....	146
4.4. Висновки до розділу 4.....	149
РОЗДІЛ 5 ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЦІНОУТВОРЕННЯ.....	151
5.1. Комп'ютерна система моделювання процесів прийняття рішень системою ціноутворення ринку електричної енергії	152
5.1.1. Організаційна модель інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень.....	153
5.1.2. Концептуальна модель інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень.....	155
5.2. Інформаційне забезпечення адаптивної системи підтримки прийняття рішень.....	157

5.2.1. Аналіз подання процесів функціонування системи організаційного управління.....	157
5.2.2. Інформаційна модель предметної області досліджень.....	163
5.2.3. Функціональна організація інформаційно-технологічного забезпечення.....	166
5.3. Організація інтерфейсу користувача	172
5.3.1. Класифікація операцій взаємодії з об'єктами предметної області...	172
5.3.2. Функціональні модулі інтерфейсів користувача	174
5.4. База даних процесів ціноутворення ринку електричної енергії.....	176
5.4.1. Принципи побудови бази даних-процесів ціноутворення ринку.....	176
5.4.2. Опис інформаційної логічної моделі бази даних.....	178
5.5. Висновки до розділу 5.....	183
РОЗДІЛ 6 ПРОГРАМНО-АПАРATНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ.....	185
6.1. Передумови побудови комп'ютерної системи моделювання.....	185
6.2. Призначення комп'ютерної системи моделювання.....	190
6.3. Принципи розроблення комп'ютерної системи моделювання, визначення загальносистемних вимог до її побудови	192
6.4. Функції комп'ютерної системи моделювання.....	195
6.5. Архітектура програмного, технічного і інформаційного забезпечення комп'ютерної системи моделювання.....	197
6.6. Класифікація операцій взаємодії користувача комп'ютерної системи з об'єктами предметної області СОТС.....	205
6.7. Інтерфейс користувача (агента).....	206
6.8. Висновки до розділу 6	209
РОЗДІЛ 7 Приклади створення моделей розв'язання окремих задач у процесі ціноутворення.....	211
7.1. Аналіз реалізації задачі прогнозування попиту на електроенергію....	212

7.1.1. Інформаційно-методичне забезпечення прогнозування попиту на електроенергію.....	212
7.1.2. Методика побудови моделей прогнозування.....	220
7.2. Модель визначення цін у контрактах постачальників роздрібного ринку електричної енергії.....	230
7.3. Модель оперативного прогнозування попиту на сегменті ринку «на добу наперед».....	240
7.4. Модель збирання даних динаміки розвитку альтернативної електроенергетики.....	250
7.5. Висновки до розділу 7.....	259
ВИСНОВКИ.....	261
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	266
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	285
ДОДАТОК Б. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	297
ДОДАТОК В. ПРИКЛАДИ ІНТЕРФЕЙСІВ КСМ	302
ДОДАТОК Г. КОПІЇ СВДОЦТВ ПРО АВТОРСЬКІ ПРАВА	306

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС	– атомна електростанція;
БД	– база даних;
БР	– балансуючий ринок;
ВДР	– внутрішньодобовий ринок;
ВЕС	– вітроелектростанція;
ВДЕ	– відновлювані джерела енергії;
ГЕС	– гідроелектростанція;
ГК	– генеруючі компанії;
ГУ	– генеруючі установки;
ЕЕ	– електрична енергія;
ЄС	– Європейський Союз;
ІМС	– інформаційно-моделююча систем
ЛЕС	– локальна електроенергетична система;
Міненерго	– Міністерство енергетики;
НАЕК «Енергоатом»	– Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом»;
НЕК «Укренерго»	– Національна енергетична компанія «Укренерго»;
НКРЕКП	– Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг;
ОЕС	– об'єднана електроенергетична система;
ОМГ	– об'єкт малої генерації;
ООМ	– об'єктно-орієнтоване моделювання;
ОР	– оператор ринку;
ОРЕ	– оптовий ринок електроенергії;
ОСП	– оператор системи передавання;
ОСР	– оператор системи розподілу;
ПЗ	– програмне забезпечення;
ПОН	– постачальник останньої надії;

ПрО	– предметна область;
ПСЗ	– право соціального забезпечення;
ПУП	– постачальник універсальних послуг;
РДД	– ринок двосторонніх договорів;
РДН	– ринок «на добу наперед»;
РДП	– ринок допоміжних послуг;
СЕС	– сонячна електростанція;
СО	– системний оператор;
СОТС	– складна організаційно-технічна система;
СОУ	– система організаційного управління;
СППР	– система підтримки прийняття рішень;
ТЕС	– теплова електростанція;
ТЕЦ	– теплоелектроцентрально.

ВСТУП

Актуальність теми. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів ціноутворення в ринкових умовах у складних організаційно-технічних системах (СОТС), що об'єднують множини взаємопов'язаних структурних підсистем і елементів, які взаємодіють між собою та з зовнішніми технічними і соціально-економічними системами, є комплексною проблемою. Складність системи обумовлена взаємозалежністю її складових підсистем: організаційної – власна структура системи управління; технічною – множиною елементів технічних засобів; функціональною – що визначає призначення та особливості діяльності посадових осіб органів, пунктів та об'єктів управління У структурі галузей господарського комплексу держави можна виділити чимало таких СОТС, а саме: електроенергетика; теплоенергетика; транспортна інфраструктура; видобуток корисних копалин (вугілля, газ тощо); великі промислові і сільськогосподарські компанії; та інші.

В електроенергетиці об'єднання таких підсистем в єдине організаційне, оперативно-технологічне, економічне та інформаційне середовище, яке забезпечує процеси конкурентного та «соціально направлено» ціноутворення, є, по суті, окремою організаційно-технічною системою формування ціни на електроенергію (ЕЕ). Таке об'єднання стає одним із найважливіших в системі взаємовідносин, що виникають між учасниками ринку ЕЕ під час здійснення операцій купівлі-продажу ЕЕ та надання послуг з передачі, розподілу та постачання ЕЕ кінцевим споживачам. Базовою технічною основою виробництва товару, надання послуг під час передачі товару та постачання продукції кінцевим споживачам в ринкових умовах стає об'єднана електроенергетична система (ОЕС). Тому що самі зміни в структурі виробництва і споживання ЕЕ є визначальними в процесах ціноутворення.

У зв'язку з реалізацією плану розвитку енергетики відповідно до прийнятої Енергетичної стратегії України на період до 2035 рік передбачається виконання основних складових концепції Smart Grid, що отримала назву 3D (декарбонізація, децентралізація, діджиталізація), задля перетворення електроенергетики України в інтелектуальну екологічно безпечну систему. На сьогоднішній день, енергетична галузь знаходиться в перехідному періоді, в рамках якого передбачається поетапне проведення значних змін у структурі виробництва ЕЕ з метою забезпечення споживачам доступу до ринків ЕЕ, надійних та сучасних джерел ЕЕ необхідної якості. Тому впровадженню планів з розвитку ОЕС в Україні мають передувати теоретичні та експериментальні дослідження з використанням імітаційних моделей, результати яких можуть бути покладені в основу обґрунтування щодо запровадження нових механізмів ціноутворення на ринку ЕЕ з урахуванням особливостей структури виробництва, передачі, надання послуг та розподілу ЕЕ.

Основою розвитку електроенергетичного комплексу країни слід вважати розвиток системи формування цін на ЕЕ в умовах широкомасштабного впровадження у традиційні енергетичні системи генеруючих об'єктів і устаткування, які використовують відновлювані джерела енергії. Це, в свою чергу, призводить до змін у структурі виробництва та споживання ЕЕ та стрімкого зростання числа учасників торговельно-економічних відносин на ринку ЕЕ.

Однією з ключових проблем розвитку ринку у багатьох країнах світу є вирішення проблеми ціноутворення на ринках ЕЕ. Це стосується і тих країн, де реалізована десятиліттями раніше, ніж чинна в Україні, модель ринку з умовною назвою "Конкуренція на всіх рівнях", присвячено дуже багато робіт.

Дослідженню теоретичних і прикладних проблем функціонування СОТС ціноутворення шляхом удосконалення методів і засобів

математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування окремих СОТС приділяється велика увага в науковій літературі. Значний внесок у створення та розвиток теоретичних основ, методів та засобів моделювання ринку ЕЕ і його сегментів, електроенергетичних систем у ринкових умовах їхнього існування та техніко-економічних засад розвитку здійснили закордонні та вітчизняні вчені: С. Стофт, Д. Ньюбери, Дж. Бушнелл, С. Вольфрам, И.П. Арриаги, О.В. Кириленко, М.М. Кулик, В.М. Геець, С.Є. Саух, С.В. Дубовський, А.В. Борисенко, З.Х. Борукаєв, І.В. Блінов, С.П. Денисюк, К.В. Ущাপовський, П.Д. Лежнюк та інші.

Аналіз робіт показує, що до числених проблем, які розглядаються, відносять: адекватний математичний опис процесів функціонування СОТС і розробку алгоритмічних моделей механізмів організаційної, оперативно-технологічної та інформаційної взаємодії між підсистемами і елементами, що їх утворюють; розвиток теорії побудови інтегрованих комп'ютерних систем організаційного управління, методів та засобів імітаційного моделювання процесів управління в СОТС, включаючи структурну і алгоритмічну організацію, на основі застосування нових інформаційних технологій; підвищення ефективності механізмів функціонування СОТС під час управління ними в швидкозмінних умовах існування і проведення інституційних змін у взаєминах між її підсистемами і з суб'єктами управління господарською діяльністю у зовнішньому середовищі.

Ця обставина дає можливість зробити висновок про те, що науково-прикладна проблема розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу формування цін у СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання (КСМ) задля організації інформаційно-технологічного забезпечення вирішення задач моделювання й обчислення у процесі ціноутворення на ринку ЕЕ є актуальною на сучасному етапі розвитку електроенергетики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження за темою дисертаційної роботи проведені в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (далі – ІПМЕ) відповідно до плану науково-дослідних робіт НАН України в межах фундаментальних і прикладних держбюджетних тем, науково-дослідних робіт Інституту: «Дослідження моделей інформаційного забезпечення і розробка експериментальної інтелектуальної системи підтримки рішень для управління енергетичними системами» (шифр: «Провайдер»), державний реєстраційний № 0118U005406; «Розвиток теорії побудови системи підтримки прийняття рішень щодо формування торгових заявок з поставки електроенергії генеруючими компаніями» (шифр: «Генерація»), державний реєстраційний № 0115U004341; «Теоретико-ігрові моделі та методи мінімізації ризиків для систем підтримки прийняття рішень з управління попитом на ринку» (шифр: «Потенціал»), державний реєстраційний № 0121U000392; «Розроблення системи моделювання ОЕС України з великими частками обсягів виробництва електроенергії енергоблоками АЕС та енергетичними установками, що використовують ВДЕ» (Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України на 2022 - 2023 рр.) (шифр: «Модель ОЕСУ»), державний реєстраційний № 0122U002122. В рамках виконання меморандуму про співпрацю між ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України та Акціонерним товариством «Оператор ринку» від 07.02.2023р. розроблена комп'ютерна модель задачі оптимального формування рівноважних цін та обсягів купівлі-продажу електричної енергії на ринку «на добу наперед».

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу формування цін у СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів КСМ задля організації інформаційно-технологічного забезпечення

щодо вирішення задач моделювання й обчислення у процесі ціноутворення на ринку ЕЕ.

Досягнення поставленої мети досліджень обумовило необхідність вирішення наступних основних теоретичних та прикладних задач.

1. Провести огляд та аналіз літературних джерел, присвячених проблемам функціонування ринку ЕЕ та стану досліджень проблеми математичного та комп'ютерного моделювання процесів ціноутворення на ринку ЕЕ. Обґрунтувати актуальність та вибір теми дисертаційної роботи.

2. Розробити засоби складання математичного опису процесів ціноутворення у СОТС з урахуванням реальних особливостей організаційної, технологічної та інформаційної взаємодії суб'єктів ринку.

3. Розробити мультиагентне подання процесу ціноутворення на ринку ЕЕ, агентно-орієнтовану архітектуру комунікаційного середовища взаємодії агентів у процесі ціноутворення. Побудувати мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення.

4. Розробити метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії для аналізу динаміки змін ціни в вузлах всього ланцюгу фізичного та економічного потокорозподілу від виробника до кінцевого споживача та алгоритмічну модель аналізу динаміки попиту на ЕЕ на ціноутворюючих сегментах оптового ринку задля адекватної оцінки стану процесу ціноутворення на ринку ЕЕ.

5. Розробити метод оцінки можливості сполучення сегментів ринків ЕЕ «на добу наперед» України та європейських ринків ЕЕ задля проведення кількісного аналізу доцільності прийняття рішення щодо сполучення ринків ЕЕ.

6. Розробити комп'ютерну модель оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку «на добу наперед» задля визначення рівноважної ціни ЕЕ на підставі цінових заявок виробників та

постачальників ЕЕ. Побудувати математичну модель, розробити алгоритм та програму її реалізації.

7. Розробити комп'ютерну модель для розрахунку ціни та обсягів в пропозиціях теплових електростанцій на аукціон сегменту ринку «на добу наперед». Побудувати алгоритмічну модель, розробити програму її реалізації.

8. Розробити засоби інформаційно-технологічного забезпечення КСМ в електроенергетиці як базового компонента системи підтримки прийняття рішень системою організаційного управління процесом ціноутворення задля вирішення задач моделювання й обчислення.

9. Побудувати програмно-апаратну КСМ для організації процесів підготовки й використання моделюючих систем аналізу процесів ціноутворення в складі структурних підсистем, а саме: програмних модулів з інформаційно-моделюючою та інформаційно-розрахунковою підсистемами, із розвинутими засобами змістовної обробки даних і користувацького інтерфейсу.

Об'єктом дослідження є процес ціноутворення в складних організаційно-технічних системах.

Предметом дослідження є методи аналізу процесу ціноутворення, алгоритмічні та імітаційні моделі функціонування суб'єктів процесу ціноутворення, комп'ютерна система моделювання процесів ціноутворення.

Методи дослідження. Для постановки та вирішення сформульованих задач у дисертації використовуються: методи дослідження та аналізу складних систем – для складання математичного опису ієрархічно побудованої багаторівневої багатoelementної територіально розподіленої складної організаційно-технічної системи ціноутворення, побудови її концептуальної моделі; метод математичного лінійного та нелінійного програмування – для побудови комп'ютерної моделі оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку «на добу наперед» та

моделі оцінки можливості сполучення сегментів ринків «на добу наперед» України та європейських ринків ЕЕ; засоби теорії множин – для складання математичного опису процесів ціноутворення, розроблення методу вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку ЕЕ; методи об'єктно-орієнтовного та агентно-орієнтовного моделювання - для розробки інформаційно-технологічного забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення в електроенергетиці.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних у роботі результатів визначається комплексним підходом до розв'язання проблеми розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу формування цін у СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів КСМ задля організації інформаційно-технологічного забезпечення вирішення задач моделювання й обчислення у процесі ціноутворення.

Наукову новизну складають такі основні результати.

1. Запропоновано математичний опис процесу ціноутворення у СОТС як сукупності формалізованих дій з урахуванням реальних особливостей організаційної, технологічної та інформаційної взаємодії суб'єктів товарного ринку. Від відомих запропонований опис відрізняється способом формалізації такого процесу шляхом його подання у вигляді двох взаємопов'язаних графів потокорозподілу товару та його вартості з різним кількісним складом вузлів, які названо локальними вузлами ціноутворення.

2. Запропоновано метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку ЕЕ для аналізу цінової динаміки у вузлах всього ланцюгу фізичного та економічного потокорозподілів від виробника до кінцевого споживача, з використанням обчислювальних процедур визначення індексів цін. Відмінна особливість методу полягає в тому, щоб відображати зміни цін та обсягів ЕЕ у підсистемах, елементарних вузлах та

вузлових точках СОТС ціноутворення, з урахуванням впливу як внутрішніх, так і зовнішніх факторів.

3. Розроблено мультиагентне подання процесу ціноутворення, а саме: функціональний опис агентів у мультиагентній системі ціноутворення, архітектуру агента в мультиагентній системі ціноутворення ринку ЕЕ. На відміну від відомих таке подання відрізняється наявністю у складі агентів зовнішнього середовища, яке впливає на процес ціноутворення. На його основі побудовано мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення у вигляді кортежу сукупності певних множин імітованих агентів та множини агентів впливу зовнішнього середовища. Розроблено агентно-орієнтовану архітектуру комунікаційного середовища взаємодії агентів у процесі ціноутворення у вигляді сукупності множин автономних агентів, агентів навколишнього та зовнішнього середовища організаційної, інформаційної, технологічної та економічної взаємодії агентів у єдиному процесі ціноутворення в СОТС ринку ЕЕ.

4. Розроблено метод кількісної оцінки рішень щодо сполучення сегментів ринків ЕЕ «на добу наперед» України та європейських міждержавних бірж ЕЕ задля забезпечення детального аналізу результатів сполучення ринків ЕЕ. На відміну від відомих, розроблений метод використовує функції чистого експорту для побудови імітаційної моделі розв'язання оптимізаційної задачі максимізації цільової функції добробуту учасників ринку із врахуванням обмежень обсягів імпорту/експорту ЕЕ. Особливості застосування запропонованого методу продемонстровано на прикладі аналізу результатів сполучення ринків ЕЕ України та Молдови. Отримані результати розрахунків підтверджують, що метод дає можливість приймати обґрунтовані рішення на етапі підготовки до інтеграції сегменту ринку «на добу наперед» України з європейськими ринками ЕЕ.

5. Розроблено математичну модель оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку «на добу наперед» (РДН)

зادля визначення рiвноважної цiни EE на пiдставi цiнових заявok виробникiв та постачальникiв EE. Модель представлено у виглядi нелiнiйної задачі, що мiстить два типи невідомих змiнних – цiлi числовi змiннi, значення яких вiдображають ринковi рiшення щодо акцепту заявok на купiвлю та продаж EE, та дiйснi змiннi, якi визначають рiвноважнi цiни для кожного розрахункового перiоду часу. На вiдмiну вiд вiдомих, таку модель сформовано у виглядi оптимiзацiйної задачі з параметрично заданими рiвноважними цiнами на ринку. Запропоновано обчислювальний метод пошуку оптимального рiшення задач моделювання та на його пiдставi розроблений алгоритм та програму його реалiзацiї.

6. Розроблено структурну органiзацiю програмного забезпечення КСМ процесу цiноутворення у складi системи iнформацiйно-моделюючої та iнформацiйно-розрахункової пiдсистем як базового компонента системи пiдтримки прийняття рiшень. Комплексна взаємодiя цих пiдсистем забезпечується єдиним iнформацiйним простором, утвореним iнформацiйно-довiдковими модулями рiзного призначення. Програмне середовище комп'ютерної системи утворює єдиний програмний продукт органiзацiї i розгортання iнтерфейсiв в режимi онлайн засобами Internet-середовища для супроводу дiючих та створення нових функцiональних задач органiзацiйного управлiння процесами цiноутворення на ринку EE.

Практичне значення одержаних результатiв полягає в тому, що:

1. Науковi результати, а саме модель збирання даних динамiки змiн кiлькiсних та якiсних показникiв функцiонування об'єктiв альтернативної електроенергетики, що дозволяє здiйснювати збiр i систематизацiю актуальної iнформацiї про об'єкти, з необхідною дискретнiстю у часi, розширяє можливостi її подальшого використання у вирiшеннi наукових i практичних задач iнтеграцiї зазначених об'єктiв до централiзованої електроенергетичної системи, удосконаленню механiзмiв цiноутворення на

ринку ЕЕ. Підтверджується листом підтримки дисертаційної роботи Асоціації сонячної енергії України.

2. Комп'ютерна модель оптимізаційної задачі пошуку рівноважного стану ринку «на добу наперед» та запропонований алгоритм її ітераційного розв'язку які пов'язані з визначенням оптимальних цін та обсягів купівлі-продажу ЕЕ на РДН знайшли застосування та використовуються при проведенні торгів на аукціоні РДН в резервній системі програмного забезпечення АТ «Оператор ринку». Підтверджується актом введення в дослідну експлуатацію.

3. Представлена в дисертаційній роботі КСМ використовувалася при виконанні господарських договорів з енергетичними компаніями, суб'єктами ринку ЕЕ, під час вирішення поставлених ними задач аналізу цінової динаміки в вузлах всього ланцюгу від виробника до кінцевого споживача, із здійсненням прогнозування цін на ринку «на добу наперед», аналізу динаміки ціноутворення на ринку та вироблення рекомендацій щодо розробки стратегії купівлі-продажу ЕЕ. Підтверджується актами про використання результатів дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові теоретичні та прикладні результати, які виносяться на захист, одержано автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1] – розроблено інформаційну модель предметної області системи організаційного управління енергоринком, функціональну модель інформаційно-технологічної платформи побудови систем підтримки прийняття рішень, функціональні модулі інтерфейсів користувача комп'ютерної системи моделювання; [3] – розроблено алгоритмічну модель процесу розрахунків обсягів та цін в контрактах постачальників ЕЕ в умовах лібералізованого ринку; [5] – розроблено концептуальну модель системи підтримки прийняття рішень організаційного управління, структуру її функціональної організації; [6] –

обґрунтовано актуальність створення та вибір мультиагентного підходу до побудови імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку ЕЕ; [9] – визначено особливості функціонування ринку ЕЕ, які вимагають розробки нових інформаційно-моделюючих засобів моделювання, розроблено структурну організацію системи організаційного управління процесом ціноутворення, яка подається функціональними складовими процесу підготовки та прийняття рішень; [10] – постановка задачі побудови комп'ютерної моделі, аналіз результатів обчислювальних експериментів; [11] – побудовано модель структур даних предметної області організаційного управління ринком для об'єктно-реляційної бази даних КСМ, визначено сукупність взаємодіючих інформаційних суб'єктів предметної області за принципами об'єктно-орієнтованого моделювання процесів ціноутворення на ринку ЕЕ, розроблено концептуальну модель подання процесів функціонування ринку; [12] – розроблено структуру інформаційного масиву даних про об'єкти альтернативної електроенергетики комп'ютерної системи моделювання; [13] – розроблено метод вузлової трансформації динаміки ціноутворення, запропоновано спосіб декомпозиції процесу ціноутворення в складних організаційно-технічних системах у вигляді сукупності взаємопов'язаних підсистем фізичного і економічного поточкорозподілу, розроблено обчислювальні процедури методу; [14] – розроблення обчислювального алгоритму прогнозування попиту на електроенергію на сегменті ринку «на добу наперед»; [16] – розроблено основні завдання концептуального проектування нової ринкової архітектури мікроринків локальних електроенергетичних систем та їхньої інтеграції в діючі системи управління ринком ЕЕ; [17] – формулювання та формалізація задачі побудови імітаційної моделі мультиагентного процесу ціноутворення, розроблення архітектури комунікаційного мультиагентного середовища імітаційної моделі; [18] – проведено аналіз методів та засобів побудови моделей

короткострокового прогнозування, розроблено методику дослідження часових рядів та побудови моделі оперативного прогнозування показників стану ринку ЕЕ (цін, обсягів) в режимі, близькому до реального часу; [19] – розроблено метод кількісної оцінки можливості об'єднання сегментів ринків ЕЕ «на добу наперед» України та європейських міждержавних бірж ЕЕ задля вирішення задач попереднього аналізу результатів у наслідку сполучення ринків ЕЕ; [20] – сформульовано принципи та вимоги до побудови КСМ, визначено орієнтовний склад функціональних модулів КСМ процесів ціноутворення з єдиним уніфікованим середовищем інформаційних ресурсів та комп'ютерних моделей, розроблено алгоритмічну модель аналізу динаміки розподілу обсягів купівлі-продажу (попиту) ЕЕ на сегментах оптового ринку; [21] – огляд та аналіз інформаційних технологій управління процесом інтеграції електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії, до централізованих енергосистем в умовах дотримання вимог декарбонізації виробництва ЕЕ.

Апробація матеріалів дисертації. Основні наукові теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях, у тому числі й міжнародних: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, Ukraine, 16-17 December 2019); Науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН (Київ, Україна, 20 грудня 2019 р.); Actual trends of modern scientific research, 10th International scientific and practical conference (Munich, Germany, May 9-11, 2021); V міжнародної науково-практичної конференції Information and Simulation System for Processes Analysis in the Liberalized Electricity Market. Applied scientific and technical research (Івано-Франківськ, Україна, 5-7 квітня 2021р.); III науково-практичної конференції «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» (Київ, Україна, 22 грудня 2021 р.); Комп'ютерна система equant cloud моделювання процесів ціноутворення

на ринку електроенергії України, XIII Міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерні системи та мережні технології» (CSNT 2021) (Київ, Україна, 15-17 квітня 2021 р.) Національний авіаційний університет. Київ, 2021; XXXIX науково-практична конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (Київ Україна, 12 травня 2021 р.); Кібербезпека енергетики: науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (Київ, Україна, 27 травня 2022 р.); III науково-практичної конференція: «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації», ІПМЕ (22 грудня 2021 р.); XL Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (Київ, Україна, 11 травня 2022 р.); Кібербезпека енергетики: науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (Київ, Україна, 27 травня 2022 р.); The 10th International scientific and practical conference «Modern science: innovations and prospects», SSPG Publish (Stockholm, Sweden, June 25-27, 2022); Кібербезпека енергетики: науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (Київ, Україна, 24 листопада 2022 р.); Восьма міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання і комп'ютерна графіка» (Луцьк – Київ, Україна, 11-14 квітня 2023 р.); Algorithmic means of ensuring network security and websites: trends, models, future cases. Amazonia Investiga, 2023; Науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (Київ, Україна, 21 червня 2023 р.); VI International Scientific and Practical Conference «Old and new technologies of learning development in modern conditions» (Берлін, Німеччина, 13-16 лютого 2024 р.); Кібербезпека енергетики: науково-практична конференція Інституту проблем

модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України (Київ, Україна, 29 травня 2024 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 21 наукову працю, з яких: 1 монографія; 1 – розділ у колективній монографії у закордонному виданні, індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus; 19 – статті у періодичних фахових виданнях, з яких 4 – у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science Core Collection, у тому числі 3 – у фахових виданнях категорії А; 19 – матеріали доповідей на наукових конференціях, у тому числі 7 міжнародних, із яких 1 проіндексована у міжнародній наукометричній базі Scopus. 5 публікацій підготовлено одноосібно, у тому числі 1 монографія.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 310 сторінок, із них основного тексту дисертації 241, 38 рисунків, 12 таблиц. Список використаних джерел містить 158 найменувань.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД І АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У розділі наведено огляд та аналіз публікацій, присвячених вирішенню науково-практичних проблем розвитку ринку електричної енергії (ЕЕ) як складної організаційно-технічної системи. Підсистему управління ціноутворенням виділено як окрему мультиагентну СОТС ринку ЕЕ, складено її формальний опис. Наведено аналіз стану сучасних досліджень математичного та комп'ютерного моделювання процесу ціноутворення в СОТС ринку ЕЕ. Обґрунтовано актуальність науково-прикладної проблеми розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу ціноутворення в СОТС ринку ЕЕ, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації інформаційно-технологічного забезпечення всебічного дослідження процесу ціноутворення та впровадження нових механізмів управління процесом ціноутворення з безпосередньою участю суб'єктів ринку з метою підвищення його прозорості.

1.1. Подання організаційно-технічної системи ціноутворення

Перехід до нової моделі ринку ЕЕ України, побудованого з дотриманням вимог Директиви 2009/72/ЄС та відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» [1], є закономірним результатом його розвитку згідно з прийнятою раніше Концепцією функціонування та розвитку оптового ринку ЕЕ України, а водночас, частиною загальної тенденції зміни основних принципів функціонування ринків ЕЕ в країнах Європейського Союзу (ЄС), США, Австралії і багатьох інших. Процес реформування ринку ЕЕ України відповідно до світових тенденцій розвитку енергоринків, що почався ще наприкінці 90-х років, завершився переходом

з 01.07.2019 р. до відомої моделі його організації, яка отримала назву «конкуренція на всіх рівнях».

Таке перетворення організації ринку ЕЕ призвело до кардинальних змін у системах оперативно-технологічної, інформаційної та організаційно-економічної взаємодії суб'єктів ринку. Але особливо відчутно ці зміни проявляються в контексті ринкового ціноутворення на ЕЕ, зокрема у процесі застосування регуляторних механізмів встановлення тарифів для компаній відновлюваної енергетики та енергопідприємств, віднесених до категорії природних монополій, а також у межах надання енергопідприємствами системних послуг із метою забезпечення стійкості енергосистеми, тарифів для окремих категорій кінцевих споживачів.

У цих умовах, які можна назвати умовами розвитку ринкового ціноутворення на ЕЕ, питання щодо формування цін продажу ЕЕ виробниками для подальшого подання у вигляді торгових заявок на різні сегменти ринку ЕЕ є одними з найбільш важливих. Оскільки вони багато в чому визначають фінансові результати їхньої роботи на ринку ЕЕ. У зв'язку з цим, у нових умовах функціонування ринку ЕЕ постає питання стосовно розроблення та дослідження методичного інструментарію для підготовки і прийняття рішень про ціни в торгових заявках на поставку ЕЕ та системних послуг на новоутворені його сегменти: «ринок на добу наперед» (РДН); «внутрішньодобовий ринок» (ВДР); «ринок двосторонніх договорів» (РДД); «ринок допоміжних послуг» (РДП); «балансуючий ринок» (БР). Саме на кожному з цих сегментів ринку існують свої особливості функціонування та ризики під час формування рівноважних цін. У кінцевому підсумку це є питанням формування стратегії ціноутворення генеруючих компаній (ГК) як безпосередньо в їхніх межах, так і загалом на ринку ЕЕ, яке набуває особливої важливості, як у контексті аналізу застосовуваних раніше методик, так і в процесі розроблення нових алгоритмів та методик на їхній основі, що відповідають новим Правилам ринку [2, 3].

Задля вирішення зазначених проблем виникає нагальна потреба у створенні нових засобів математичного комп'ютерного моделювання, застосування інформаційних технологій, що дають змогу розробляти імітаційні моделі, які адекватно відображають процеси функціонування СОТС ринку ЕЕ, а також враховують особливості взаємодії досліджуваної СОТС із зовнішнім середовищем. У структурі галузей господарського комплексу держави можна виділити чимало подібних СОТС: електроенергетики; теплоенергетики; транспортної інфраструктури (залізничний, автомобільний, авіаційний, морський, річковий транспорт); видобутку корисних копалин (вугілля, газ тощо); великих промислових і сільськогосподарських компаній.

В умовах ринкової економіки кожна з цих СОТС зазнала низки перетворень під час реформування систем організаційного управління, викликаних створенням у зовнішньому середовищі нових ринків із відповідною структурою управління, на яких реалізується вироблена ними продукція або послуга. Це зумовило необхідність створення в СОТС нових структурних підсистем організаційного управління, головною функцією яких є організація процесів ціноутворення (тарифоутворення) на ринках продукції й послуг, а в деяких — і розподіл сукупного доходу від реалізованої продукції, відповідно до встановлених на ринку правил ціноутворення та методик тарифоутворення.

Об'єднання таких підсистем в єдине організаційне, оперативно-технологічне, економічне та інформаційне середовище, що забезпечує процеси конкурентного та (або) «соціально спрямованого» ціноутворення, є, по суті, окремою СОТС, однією з найважливіших у системі багатосторонніх відносин, що виникають між учасниками ринку під час здійснення операцій купівлі-продажу. З огляду на те, що в складі таких СОТС утворюються нові підсистеми організаційного управління, інфраструктурні інформаційно-технологічні підсистеми й елементи на

основі засобів обчислювальної та вимірювальної техніки й телекомунікаційного устаткування задля організації процесу ціноутворення, відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» [1] та Правил ринку [2, 3], її також можна віднести до класу СОТС та розглядати як окрему систему.

Тому об'єктом для проведення теоретичних і прикладних досліджень будемо розглядати процес ціноутворення у виділеній СОТС, який є складовою частиною загальних процесів функціонування великомасштабної СОТС – ринку ЕЕ. Технологічною основою процесу ціноутворення є ОЕС, суб'єктами якої стають виробники, постачальники, експортери, імпортери ЕЕ, споживачі. Водночас, її спільно з постачальниками ресурсів виробництва ЕЕ можна розглядати як зовнішнє середовище, яке може істотно впливати на динаміку процесу ціноутворення. Відомо, що зміни в структурі виробництва і споживання ЕЕ у ОЕС та на ринках енергоресурсів є визначальними в процесах ціноутворення та тарифоутворення.

1.1.1. Формальний опис організаційно-технічної системи ціноутворення ринку електроенергії

На рис. 1.1 наведено структурну схему організаційно-технічної системи управління процесом ціноутворення на ринку ЕЕ.

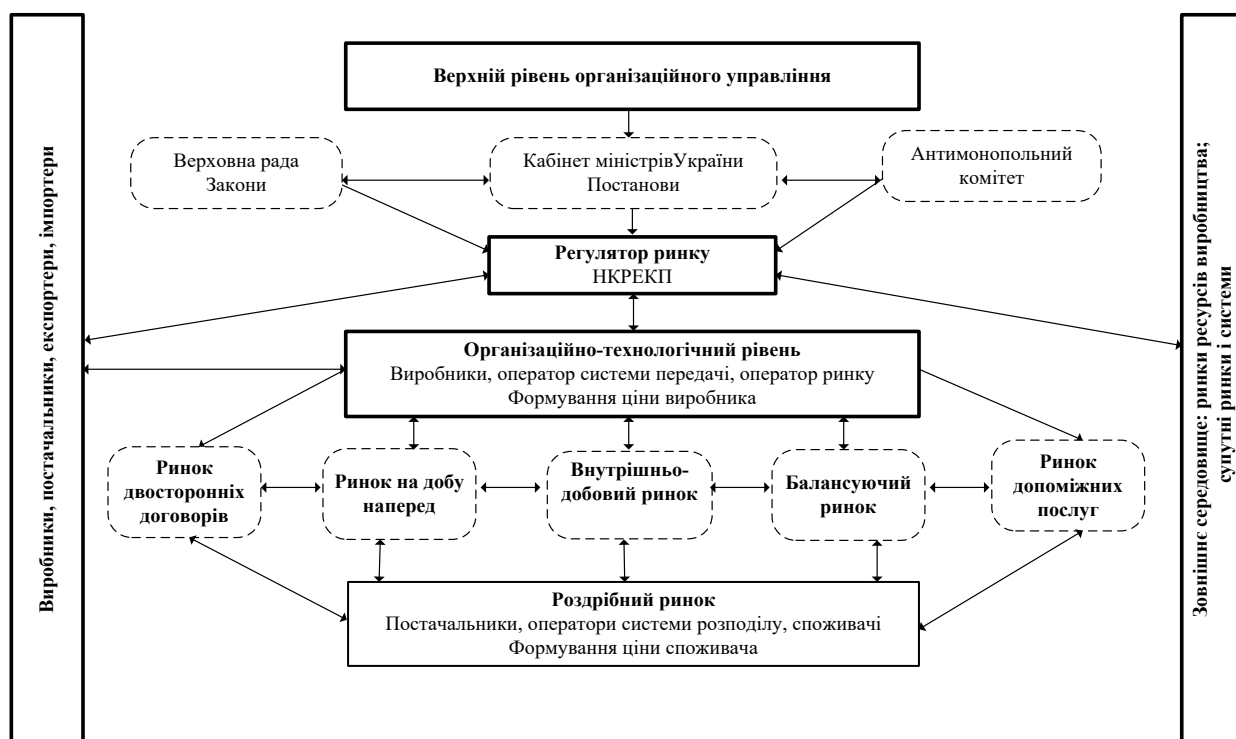


Рисунок 1.1. Структурна схема організаційно-технічної системи управління ціноутворенням на ринку ЕЕ

Розглянемо формальний опис зазначеної СОТС управління ціноутворенням ринку ЕЕ, яка забезпечує цілеспрямовану взаємодію підсистем та елементів СОТС для вирішення функціональних задач щодо управління ціноутворенням. Виділимо основні рівні й області їхніх взаємозв'язків з іншими елементами й суб'єктами господарювання зовнішнього середовища, а також наведемо короткий перелік функціональних задач у сфері організаційного управління, вирішення яких має бути забезпечене відповідними органами управління системи для досягнення поставлених цілей щодо управління ціноутворенням та розподілом доходів між суб'єктами ринку від реалізації продукту кінцевому споживачеві.

Перший рівень, який назвемо верхнім рівнем організаційного управління, утворюють органи державної влади, що забезпечують підготовку і прийняття законодавчих та нормативних (регуляторних) актів

для створення необхідних умов функціонування й розвитку ринку ЕЕ, максимально адекватних обстановці на міжнародному та державному рівнях, формування загальносистемних планів розвитку господарського комплексу держави та їх реалізацію.

Другий рівень — національна комісія, тобто уповноважений верхнім рівнем організаційного управління орган регулювання, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг (НКРЕКП), — Регулятор ринку. На цьому рівні реалізуються функції й завдання щодо децентралізованого організаційного управління, спрямовані на забезпечення необхідних умов для стійкого розвитку й функціонування ринку ЕЕ в цілому, а також функції стосовно планування розвитку енергосистеми, формування та затвердження нормативно-правової бази у вигляді правил (регуляторних механізмів) взаємодії учасників ринку, зокрема і правил ціноутворення, функції контролю за виконанням затверджених правил і процедур функціонування його підсистем і елементів на основі даних моніторингу.

Третій рівень — організаційно-технологічний рівень управління — утворюють підсистеми, тобто сегменти ринку, що забезпечують управління процесами взаємоузгодженого оперативно-технологічного та інформаційного забезпечення процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання спільно виробленої продукції, тобто ЕЕ, на ринку, а також управління процесами формування балансів виробництва і споживання ЕЕ, ціноутворення на сегментах ринку, відповідно до Правил та організації взаєморозрахунків між виробниками, постачальниками ЕЕ і постачальниками системних послуг із диспетчерського управління, передачі й розподілу ЕЕ на ньому. Це сегменти РДД, РДН, ВДР, БР та РДП. Усі ці підсистеми оптового ринку мають функціональну специфіку, працюють і реалізують інтереси учасників ринку через застосування узгоджених із Регулятором Правил ринку, серед яких прописано і механізми

ціноутворення. Суб'єктами управління цих підсистем (елементами) є генеруючі компанії – виробники ЕЕ, зокрема і компанії, які використовують альтернативні джерела енергії для виробництва ЕЕ, а також оптові постачальники ЕЕ, енерготрейдери.

Четвертий рівень — управління роздрібним ринком ЕЕ. На цьому сегменті ринку представлено такі елементи: постачальники ЕЕ, компанії-оператори розподільчих систем (ОСР), постачальники універсальних послуг (ПУП), які постачають ЕЕ побутовому та малому непобутовому споживачеві, постачальники з нерегульованим тарифом та споживачі, а також постачальник «останньої надії» (ПОН), який забезпечує обов'язкову поставку ЕЕ споживачу.

Серед споживачів стрімко зростає кількість «активних» споживачів, які прагнуть продавати надлишки власної генерації на ринку ЕЕ, а отже, можуть стати активними елементами системи ціноутворення. А їхня інтеграція до наявної системи ринку ЕЕ ставить нові завдання у сфері ціноутворення, які потребують розв'язання.

Отже, бачимо, що система управління ціноутворенням на ринку ЕЕ належить до числа централізованих, динамічних, розподілених СОТС і є ієрархічно побудованою, багаторівневою, територіально розподіленою системою, яка складається з множини підсистем і елементів, взаємопов'язаних між собою вертикально та горизонтально системоутворюючими зв'язками.

Створення універсальної математичної моделі процесу функціонування ієрархічно побудованих багаторівневих СОТС з урахуванням усього різноманіття підсистем і елементів, а також особливостей прояву їхньої взаємопов'язаної горизонтальної і вертикальної, організаційної, оперативно-технологічної, економічної та інформаційної взаємодії є занадто складною проблемою для розв'язання аналітичними методами. Тому зазвичай під час вирішення практичних проблем щодо

розвитку й удосконалення ринків ЕЕ дослідники застосовують різні способи декомпозиції СОТС на підсистеми, не порушуючи принципу її цілісності, після чого використовують метод імітаційного моделювання для побудови моделей досліджуваних процесів у підсистемах, виділяючи коло відповідних проблем.

1.1.2. Аналіз стану досліджень проблеми математичного та комп'ютерного моделювання процесу ціноутворення

Будемо називати системою сукупність елементів, що перебувають у відношеннях і зв'язках один з одним, а також утворюють певну цілісність і єдність. У роботах [4-10] наведено основні, найбільш вживані терміни й поняття в області системного підходу до математичного моделювання СОТС і визначено критерії складності системи. У літературі також визначено ознаки й характерні риси СОТС, одна з яких полягає в тому, що всі підсистеми й елементи СОТС є самоврядними (децентралізація управління) або керованими ззовні в межах вищого управління на основі власного інтелекту й інформації, що зберігається в пам'яті.

Системне управління СОТС, що об'єднує множину взаємопов'язаних структурних підсистем і елементів, які взаємодіють між собою та з зовнішніми технічними й соціально-економічними системами, є складною проблемою, дослідженням якої присвячено багато робіт. Проте немає підстав вважати її вивченою остаточно, оскільки серед розглянутих є чимало унікальних, складно структурованих систем, які мають великий потенціал. Тому дослідженням комплексу теоретичних і прикладних проблем вдосконалення методів і засобів математичного й комп'ютерного моделювання, призначених для аналізу ефективності механізмів функціонування окремих СОТС, науковці приділяють значну увагу.

До числа цих проблем увійшли такі:

- адекватний математичний опис процесів функціонування СОТС і розроблення алгоритмічних моделей механізмів організаційної, оперативно-технологічної та інформаційної взаємодії між підсистемами й елементами, що їх утворюють;
- розвиток теорії побудови інтегрованих комп'ютерних систем організаційного управління, методів та засобів імітаційного моделювання процесів управління в СОТС, зокрема їхньої структурної й алгоритмічної організації, на основі застосування нових інформаційних технологій;
- підвищення ефективності механізмів функціонування СОТС під час управління ними в швидкозмінних умовах існування і проведення інституційних змін у взаєминах між її підсистемами і з суб'єктами управління господарською діяльністю в зовнішньому середовищі.

На сьогодні існує чимало науково-прикладних проблем розвитку ринку ЕЕ, які потребують термінового вирішення. Серед них є проблеми, пов'язані з підвищенням енергоефективності процесів виробництва, передачі й використання ЕЕ, з економічною диспетчеризацією виробництва, передачі та розподілу ЕЕ, зі змінами структури виробництва і споживання ЕЕ, ціно- та тарифоутворення на ЕЕ тощо.

До числа важливих проблем розвитку ринку належить проблема управління попитом. У США і в країнах ЄС усвідомили необхідність наукового дослідження цієї проблеми й пошуку практичних рішень на основі застосування результатів теоретичних досліджень ще наприкінці 1970-х років. Ефективність практичного застосування розробленого методичного інструментарію, призначеного для розв'язання різних задач з управління попитом, підтверджується переконливими прикладами. Наприклад, з 1985 по 1995 рік понад 500 енергокомпаній у різних штатах США успішно застосували розроблений інструментарій та отримали економію у 29 ГВт пікового навантаження. Середні питомі витрати для

досягнення такого результату склали всього 2-3 центи на кіловат-годину, що було значно нижче, ніж середня ставка тарифу.

В Україні дослідженню цієї наукової проблеми також присвячено чимало робіт. Наприклад, у публікації [11] подано детальний аналіз особливостей взаємодії виробників і споживачів ЕЕ в умовах функціонування нової моделі ринку ЕЕ в Україні, на основі якого зроблено висновок про необхідність удосконалення нової моделі ринку ЕЕ та запропоновано один із можливих механізмів управління режимами електроспоживання («управління попитом»).

Крім зазначеної проблеми багато ринків ЕЕ стикаються з проблемою появи безпосередньо в системі розподілу ЕЕ генеруючих установок (ГУ) розподіленої генерації, які мають флуктуаційні особливості. Виявлено і значні додаткові проблеми, які стосуються роботи ринку ЕЕ в цілому, зокрема:

- організаційні, пов'язані з необхідністю регламентувати діяльність ГУ розподіленої генерації в ОЕС;

- організаційно-економічні, пов'язані зі встановленням спеціальних тарифів купівлі-продажу виробленої ГУ розподіленої генерації ЕЕ на ринку;

- оперативно-технологічні з можливою неконтрольованою видачею ЕЕ з ГУ розподіленої генерації в енергосистему й необхідністю підтримання «гарячого резерву» потужності для забезпечення її балансу під час виробництва й споживання ЕЕ;

- інформаційно-технологічні, пов'язані з необхідністю розвитку автоматизованої системи комерційного обліку енергії та інших автоматизованих систем управління технологічними процесами ГУ розподіленої генерації до рівня споживчої генерації.

Докладніший перелік організаційних, економічних та технічних проблем взаємодії ГУ, які стосуються об'єктів розподіленої генерації, можна знайти у роботах [12, 13]. У публікації [13] зроблено висновок щодо шляхів

розв'язання організаційних проблем: якщо припустити, що розвиток відновлювальної енергетики в Україні буде здійснюватися за рахунок розвитку малої та середньої генерації, то для цього необхідно внести відповідні зміни не тільки до законодавства, але і до загальних принципів регіонального розвитку ОЕС України з метою їх вдосконалення. Такі принципи розвитку ефективної регіональної електроенергетики мають базуватися на розбудові мережевої інфраструктури й генеруючих потужностей, забезпеченні задоволення довгострокового й середньострокового попиту на ЕЕ і потужності, формування стабільних і сприятливих умов для залучення інвестицій у будівництво об'єктів електроенергетики.

У цьому ж науковому дослідженні продемонстровано, як буде змінюватися ціна для кінцевого споживача в Україні у випадку, якщо не будуть внесені відповідні зміни до законодавства та чинних регуляторних механізмів стосовно формування тарифів на «зелену» енергію (рис. 1.2).



Рисунок 1.2. Економічні наслідки розвитку відновлювальної енергетики

Чимало наукових публікацій [14-20] присвячено дослідженню організаційних, організаційно-економічних, оперативно-технологічних, інформаційно-технологічних проблем взаємодії ГУ розподіленої генерації з

електроенергетичною системою від початку її стрімкого розвитку. На сьогодні кількість робіт, пов'язаних із розв'язанням різних задач межах цієї загальної науково-прикладної проблеми, як у вітчизняній, так і в зарубіжній науці не зменшується.

Досвід дослідження зазначених проблем підтверджує, що для їх аналізу й оцінювання їхнього впливу на процеси ціноутворення на ринку ЕЕ і в його сегментах необхідно використовувати імітаційні моделі. Більш детальний аналіз проблем, із якими стикаються дерегульовані та децентралізовані ринки ЕЕ, і причин їх виникнення наведено в роботах [21, 22].

Серед проблем, що виникають, розглянуто такі: висока вартість впровадження моделі ринку; складна структура розподілу ринку на його сегменти; неминуча волатильність та маніпулювання спотовими цінами; маніпулювання окремими гравцями, здійснюване ринковою владою; неефективні інвестиції; складність зниження вартості генерації; непередбачуваність цін на ринках енергоресурсів; неопкупність вартості виробництва ЕЕ часткою генеруючих потужностей (зокрема, відновлювальної енергетики); нерівний розподіл доходів від реалізації спільно виробленої і поставленої споживачам продукції. Тому в багатьох країнах створюються імітаційні моделі функціонування ринків для проведення досліджень з урахуванням особливостей їхнього перебігу, що уможлиблює пошук найбільш раціональних і оптимальних механізмів розподілу доходів між сегментами ринку та безпосередньо їхніми суб'єктами. Для створення таких імітаційних моделей використовуються різноманітні методології та методи, комп'ютерні засоби та інформаційні технології [23].

Важливим проблемам розвитку енергетики у напрямку досягнення цілей її кліматичної нейтральності та сталого розвитку економіки й суспільства за рахунок інтенсифікації процесу впровадження сучасних

технологій виробництва ЕЕ на електростанціях із використанням ВДЕ присвячена оглядова стаття [24]. Аналіз розглянутих у статті робіт [25-33] підтвердив складність вирішення проблеми інтеграції електростанцій відновлюваної енергетики, а також накопичувачів ЕЕ на їхній основі до енергетичних систем у багатьох країнах світу. Подані в цих роботах результати у вигляді математичних моделей, як правило, отримані без взаємозв'язку з наявними системами ціноутворення на конкретних ринках електроенергії. Але саме система ціноутворення, організація процесу ціноутворення в ній з урахуванням структури виробництва та споживання ЕЕ є основою для оцінювання доцільності прийняття рішень щодо розвитку об'єктів відновлюваної енергетики.

У статті [34] наведено статистичний аналіз просторово-часових властивостей часових рядів цін на ЕЕ в країнах Європи за період з 2019 по 2023 роки та після європейської енергетичної кризи з метою виявлення закономірностей і кореляції європейських цін на ЕЕ в різних торгових зонах і на національних ринках з урахуванням змін зовнішніх факторів, які найбільш істотно впливають на формування цін. При чому важливо відзначити, що вказані ринки функціонують в однакових умовах. Правила формування цін на них відповідають Директиві Європейського парламенту та Ради №2009/72/ЄС від 13 липня 2009 року про загальні правила внутрішнього ринку електроенергії [35]. Однак, незважаючи на цю обставину, ціни на сегментах ринку «на добу наперед» у різних торгових зонах можуть суттєво відрізнятися. У роботі [34] встановлено, що процеси формування цін у різних торгових зонах взаємопов'язані через можливості транскордонної торгівлі та базуються на схожих часових погодинних моделях попиту. Тому це призводить до суттєвих коливань цін. Тим самим ускладнюється проблема побудови складних просторово-часових моделей, що відображають конкретні потреби в електроенергетичних зонах торгівлі. Окрім того, ринки ЕЕ також нерозривно пов'язані з ринками газу та нафти в

Європі. Зміни цін на них викликані або ринковою економікою, або політичними подіями, що непередбачено впливають на ціни на ЕЕ. Фактично, європейська енергетична криза, пов'язана з російським вторгненням в Україну, суттєво вплинула на електроенергетичні системи всієї Європи, проте наслідки для кожної країни відрізняються. Отже, спостерігаємо загальний ріст цін на ЕЕ, що викликає необхідність проведення всебічної модифікації просторово-часових моделей, які використовують учасники транскордонної торгівлі.

Одним із пріоритетних напрямів стратегічного планування розвитку електроенергетичної галузі господарства в багатьох країнах світу на сучасному етапі є перехід до застосування інтелектуальних технологій збирання, зберігання, накопичення, змістовної переробки та передачі збільшених обсягів інформації. Зростання обсягів перероблюваної інформації обумовлено необхідністю створення якісно нових засобів інформаційного забезпечення ускладнених процесів ціноутворення, організаційної, оперативно-технологічної та інформаційної взаємодії управління виробництвом, передаванням, розподілом та постачанням ЕЕ кінцевим споживачам. Ускладненість процесів інформаційного забезпечення характеризується одночасним впливом на зазначені процеси під час прийняття технічних рішень щодо управління технологічною взаємодією традиційних енергосистем та безперервно зростаючої кількості в регіональних енергосистемах об'єктів генерації ЕЕ різної потужності для власних потреб у домогосподарствах, що використовують для отримання електроенергії відновлювані джерела енергії.

У контексті реалізації плану розвитку енергетики, відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року [36], передбачене виконання основних складових концепції Smart Grid, що отримала назву 3D (декарбонізація, децентралізація, діджиталізація), задля перетворення електроенергетики України на інтелектуальну, екологічно безпечну систему

[37, 38]. Відповідно, енергетична галузь переживає перехідний період, у межах якого передбачене поетапне проведення значних змін у структурі виробництва електроенергії, з метою забезпечення споживачам доступу до надійних та сучасних джерел ЕЕ необхідної якості.

Необхідно зазначити також, що перетворення енергетичної галузі мають відбуватися з урахуванням вимог і взятих Україною на себе міжнародних зобов'язань щодо переведення економіки на загальносвітовий шлях низьковуглецевого розвитку. У роботі [37, с. 9] зазначено, що стосовно енергетики «низьковуглецевий розвиток має супроводжуватися як економічним зростанням, так і переформатуванням енергетичної системи на основі нових технологій, а також забезпеченням соціальної справедливості та зниженням капіталомісткості нових технологій». Тобто реалізація стратегії розвитку електроенергетики, із забезпеченням необхідних політичних умов, вимагатиме вирішення комплексу науково-технічних проблем, пов'язаних із технологічним, інформаційним, нормативним забезпеченням надійного функціонування ОЕС України разом із Європейською енергетичною системою ENTSO-E в ринкових умовах. У роботі [38] описані основні складові концепції 3D, а також запропоновані та обґрунтовані ключові науково-технічні заходи й засоби досягнення головної мети, зокрема перетворення електроенергетики України на інтелектуальну, екологічно безпечну систему на основі практичної реалізації основних принципів концепції Smart Grid. Особливу увагу приділено випереджувальному зростанню ролі децентралізованих локальних систем електропостачання, що отримали назву Microgrid, які фактично стають локальними енергетичними системами (ЛЕС). До їхньої структури входять зазвичай не лише установки децентралізованої (розподіленої, розосередженої) малої генерації, але й цифрові вимірювальні пристрої, інформаційно-комунікаційне обладнання, що функціонально забезпечують виконання основних вимог до системи Microgrid як до

централізованої енергосистеми задля інформаційного забезпечення керованості, гнучкості, стійкості та надійності постачання споживачів ЕЕ з необхідними показниками якості.

У роботі [39] на основі проведеного аналізу багатьох джерел [40, 41], присвячених формуванню планів повоєнного відновлення та розвитку економіки України, розглянуто можливі сценарії відновлення енергетики. Серед основних проблем у роботі енергетичної галузі, поряд із ризиками технічного характеру та ресурсного забезпечення, виділено і проблему з ціноутворенням та недостатнім фінансуванням. Інакше кажучи, від своєчасного вирішення проблеми управління процесом ціноутворення у частині підвищення продуктивності прийнятих рішень, суттєво залежить залучення необхідних фінансових ресурсів.

Упровадженню планів із розвитку структури виробництва в Україні мають передувати теоретичні та експериментальні дослідження процесів ціноутворення з використанням імітаційних моделей, результати яких можуть бути покладені в основу обґрунтування запровадження нових механізмів ціноутворення на ринку ЕЕ з урахуванням особливостей структури виробництва, передачі та розподілу ЕЕ.

Тобто реалізація стратегії розвитку електроенергетики, поряд із забезпеченням необхідних політичних умов, вимагатиме вирішення комплексу науково-технічних проблем, пов'язаних із технологічним, інформаційним, нормативним забезпеченням надійного функціонування ОЕС України разом із Європейською енергетичною системою ENTSO-E в ринкових умовах. Прийняття рішень щодо практичної реалізації основних напрямів стратегії в контексті будівництва нових генеруючих потужностей за рахунок залучення масштабних інвестицій також потребує пошуку науково підтверджених та збалансованих рішень щодо раціонального та економічно обґрунтованого розміщення нових об'єктів атомної, альтернативної генерації з використанням ВДЕ, накопичувачів енергії на

основі застосування інноваційних, надійних, ефективних та стійких технологій інтелектуальних електричних мереж.

1.2. Проблеми функціонування систем ціноутворення

Проблемі ціноутворення на ринках ЕЕ як одній з ключових проблем розвитку ринку в багатьох країнах світу, а зокрема в тих, де була реалізована десятиліттями раніше, ніж чинна в Україні модель ринку з умовною назвою "конкуренція на всіх рівнях", присвячено дуже багато робіт. Окрім того, науковці звертають увагу на класифікації застосовуваних нових підходів, зокрема й мультиагентного, та інших методів аналізу процесів ціноутворення, а також на прогнозування основних показників функціонування ринку. Це дає підстави для висновку, що проблема підвищення продуктивності прийняття рішень в напрямку формування нових та удосконалення наявних механізмів ціноутворення на ринку ЕЕ є актуальною та потребує вирішення комплексу взаємопов'язаних задач із математичного й комп'ютерного моделювання процесу ціноутворення, розроблення інформаційно-технологічного та інформаційно-аналітичного забезпечення дослідження процесів у системах ціноутворення на сучасному етапі розвитку електроенергетики.

Викладене вище свідчить про актуальність дослідження комплексної проблеми математичного й комп'ютерного моделювання організаційної, оперативно-технологічної та інформаційної взаємодії підсистем і елементів, що входять до СОТС ринку ЕЕ, із метою підвищення ефективності механізмів їх функціонування в умовах децентралізованого управління, яке передбачає відсутність єдиного керівного центру формування координаційних команд для кожного з елементів підсистем. На основі проведеного аналізу літературних джерел можна також зробити висновок, що залишається велика кількість нерозв'язаних проблем щодо подальшого розвитку ринку ЕЕ. Серед них особливе значення має науково-практичне

питання щодо ціноутворення. Для його вирішення необхідно визначити систему взаємопов'язаних задач, реалізація яких із застосуванням нових технологій імітаційного моделювання та інформаційно-комунікаційних технологій забезпечить підвищення обґрунтованості і якості прийнятих рішень. Теоретичні дослідження цієї проблеми тривають у багатьох країнах світу, що дає змогу дійти висновку щодо її важливості і взаємопов'язаності з іншими проблемами ринку ЕЕ та енергетики в цілому. Саме підвищення ефективності виробництва ЕЕ і енерговикористання, а також вирішення інших згаданих практичних проблем щодо вдосконалення й розвитку ринку ЕЕ впливає на соціальний рівень розвитку держави.

1.2.1. Приклади недосконалості систем ціноутворення

Приклад 1. Ринок України. З моменту початку періоду функціонування нової моделі на оптовому ринку ЕЕ діє принципово нова для ринку система ціноутворення, що ґрунтується на ринкових принципах. Саме тому вплив цін торгових заявок на обсяги продажів продукції і допоміжних послуг на фінансові результати діяльності ГК істотно зростає. А отже, ГК необхідно переглянути принципи й методичні основи прийняття рішення про ціни та обсяги продукції під час їх формування. Окрім того, в умовах функціонування оптового ринку ГК потрібно виробити певну стратегію цінового позиціонування на сегментах ринку, сформованих і чинних у підсистемі Оператора ринку (ОР) - РДД, РДН, ВДР, а також у підсистемі Оператора системи передачі (ОСП) - БР, РДП. Конкурентна модель ринку електроенергії України офіційно запрацювала з 1 липня 2019 року. Згідно з Правилами ринку, основними учасниками ринку є виробники ЕЕ - ГК і покупці - постачальники оптові та роздрібні, енерготрейдери. Схема взаємодії виробників, постачальників, споживачів ЕЕ з сегментами ринку представлена на рис. 1.3.

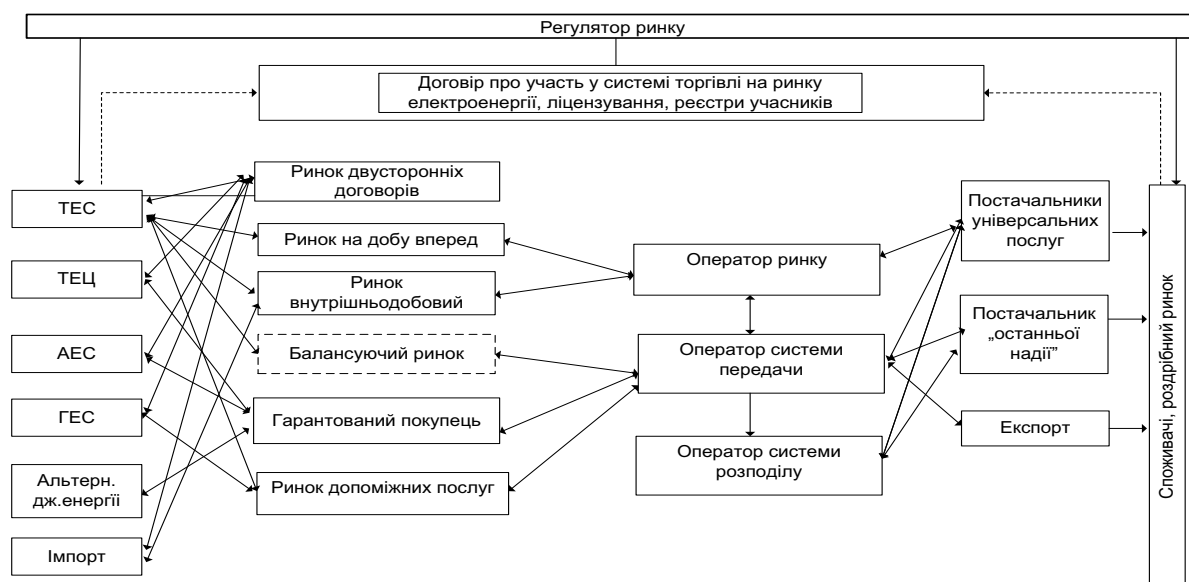


Рисунок 1.3. Схема взаємодії учасників ринку електроенергії з відповідними сегментами ринку

Основними структурними елементами системи організаційного, оперативно-технологічного та інформаційного управління, відповідно до Правил ринку, визначені ОР та ОСП, які і забезпечують роботу на новостворених сегментах ринку в контексті організації торгівлі ЕЕ і допоміжними послугами з урахуванням вимог щодо забезпечення надійності поставок ЕЕ і стійкості режимів ОЕС. Теоретично всі суб'єкти спроможні купувати і продавати ЕЕ за вільними ринковими (нерегульованими) цінами. Однак фактично тільки на сегментах ринку РДН, ВДР і БР реалізовано ринковий принцип ціноутворення. У його основу покладено механізм конкурентного ціноутворення, що враховує баланс попиту і пропозиції на аукціоні цінкових торгових заявок покупців і продавців ЕЕ.

На сегментах ринку ВДР і БР здійснюється усунення поточного дисбалансу між попитом і пропозицією, що забезпечується шляхом покупки/продажу ЕЕ за цінами, які формуються із застосуванням відомих, затверджених Регулятором ринку, механізмів ціноутворення. Також відомий усім учасникам ринку й головний критерій відбору заявок –

мінімізація сукупної вартості виробленої ЕЕ, а водночас, максимізація обсягу виробленої ЕЕ. Аналіз обсягів ЕЕ, яка була продана й куплена на різних сегментах ринку, що був проведений на підставі даних із відкритих джерел, показує, що в першому півріччі 2020 року було реалізовано приблизно: на ринку ДД - 65% виробленої енергії, зокрема 40% для покриття обсягів для виконання завдань із реалізації прав соціального забезпечення (ПСЗ), 10% на біржі, 15% на основі позабіржових угод; на РДН - 28%; на ВДР - 2%; на БР - 5%.

Наведені дані свідчать, що на сьогодні ринок ЕЕ України не є конкурентним у повному розумінні цього слова і залишається частково регульованим. Хоча офіційно Регулятор ринку не визначає і не задає прогнозну оптову ціну ринку. Проведений аналіз динаміки цін на різних сегментах ринку дає підстави для припущення, що ціна продажу ЕЕ, яка формується в результаті торгів на РДН, учасниками яких в основному є компанії теплової генерації, фактично стає опорною для прийняття рішень щодо формування заявок ГК на інших сегментах ринку. Тому формування торгових заявок ГК на РДН і комплексних заявок задля продажу ЕЕ та допоміжних послуг на інших сегментах ринку, що забезпечують реалізацію стратегії компаній, має визначальне значення. Отже, ціни РДН, що визначаються в результаті торгів на аукціоні, задають початкові умови процесу ціноутворення на ринку ЕЕ України.

Аналіз стану взаєморозрахунків між учасниками ринку показав, що, незважаючи на те, що ринок ЕЕ в Україні за європейськими правилами вже працює 4 роки, але і на сьогодні залишається чимало проблем, які безпосередньо пов'язані з недосконалістю процесу ціноутворення. Проблемними залишаються питання роботи такого сегменту ринку, як БР, формування ринкових механізмів реалізації ПСЗ в частині підтримки «зеленої» генерації й забезпечення побутового споживача ЕЕ за пільговими тарифами. Неурегульованість та відсутність комплексного підходу до

управління процесами ціноутворення на рівні взаємодії між учасниками ринку ЕЕ призвело до створення на ринку ЕЕ великих боргів між тими, хто є найбільш впливовими гравцями процесу ціноутворення, зокрема ОСП, який діє у складі Національної енергетичної компанії «Укренерго» (НЕК «Укренерго»), ДП «Гарантований покупець», ПУП та учасниками балансууючого ринку. Так, за даними НЕК «Укренерго» станом на 20 червня 2023 року, загальний рівень заборгованості на БР складає майже 16,6 млрд. грн., а загальна заборгованість із реалізації ПСЗ в контексті «зеленої» генерації, ОСП перед ДП «Гарантований покупець» станом на 26 червня 2023 року складає 21,5 млрд. грн., заборгованість виробників ЕЕ - Національної атомної енергогенеруючої компанії «Енергоатом» (НАЕК «Енергоатом») та ПрАТ «Укргідроенерго», що виконують спеціальні обов'язки із забезпечення побутового споживача ЕЕ за пільговими тарифами перед ДП «Гарантований покупець» станом на 01 липня 2023 року складає 18,1 млрд.грн. Тобто загальна кредиторська заборгованість лише ОСП складає близько 38 млрд.грн. і це лише за 4 роки існування нової моделі ринку.

Ще однією із проблем процесу ціноутворення в межах роботи існуючої моделі ринку ЕЕ України є застосування регуляторних механізмів, так званих «граничних цін», упроваджених на сегментах ринку РДН, ВДР та БР, які встановлює національний Регулятор ринку. Застосування таких механізмів на ринку не сприяє розвитку ринкових відносин, перешкоджає встановленню конкурентної рівноваги між виробниками та споживачами електроенергії. Що зрештою негативно позначається і на процесі ціноутворення та призводить до створення боргів виробників ЕЕ, що виконують спеціальні обов'язки із забезпечення побутового споживача ЕЕ за пільговими тарифами.

Відповідно до пункту 9 розділу XVII «Прикінцеві та перехідні положення» Закону України «Про ринок електричної енергії», Регулятор має

право встановлювати граничні ціни (тимчасові мінімальні та/або максимальні цінові межі) на РДН, ВДР та БР для кожної торгової зони з відповідним обґрунтуванням. Рівень граничних цін має впливати на формування вільної (ринкової) ціни в мінімальний спосіб. Доцільність встановлення й рівень граничних цін у випадку їх встановлення мають переглядатися Регулятором не менше одного разу на шість місяців. При цьому Регулятор встановлює граничні ціни з відповідним обґрунтуванням, що передбачає, зокрема, врахування інформації щодо індексу споживчих цін, індексу цін виробників, ціни на ЕЕ, з урахуванням отриманих від ОР, НЕК «Укренерго» та Міністерства енергетики (Міненерго) пропозицій щодо рівня граничних цін та після проведення консультації з Антимонопольним комітетом України. На рис.1.4 відображені результати аналізу динаміки цін на РДН за даними сайту [42] із урахуванням рішень Регулятора щодо затвердження граничних цін під час подання заявок на купівлю та продаж ЕЕ на РДН.

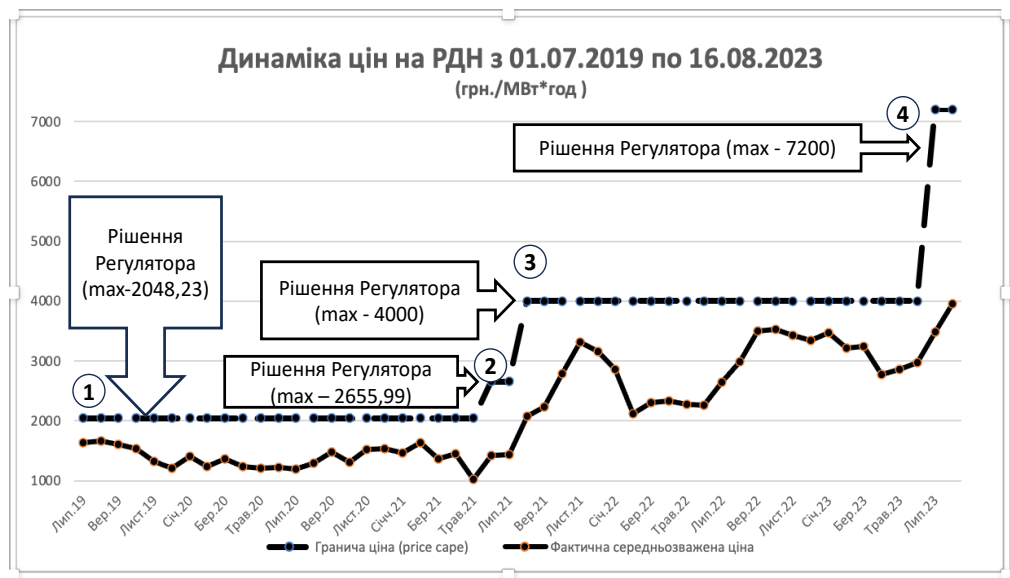


Рисунок 1.4. Динаміка цін на РДН

Як видно із рисунку, з моменту початку роботи ринку ЕЕ в умовах нової моделі Регулятором ринку було чотири рази переглянуто рішення щодо збільшення граничних цін на РДН (станом на серпень 2023 року), починаючи із 2048,23 грн./МВт*год до 7200 грн./МВт*год (1 – постанова НКРЕКП від 24.06.2019 №1169 та від 08.04.2020 №766, 2 – постанова НКРЕКП від 16.06.2021 №973, 3 – постанова НКРЕКП від 30.07.2021 №1227, 4 – постанова НКРЕКП від 27.06.2023 №1126), що, своєю чергою, призвело до збільшення ціни на РДН приблизно у 2,5 рази (ціна під час відкриття ринку складала 1639,74 грн./МВт*год, а станом на 16 серпня 2023 року – 4028,64 грн./МВт*год). Тобто регуляторний вплив перегляду граничних цін суттєво впливає на динаміку цін на РДН і, як наслідок, на ринкову (аукціонну) ціну «товару» ЕЕ виробника.

Наразі серед фахівців (теоретиків, практиків), які займаються проблемами ринку ЕЕ, надзвичайно актуалізувалося питання щодо визначення цін на ЕЕ, оскільки борги енергетичних компаній за поточного рівня цін мають тенденцію до стрімкого зростання за відсутності джерел покриття сформованого дефіциту коштів. Продовження такого негативного тренду вже в найближчий час може поставити під загрозу енергозабезпечення української економіки. Однак навіть якщо окремі цінові показники будуть переглянуті в наступні місяці, то це не змінить загальної тенденції до ускладнення розв'язання завдань із удосконалення системи ціноутворення.

Зазначену проблему неможливо подолати окремими тимчасовими рішеннями уряду та Регулятора, оскільки причини її виникнення мають системний характер і відображають комплексний вплив множини зовнішніх і внутрішніх факторів, які можуть впливати на процес ціноутворення, зокрема соціально-економічних, політичних та історичних факторів. У короткостроковій перспективі такими рішеннями з боку уряду може бути перегляд тарифів для населення та зміни форми ПСЗ (від товарної до

фінансової), а з боку Регулятора - перегляд граничних цін на відповідних сегментах ринку. Але такі рішення фактично теж є ситуативними та, як показує практика, не створюють передумови до вирішення проблеми стабільності функціонування ринку ЕЕ.

Приклад 2. Ринки в країнах ЄС. Не менш складна ситуація із ціноутворенням складається на ринках ЕЕ в країнах ЄС. Періодично проблеми із ціноутворенням на ринках ЕЕ в ЄС виникали й раніше. Докладний огляд та аналіз причин і факторів, що призводили до утворення великих боргів одних учасників ринку перед іншими, наведено в роботі [43] та представлено на сайті [44]. У значенні прикладу наведемо ситуації в деяких країнах ЄС, які призвели до формування проблеми, яка отримала в науковій літературі назву «дефіциту тарифу». Дефіцит тарифу в Іспанії поступово накопичувався з 2000 року і станом на кінець 2013 року Іспанія мала найвищий дефіцит тарифу на ЕЕ серед країн-членів ЄС. Сума непогашеного тарифного боргу оцінюється приблизно в 30 мільярдів євро (3% ВВП). Тарифний дефіцит також фактично став проблемою економічної політики в Іспанії.

Тарифний борг у Португалії також значний. Загальний накопичений тарифний борг був оцінений регулятором на 3,7 млрд євро (2,2% ВВП) на кінець 2013 року; за іншими оцінками уряду, він може бути навіть вищим на рівні 2,6% ВВП (4,4 млрд євро). Це означає значне збільшення, порівняно з 2,85 мільярдами євро (1,7% ВВП) тарифного боргу на кінець 2012 року (ERSE 2013). Більша частина тарифного дефіциту Португалії виникла в 2008, 2012 та 2013 роках.

Франція має дефіцит тарифу на рахунку енергетичної компанії "Внесок у державну службу електроенергії" (CSPE). Цей внесок покриває витрати на підтримання генерації на ВДЕ (які складають 60% CSPE витрати) та когенерації, а також на субсидії й витрати на ЕЕ на Корсиці та на інших островах, а ще на соціальний тариф для незахищених споживачів.

Кумулятивний дефіцит тарифу на кінець 2012 року оцінено французьким енергетичним регулятором в 3,5 млрд євро, що еквівалентно 0,18% ВВП. Французька енергетична компанія у 2013 році мала дефіцит CSPE у розмірі 0,45 мільярда євро. Це формує кумулятивний тарифний борг на кінець 2013 року, який склав приблизно 4 мільярди євро (0,2% ВВП).

На рис.1.5 відображена динаміка цін РДН на європейських ринках за період з 01 липня 2019 року до 18 серпня 2023 року. Як видно, і в цей час відбуваються досить різкі коливання цін, що також може свідчити про незбалансованість застосовуваних регуляторних механізмів, що діють у процесі ціноутворення в контексті обліку зовнішніх факторів, які чинять істотний вплив на нього.

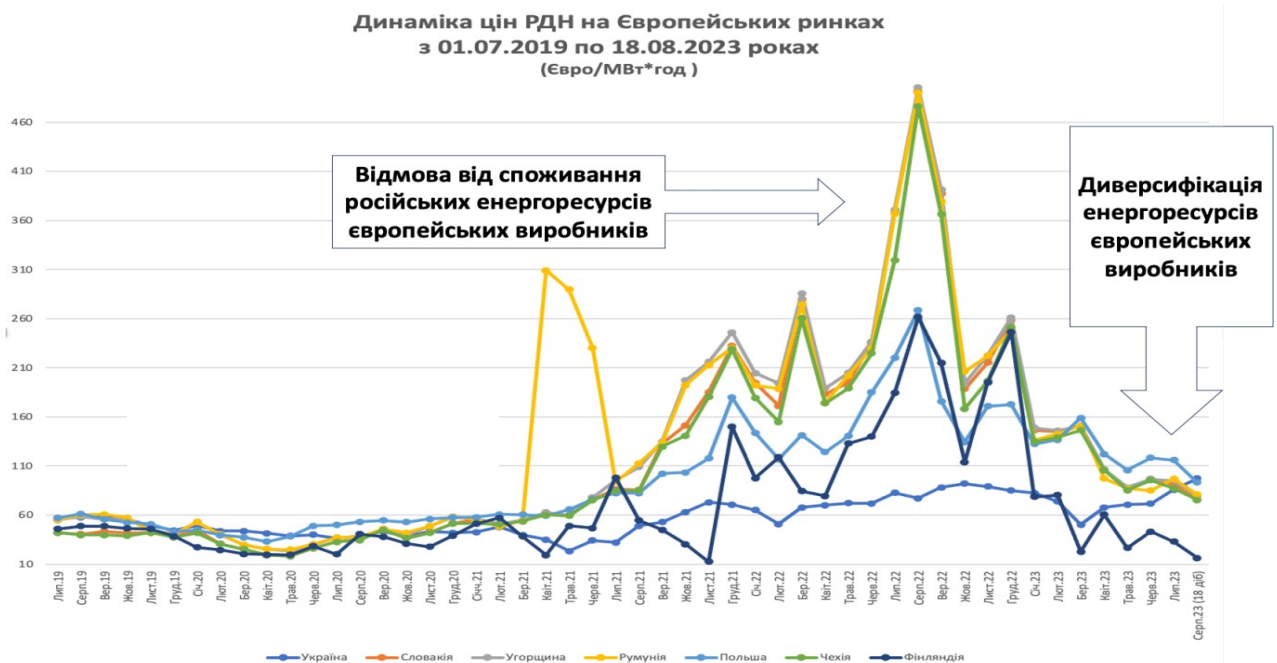


Рисунок 1.5. Динаміка цін РДН на Європейських ринках

Наведені приклади свідчать про необхідність підвищення ефективності управління процесом ціноутворення за рахунок створення більш чіткої системи координації дій учасників ринку ЕЕ та Регулятора на основі результатів випереджувального дослідження проблем ціноутворення з використанням імітаційних моделей, які відображають взаємопов'язані

динамічні потокорозподіли - ЕЕ та фінансів усіх стадій технологічного процесу виробництва, передачі та розподілу ЕЕ.

1.2.2. Інформаційно-технологічне забезпечення процесу ціноутворення

Опис такої системи ціноутворення, у якій повною мірою враховані всі зовнішні (екзогенні) і внутрішні (ендогенні) фактори, що чинять певний вплив на процеси ціноутворення, є досить складним завданням. На основі проведеного аналізу літературних джерел про стан та перспективи розвитку систем ціноутворення можна зробити висновок, що розв'язання більшості завдань щодо організаційного управління в кінцевому підсумку вимагає попереднього, не лише технічного, але й усебічного економічного обґрунтування процедури подання цінових пропозицій торгових заявок, з урахуванням впливу факторів невизначеності, а також оцінювання наслідків прийнятих рішень, зокрема і їхнього подальшого впливу на стан сегментів ринку під час формування рівноважних цін на них. Тому можливо стверджувати, що в нинішніх умовах є актуальним завдання створення системної моделі процесу ціноутворення на ринку ЕЕ, розроблення сучасного математичного й інформаційно-технологічного забезпечення та побудови на основі їх застосування комп'ютерних систем моделювання (КСМ) процесів ціноутворення, задля підвищення продуктивності вирішення завдань щодо розробки та впровадження нових механізмів управління процесом ціноутворення, з урахуванням можливого зниження впливу факторів невизначеності на прийняття рішень.

Практично всі відомі великі світові виробники програмних і програмно-апаратних платформ, зокрема SAP, ORACLE, IBM, Siemens та інші, поставляють комплексні рішення для побудови комп'ютерних систем організаційного управління в енергетиці. Крім цих платформ, на сьогодні у світі розроблено й уведено в експлуатацію комп'ютерні програми й

алгоритми, які забезпечують моделювання процесів функціонування енергоринків. Найбільш відомими з них є NEMS, GEMS, GEMINI (США); PRIMES, PLEXOS (ЄС); NEMSIM (Австралія). Докладний порівняльний аналіз можливостей і особливостей застосування наявних у світі пакетів програм моделювання ринків ЕЕ наведено в роботі [23].

Ці програмні комплекси мають високу вартість, оскільки орієнтовані на великих гравців енергетичних ринків. Аналіз структур виробників і постачальників ринків ЕЕ свідчить, що енергетичні ринки такого масштабу у світі формуються не лише з великих гравців, а й з великої кількості учасників із невеликими оборотними коштами. У таких учасників немає економічних стимулів і можливостей купувати дорогі програмні комплекси для використання як «порадника» під час формування стратегії поведінки на ринку. Крім того, ці комплекси зазвичай не дають можливості оцінити взаємний вплив стратегії і тактики на перспективу багатьох суб'єктів ринку, які є розподіленою генерацією, у процесі його функціонування. Ця обставина додає значну частку невизначеності під час формування стратегії розвитку ринку в цілому для управління процесом планування електроспоживання (попитом на електроенергію), а отже, і процесом ціноутворення на ньому. Визначеність у прогнозуванні ціноутворення на ринку необхідна як суб'єктам ринку, так і кінцевому споживачеві. У цьому випадку визначеність означає розуміння динаміки цінової політики енергоринку як цілісної СОТС ціноутворення для двох основних складових кінцевої ціни поставки — ціни за енергетичний продукт (ЕЕ і потужність) і ціни послуги за його доставку кінцевому споживачеві.

Крім того, необхідно враховувати активний розвиток інформаційних технологій «розумні мережі», «розумні лічильники», «розумні будинки (підприємства)», у яких надзвичайно важливими є не тільки процеси автоматичного (дистанційного) управління обладнанням (вмикання, вимикання, обмеження), але і можливість отримання й формування великої

кількості даних, що містять інформацію про використання ЕЕ через «смарт-лічильники». З кожним роком зростає кількість інформаційних даних, отриманих від цих лічильників (щохвилинне, погодинне, добове, місячне, квартальне, річне). При цьому виникає проблема, як зберегти, накопичити й захистити цю інформацію. Розвиток цифрових технологій і можливості математичного апарату, який отримав назву «штучний інтелект», дають змогу розв'язувати питання щодо створення систем захисту процесів збирання, зберігання, змістовної переробки та використання інформації в інтересах підсистем та елементів СОТС ціноутворення для управління об'єктами споживання енергоресурсів (підприємством, будинком, громадою).

1.3. Аналіз стану досліджень мультиагентних організаційно-технічних систем

У роботах [45, 46] подано аналіз підходів до імітаційного моделювання складних нелінійних динамічних систем, таких як СОТС ціноутворення, описано особливості й доцільність їх застосування, переваги та недоліки. Серед детально розглянутих підходів — системна динаміка, системна динаміка, дискретно-подійне моделювання, діє-орієнтований підхід, процес-орієнтований підхід, подіє-орієнтований підхід, стан-орієнтований підхід, мультиагентний підхід. Наведено низку систем та мов імітаційного моделювання, створених для аналізу динаміки функціонування СОТС. Там же подано порівняльний аналіз сучасних підходів до імітаційного моделювання динамічних систем, який став основою під час вибору мультиагентного підходу для побудови імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку ЕЕ.

В останні два десятиліття у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі, присвяченій дослідженням процесів управління на ринку ЕЕ, для побудови імітаційних моделей використовується підхід, який отримав назву

мультіагентного моделювання. У межах цього підходу розроблено методи й технології побудови комп'ютерних мультіагентних систем (МАС) для розв'язання завдань щодо підвищення активності елементів і підсистем СОТС у процесі прийняття рішень у процесі ціноутворення. Така необхідність виникає і під час проведення заходів із децентралізації управління та розв'язання завдань стосовно вдосконалення механізмів функціонування наявних систем організаційного управління. Огляд публікацій, пов'язаних із застосуванням цього підходу, і класифікацію напрямків його розвитку подано в роботах [45,47].

У наукових дослідженнях [45-47] також наведено приклади використання мультіагентних моделей для аналізу децентралізованих динамічних систем управління, закономірності функціонування яких не вивчені достатньою мірою. Мультіагентні моделі застосовуються для отримання уявлень про загальний характер функціонування таких систем у цілому, виявлення напрямів їхнього розвитку на основі аналізу даних про індивідуальну поведінку їхніх окремих підсистем та елементів (агентів). У роботах [45, 47. 62] на основі аналізу великої кількості літературних джерел вказано характерні ознаки поведінки взаємодії підсистем і елементів (агентів) СОТС, що визначають доцільність застосування мультіагентного підходу для аналізу досліджуваного процесу ціноутворення на ринку ЕЕ. Вважатимемо, що система ціноутворення належить до класу МАС, а процес ціноутворення в цій системі називатимемо мультіагентним. А агенти мультіагентної системи ціноутворення (МАСЦ) ринку ЕЕ є такими, що [45, 46]:

- здатні до цілеспрямованої поведінки задля досягнення як власної мети, так і мети системи (активність);
- діють незалежно один від одного на мікрорівні в загальному інформаційному та організаційному середовищі, мають здатність обробляти інформацію, що надходить, можливість функціонувати без прямого

втручання ззовні і приймати рішення самостійно щодо взаємодії з іншими агентами (автономність прийняття рішень);

- здійснюють діяльність у межах заданого на макрорівні набору правил прийняття рішень з організаційного та оперативно-технологічного управління спільного для всіх агентів, мають здатність до колективної поведінки (колегіальність, кооперативність);

- мають можливість та здатність взаємодіяти між собою з метою обміну інформацією (комунікативність);

- здатні сприймати навколишнє середовище, своєчасно реагувати на зміни закономірності поведінки агентів мікрорівня та можуть впливати на зміни набору правил організаційного та оперативно-технологічного управління макрорівня (реактивність);

- відрізняються один від одного тим, що ідентифікуються за допомогою функціонально-технологічних характеристик, а також індивідуальних правил поведінки в процесі прийняття рішень організаційного та оперативно-технологічного управління, передбачених, наприклад, смарт-контрактами (неоднорідність, гетерогенність);

- мають обмежені можливості для аналізу змін факторів зовнішнього середовища, що виходить за межі комп'ютерної системи інформаційного забезпечення макросередовища (обмежена раціональність);

- відрізняються розташуванням на мікрорівні та макрорівні (розподіленість).

Особливістю мультиагентного підходу, описаного в багатьох літературних джерелах, є те, що його застосування дає можливість подання поведінки елементів систем на високому рівні деталізації для імітаційного моделювання реальних процесів організаційної, оперативно-технологічної, економічної та інформаційної взаємодії підсистем і елементів систем управління. Наведене обґрунтування дає змогу зробити висновок про

доцільність застосування мультиагентного підходу для побудови імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку ЕЕ.

Мультиагентне моделювання застосовується і для вирішення проблем розвитку електроенергетичних систем. У роботах [50, 51] на основі аналізу міжнародного досвіду розвитку ринків ЕЕ, їхнього інформаційного та нормативного забезпечення в межах розвитку концепції Smart Grid відзначено зростаючу роль «активного споживача» в процесах ціноутворення на ринку і взаємодії з розподільними електричними мережами, а також обґрунтовано необхідність створення системи мультиагентного управління енергосистемою, розроблено інформаційну модель еталонної архітектури ОЕС України. Там же подано огляд та аналіз сучасних технологій мультиагентного моделювання, чинних стандартів у сфері створення МАС, а також програмних середовищ для розроблення мультиагентних моделей.

Отже, бачимо, що система управління ціноутворенням на ринку ЕЕ належить до числа децентралізованих, динамічних, розподілених СОТС і є багаторівневою, територіально розподіленою системою, яка складається з множини підсистем і елементів, взаємопов'язаних між собою вертикально та горизонтально системоутворюючими зв'язками. Вибір мультиагентного підходу для імітаційного моделювання процесів ціноутворення в цій системі управління обумовлено також додатковими можливостями для генерування і враховування впливів навколишнього середовища (наприклад, динаміки цін на ринках енергоресурсів), моделювання змін поведінки основних підсистем — сегментів ринку — залежно від зміни інституційних норм, врахування змін конкурентоспроможності агентів, моделювання різних механізмів ціноутворення й аналіз можливих змін енергокомпаній у процесі вироблення своєї тактики і стратегії поведінки на ринку, моделювання розвитку й прогнозування можливих результатів

реалізації інвестиційних проєктів у сфері відновлюваної енергетики з позиції основних учасників ринку тощо.

1.4. Висновки до розділу 1

1. Визначено, що система управління ціноутворенням на ринку ЕЕ належить до числа централізованих динамічних розподілених СОТС і є ієрархічно побудованою, багаторівневою, багатоелементною (мультиагентною), територіально розподіленою системою, яка складається з множини підсистем і елементів, взаємопов'язаних між собою вертикально та горизонтально системоутворюючими зв'язками.

2. Розглянуто сучасний стан досліджень загальної проблеми математичного та комп'ютерного моделювання процесу формування цін у СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації інформаційно-технологічного забезпечення вирішення задач із моделювання й обчислення у процесі ціноутворення в умовах енергетичного переходу, пов'язаного з упровадженням сучасних вимог концепції «декарбонізації, децентралізації, діджиталізації» до наявних електроенергетичних систем. Виокремлено коло науково-практичних проблем у функціонуванні сучасних систем ціноутворення на ринку ЕЕ.

3. Обґрунтовано на основі аналізу публікацій, що актуальною є науково-прикладна проблема розроблення методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу функціонування СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації та оптимізації процесів підготовки та використання моделюючих систем як носіїв моделей у СОТС, організації інформаційно-технологічного забезпечення всебічного дослідження процесу ціноутворення та впровадження нових механізмів управління процесом ціноутворення.

РОЗДІЛ 2

ПРОЦЕС ЦІНОУТВОРЕННЯ НА РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЯК СКЛАДНА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНА СИСТЕМА

Дослідженням процесу ціноутворення на ринках ЕЕ у багатьох країнах світу як одній із ключових проблем розвитку ринку, як зазначено в розділі 1, присвячено дуже багато робіт. Зупинимося коротко на огляді тих робіт, які найбільш дотичні до пропонованого в цій роботі підходу до моделювання процесу ціноутворення.

У роботі [52], яка присвячена аналізу процесів тарифо- та ціноутворення на ЕЕ у країнах ЄС та Організації економічного співробітництва та розвитку, стверджується, що на сьогодні немає єдиних правил щодо формування тарифів (цін) на ЕЕ у світовій енергетичній сфері та на внутрішньому ринку країн-членів ЄС. Це пов'язано з вимогами щодо раціонального використання енергії та дотримання принципів енергоощадності в кожній окремій країні.

Складність вирішення проблеми з формування цін та тарифів обумовлена тим, що ЕЕ займає проміжне положення між товарами та послугами. Тому, на думку фахівців, тарифи на неї є чимось середнім між ціною на товар та тарифами на послуги. Крім того, тарифи, що встановлюються регуляторами ринку, які виконують регуляторну функцію для дотримання балансу інтересів продавців та покупців ЕЕ, мають забезпечувати й функцію розподілу доходів між численними енергетичними компаніями, що здійснюють спільно її виробництво та постачання кінцевому споживачеві.

Саме для дослідження зазначених вище проблем у багатьох наукових центрах, зокрема і в Україні [53], проводять роботи зі створення імітаційних моделей функціонування ринку ЕЕ та окремих його сегментів. Детальний огляд та аналіз робіт, присвячених побудові імітаційних моделей ринку ЕЕ,

з описом їхніх можливостей, можна знайти в роботах [53-56]. А з оглядом мультиагентних моделей такого класу можна ознайомитися в роботі [57].

У науковому дослідженні [58] розглянуто дуже важливе питання щодо моделювання процесів тарифо- і ціноутворення на роздрібному ринку, а на основі результатів моделювання сформульовано рекомендації щодо розрахунків тарифів для споживачів та окремих елементів структури системи передачі ЕЕ.

Робота [59] присвячена створенню гібридної моделі ринку, яка поєднує метод математичної оптимізації й об'єктноорієнтований підхід та використовується для вивчення поведінки операторів блоків електростанцій німецької енергосистеми в умовах діючих механізмів функціонування ринку і зростання кількості генеруючих об'єктів, що використовують ВДЕ. Наведені результати показують можливі зміни ринкових цін за умови використання різних сценаріїв розвитку подій.

Відомо, що енергетичні компанії, які також є агентами загальної системи ціноутворення, розв'язують низку завдань, що пов'язані з постановкою цілей ціноутворення, аналізом факторів, що впливають на ціноутворення, вибором методу ціноутворення залежно від обраної стратегії ціноутворення, встановлення цін. Очевидно, що основою для побудови системи формування таких цін і тарифів, які давали б змогу одночасно з максимально можливим урахуванням інтересів усіх учасників процесу виробництва і транспортування енергії під час розподілу доходів від продажу ЕЕ враховувати спроможності покупців – кінцевих споживачів – сплачувати енергію, може стати система безперервного відстеження динаміки процесу ціноутворення від виробника до споживача.

У цьому розділі, на основі результатів попереднього розділу, а також аргументів, наведених у роботах [60-62], розглядаємо важливі для постановки й розв'язання прикладних задач щодо моделювання досліджуваного процесу ціноутворення питання щодо його математичного

опису як сукупності формалізованих етапів та стадій процесу у виділеній СОТС ціноутворення.

2.1. Етапи опису процесу ціноутворення

Основним призначенням опису процесу ціноутворення є його застосування задля створення адекватної імітаційної моделі досліджуваного процесу. Для побудови моделі, як відомо, важливим етапом є аналіз об'єкта дослідження предметної області моделювання, виділення найбільш істотних і відмітних особливостей динаміки процесу, його структуроване уявлення у вигляді взаємопов'язаних певним чином частин - підсистем, кожна з яких має свої чітко виражені особливості впливу на об'єкт, та визначення факторів впливу на об'єкт дослідження.

Очевидно, що досліджуваний процес ціноутворення не може розглядатися у відриві від технологічного процесу виробництва продукції, яка випускається. У нашому випадку такою продукцією є ЕЕ. У процесі виробництва й доставки (постачання) її кінцевому споживачеві одночасно беруть участь тисячі енергетичних компаній (агентів ринку ЕЕ), які забезпечують виробництво, транспортування ЕЕ високовольтними лініями електропередачі, диспетчеризацію виробництва і споживання енергії з метою виконання досить жорстких вимог до стійкості режимів функціонування ОЕС і до випуску продукції необхідної якості, розподілу і збуту ЕЕ кінцевому споживачу.

Особливість взаємодії агентів ринку ЕЕ від взаємодії агентів на ринках інших видів продукції полягає в тому, що технологічно електроенергетична галузь є цілісною єдиною системою виробництва і споживання ЕЕ. Вона пов'язана з безперервним і нерозривним (миттєвим) характером виробництва, передачі, розподілу й споживання продукції, яку на цей час можна вважати такою, що не накопичується. Має територіальний характер споживання ЕЕ в ОЕС, з обмеженими можливостями

маневрування ресурсами виробництва продукції через неможливість їх миттєвого запуску або зупинки, з обмеженими можливостями міжсистемних перетоків потужності у вузлах ОЕС, з неминучими втратами під час передачі ЕЕ у лініях електропередачі. Наявність єдиних транспортних магістралей об'єктивно зумовлює необхідність активізації режиму централізованого диспетчерського управління завантаженням усіх генеруючих блоків електростанцій, пов'язаних паралельною синхронною роботою в ОЕС, та навантаженням усіх споживачів із метою безперервного дотримання балансу пропозиції та попиту в ОЕС.

Наступним етапом є побудова опису факторів впливу зовнішнього середовища на процеси, що відбуваються в електроенергетиці, зокрема й ті, що набувають масштабного характеру в розвитку електроенергетики в багатьох країнах світу. Це передусім процеси, що пов'язані з декарбонізацією виробництва ЕЕ, децентралізацією процесів управління і диджиталізацією (цифровізацією) технологічних процесів під час виробництва, передачі та споживання ЕЕ. До переліку зовнішніх і внутрішніх факторів, які можуть впливати на процес ціноутворення з різним ступенем впливу, які описані в багатьох публікаціях, можна віднести такі.

А) Зовнішні політичні.

1. Регулювання цін із боку держави.
2. Державне регулювання моделі ринку.
3. Динаміка цін на газ, нафту й вугілля.
4. Ліміти на споживання певних видів палива.

Б) Зовнішні сезонні.

1. Залежність попиту на ЕЕ від метеофакторів.
2. Використання дорогого викопного палива на пікових навантаженнях.

3. Паводкові періоди роботи гідроелектростанцій (ГЕС).

В) Зовнішні екологічні.

1. Водність річок.
2. Пріоритет завантаження теплових електростанцій (ТЕС) перед атомними електростанціями (АЕС).

Г) Внутрішні ринкові.

1. Погодинні ціни, які подають учасники ринку у своїх заявках.
2. Обсяги, що подають учасники в заявках.
3. Структура цінових заявок учасників ринку.
4. Індивідуальні цінові стратегії учасників ринку.
5. Доля ціноприймальних заявок.
6. Ступінь конкурентності середовища для постачальників і споживачів.

7. Випадки маніпулювання цінами.

Д) Внутрішні економічні.

1. Рентабельність цінових заявок генерації.
2. Урахування в цінових заявках індивідуальних особливостей споживачів (неплатежі, перехресне субсидування).

Е) Внутрішні технологічні.

1. Склад та параметри генеруючого обладнання на операційну годину (типи електростанцій, види використовуваного палива).
2. Прогноз електроспоживання територією, що виконується ОСП.
3. Повідомлення про склад і параметри генеруючого обладнання.
4. Необхідні резерви на збільшення або зниження навантаження.
5. Регламентування режимних обмежень під час роботи обладнання.
6. Ремонтні компанії (особливо великих електростанцій – ТЕС, теплоелектроцентралей (ТЕЦ), АЕС і ГЕС).
7. Аварії, позапланові ремонти генеруючого обладнання.
8. Актуальна топологія електричної мережі.
9. Системні обмеження.
10. Розміщення резервів потужності.

11. Уведення нових потужностей.

Ж) Внутрішні сезонні.

1. Залежність попиту на ЕЕ від метеофакторів.
2. Використання дорогого палива на пікових навантаженнях.
3. Паводкові періоди роботи ГЕС.
4. Робота електростанцій на теплофікаційному режимі.
5. Сезонні ремонти (літо).

З) Внутрішні географічні.

1. Розташування споживачів у районах із дорогою генерацією.
2. Розміщення ГЕС.

Серед наведеного переліку факторів впливу, є такі, що важко враховуються і не завжди піддаються кількісному оцінюванню ступеня впливу на процес ціноутворення й фактично стають факторами ризику. Але він дає змогу виділити певні класифікаційні групи ризиків, які виникають у процесі ціноутворення: ринкові, виробничі, комерційні, природні, політичні, юридичні, екологічні, фінансові, маркетингові, технічні, посередницькі, банківські, страхові та ін.

У літературі ринкові фактори зазвичай характеризують як мінливість доходів через невизначеність ринкових цін на ЕЕ і коливань попиту на неї. Наприклад, для ГК об'єктивна відсутність достовірної інформації про потенційний обсяг попиту на ЕЕ призводить до виникнення спектру ризиків під час формування торгових заявок.

Паливні ризики зазвичай пов'язують із коливаннями цін на паливо, особливостями виробництва палива, співвідношенням паливо/потужність, збоями в доставці/постачанні палива, а також ризиками в транспортуванні палива під час експлуатації електростанції.

Відомі і класифіковані різні види енергетичних ризиків із позиції можливості їхнього регулювання (обліку) енергетичними компаніями. Зокрема для ГК основними вважаємо такі групи: фінансові (неплатежі

покупців, кредитні); регуляторні (тарифи, обмеження зростання цін); ринкові (зниження попиту на ЕЕ, зміни цін на використовувані ресурси). Серед енергетичних компаній основними, найбільш істотними ризиками можуть бути: ризик зміни законодавства щодо регулювання електроенергетики; ринковий ризик стосовно зміни механізмів ціноутворення на енергію й потужність; ринковий ризик зміни цін на енергетичну сировину, експлуатаційно-технологічний ризик.

Одночасна реалізація цих дуже складних процесів розвитку електроенергетики обумовлює необхідність проведення структурних перетворень, а отже, і залучення значних фінансових ресурсів. Крім того, необхідно наголосити й на ролі електроенергетики в розв'язанні завдань із реалізації права соціального захисту населення. Отже, можна стверджувати, що система ціноутворення фактично одночасно є і підсистемою більш складної еколого-соціально-економічної системи держави.

Опис такої системи ціноутворення $S = \langle A, F, R, P \rangle$, де A - агенти ринку, F – фактори впливу, R – регуляторні механізми, P – показники тарифо- і ціноутворення, у якій повною мірою враховуються всі зовнішні (екзогенні) і внутрішні (ендогенні) фактори, що чинять певний вплив на процеси ціноутворення, є досить важким завданням. Тому на цьому етапі дослідження приймемо допущення, що вплив основних зовнішніх факторів, які впливають на процес ціноутворення і пов'язані з виконанням вимог екологічного та соціального характеру, враховуються Регулятором ринку шляхом застосування відповідних регуляторних механізмів і набувають відображення під час встановлення тарифів на оплату ЕЕ для різних груп споживачів на підсумковому етапі процесу ціноутворення.

2.2. Стадії технологічної процесу ціноутворення

Будемо розглядати процес ціноутворення як нерозривно пов'язаний із технологічними стадіями процесу виробництва ЕЕ і постачання її кінцевому

споживачеві. Таких стадій, що відображають функціональну структуру електроенергетики, у різних літературних джерелах виділяють декілька: генерація енергії високої напруги; диспетчеризація генерації високої напруги; передачі енергії високовольтними лініями передач високого (110-220 кВ), надвисокого класу (>220 кВ); диспетчеризація перетоків електроенергії у вузлах ОЕС в умовах обмежень перетоків потужності; надання системних послуг; генерація низької напруги; розподіл ЕЕ за мережами середнього класу (до 35 кВ), диференційованих залежно від напруги й доставки постачальникам; збут роздрібним споживачам. На основі такого функціонального уявлення можна вибудувати ланцюжок вузлів, у яких відбувається не тільки трансформація енергії та її потокорозподіл, але й перехід права власності на продукцію і зміна її ціни. Надалі ці вузли будемо називати елементарними вузлами перетворення (трансформації) ціни на ЕЕ у єдиній СОТС ціноутворення, а сам процес трансформації ціни – економічним потокорозподілом.

Представляючи потік енергії від виробника до споживача як послідовне проходження сукупності стадій трансформації енергії, приходимо до ланцюжка вузлів трансформації ціни на ЕЕ. Природно, що величина зміни ціни в цих елементарних вузлах безумовно залежить від обсягу ЕЕ, яка пройшла через нього, і від тарифу, встановленого Регулятором ринку для цієї категорії послуг ОР, ОСП і Операторам системи розподілу (ОСР).



Рисунок 2.1. Стадії технологічного процесу ціноутворення

2.3. Формалізація процесу ціноутворення

Розглянутий процес у СОТС ціноутворення в результаті взаємопов'язаної діяльності функціональних підсистем формує потоки децентралізованого організаційного (потік регуляторних впливів), технологічного (потік енергії), економічного (потік комерційних даних) та інформаційного (потік показників стану ринку й зовнішнього середовища) управління, які забезпечують функціонування процесу динамічного ціноутворення.

Системний аналіз процесів такого класу складності передбачає декомпозицію досліджуваного процесу та його подання у вигляді сукупності взаємопов'язаних складних підсистем і їхніх складових елементів. У нашому випадку пропонуємо виділити три підсистеми для стадій трансформації, які умовно назвемо "товар", "послуга", "продукт", адже вони охоплюють діяльність основних функціональних структур управління ринком ЕЕ на різних стадіях процесу ціноутворення. Це структури: організаційного (регуляторного) управління ціноутворенням на

оптовому та роздрібному ринках – Регулятор ринку; оперативно-технологічного управління ціноутворенням під час виробництва, передачі та розподілу ЕЕ – ОСП; організаційного (адміністративного) управління ціноутворенням на сегментах оптового ринку – ОР; організаційного управління учасниками оптового та роздрібного ринків. У подальшому елементи підсистем (сегменти ринку) називатимемо елементарними вузлами, а складові їхні компоненти (окремі енергетичні компанії-виробники, постачальники, транспортери ЕЕ) – вузловими точками. У кожному вузлі й вузловій точці послідовно вирішуються такі завдання ціноутворення: постановка цілей ціноутворення; аналіз факторів, що впливають на ціноутворення; вибір методу ціноутворення залежно від обраної стратегії ціноутворення; встановлення цін. Виділені підсистеми вузлів трансформації (перетворення) ціни на ЕЕ формуються з елементарних вузлів і вузлових точок. Спрощена схема ланцюга трансформації ціни зображена на рис. 2.2.

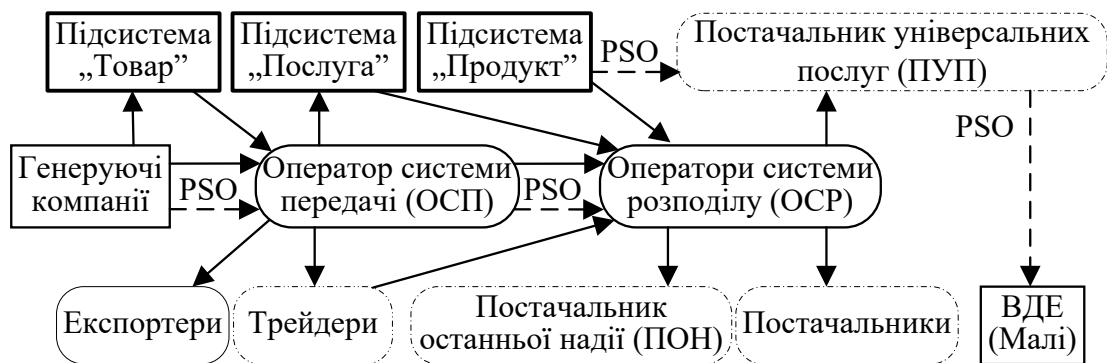


Рисунок 2.2. Схема ланцюга трансформації ціни

Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "товар", утворюють сегменти оптового ринку: РДД, РДН, ВДР, БР. Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "послуга", утворюють вузли: РДП, ГарПОК, оператор системи розподілу (ОСР), ОСП. Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "продукт" (роздрібний ринок), утворюють вузли: ПУП, "енергозбутові компанії" (постачальники),

постачальник останньої надії (ПОН), ГУ з використанням ВДЕ, "споживачі".

Очевидно, що наведена формалізація процесу ціноутворення шляхом його декомпозиції та представленні у вигляді трьох взаємопов'язаних підсистем економічного поточкорозподілу, прив'язаних до фактичного адресного розподілу виробленої ЕЕ в мережах електропередавання не є єдиною можливою. Необхідно також зазначити, що для обліку всіх особливостей процесу ціноутворення з урахуванням впливу на нього зовнішніх факторів знадобиться більша деталізація виділених стадій трансформації ціни.

2.4. Архітектура мультиагентного середовища процесу ціноутворення на ринку електроенергії

2.4.1. Мультиагентне імітаційне моделювання

Імітаційне моделювання процесів організаційного управління в СОТС на основі застосування парадигми мультиагентного моделювання є відносно новим підходом до дослідження процесів функціонування динамічних багатоагентних систем. Особливістю цих систем є те, що вони утворюються з неоднорідною множиною автономних агентів із різним ступенем автономності щодо володіння ресурсами виробництва можливостями їх використання. Такі агенти взаємодіють один з одним та з навколишнім середовищем, реалізуючи в процесі виробництва власні інтереси, а водночас інтереси системи загалом у процесі досягнення загальної цілі функціонування. З численних літературних джерел відомо, що такі системи часто самоорганізуються і створюють власні внутрішні правила організаційної, технологічної, економічної взаємодії.

Отже, характерна особливість створення імітаційних моделей таких мультиагентних систем полягає в тому, що вони, як правило, охоплюють не лише моделі досліджуваних процесів, автономних агентів, а й моделі поведінки їхніх коаліцій. Вони використовуються для спостереження за

індивідуальними й колективними ефектами поведінки агентів, особливостями їхньої взаємодії в розв'язанні виробничих завдань та виявлення нових закономірностей у розвитку досліджуваних процесів.

У монографіях [51, розділ 2] та [63, розділ 4] на основі міжнародного досвіду використання мультиагентних технологій під час моделювання та керування в електроенергетиці розглянуто особливості представлення оперативно-технологічної взаємодії структурних установок електричних мереж — об'єктів предметної галузі дослідження, зокрема й активних споживачів, у вигляді мультиагентних систем (МАС) керування. Розроблено загальні моделі активного споживача та системи керування режимами, які дають змогу описувати будь-якого активного споживача ЕЕ в системах електропостачання. Розглянуто особливості постановки задач щодо оптимізації вибору режимів роботи системи електропостачання із активним споживачем та розосередженою генерацією. Запропоновано моделі систем керування режимами в умовах застосування різних типів обладнання активного споживача та об'єднання таких споживачів із централізованою системою енергопостачання. Обґрунтовано, що використання моделей МАС у керуванні ЛЕС дає можливість реалізувати оптимальні та ефективні режими технологічної взаємодії між активними споживачами та наявною системою електропостачання під час створення нових інтелектуальних систем електропостачання на основі реалізації концепції Smart Grid.

У роботі [50] на основі дослідження міжнародної нормативної бази із забезпечення вимог щодо впровадження Smart Grid запропоновано комплексну платформу задля організації роботи ОЕС з активним споживачем, що охоплює нормативну базу, інформаційне забезпечення, засоби моделювання активного споживача і його взаємодії з системним оператором, а також визначено необхідні заходи, що забезпечують ефективну взаємодію активних споживачів між собою та з системним

оператором.

Візьмемо також до уваги, що наведені в наукових дослідженнях [50, 51, 63] результати свідчать, що, незважаючи на наявність певних проблем та складність завдань щодо керування технологічними процесами виробництва, передачі та споживання ЕЕ, шляхи їх розв'язання можуть бути знайдені в процесі застосування мультиагентних технологій моделювання. Будемо також припускати, що питання, які виникають під час організації взаємодії щодо регулювання ціноутворення між ОРЕ та мікроринком ЛЕС, можуть бути розв'язані за допомогою математичної моделі, запропонованої в роботі [64]. Тому будемо розглядати тільки питання щодо побудови на базі технологій МАС такої імітаційної моделі, предметною областю якої є система організаційного управління безперервним у часі (динамічним) процесом ціноутворення.

За останні роки побудові імітаційних моделей для аналізу ринків ЕЕ різного масштабу на основі використання мультиагентного підходу в науковій літературі присвячено велику кількість робіт. У частині з них висвітлені загальні питання розвитку методології мультиагентного моделювання та порівняльному аналізу застосовуваних підходів і платформ для побудови імітаційних моделей процесів функціонування ринків ЕЕ, що ускладнюються в умовах децентралізації, декарбонізації енергетики. Результати проведених досліджень проблем, що виникають та вимагають розроблення нових правил централізованої системи для локальних агентів, які можна було б внести до системи, опубліковано в роботах [65, 66]. Окрім того, було наведено приклади обґрунтування методології та організації процесу, що використовуються для розроблення імітаційних моделей, що використовуються для проведення комп'ютерного моделювання в просторово-міжчасовому середовищі. Найбільш повний, ґрунтовний та регулярно оновлюваний огляд робіт, присвячених практичному застосуванню мультиагентного імітаційного моделювання для розв'язання

досить широкого спектру завдань щодо аналізу функціонування ринків ЕЕ у різних країнах світу, розміщується на сайті, адреса якого вказана в публікації [67].

Враховуючи ту обставину, що до сьогодні в науковій літературі немає чітко сформульованого загальноприйнятого визначення поняття «агент», у цій роботі дотримуватимемося узагальненого визначення, яке наведене в монографії [45] з посиланням на роботи [68, 69]: агент — це сутність, що розташована в деякому навколишньому середовищі та спроможна до автономних дій у ньому для того, щоб забезпечити досягнення цілей, закладених у неї. Таке визначення дає підстави вважати агентами велику кількість сутностей, зокрема людино-машинні об'єкти, комп'ютерні програми та групи людей. У нашому випадку в умовах реалізації процесу децентралізації ринку ЕЕ кожен учасник ринку може отримати більше можливостей для впливу на процеси управління ціноутворенням. Тому дотримуватимемося визначення, наведеного в роботі [70], відповідно до якого, автономний агент – це система (яка спроможна приймати рішення), що перебуває в середині оточення і є його частиною, яка сприймає це оточення (його сигнали) і впливає на нього задля виконання своєї програми дій.

У роботі [48] розглянуто процес формулювання завдань щодо побудови імітаційної моделі процесу ціноутворення як мультиагентної системи, до складу якої входить множина автономних агентів, які приймають рішення і діють у зовнішньому середовищі для досягнення загальних цілей СОТС або індивідуальних (можливо конфліктуючих) інтересів і стратегій. І тільки в такому функціональному призначенні мультиагентна імітаційна модель процесу ціноутворення імітує роботу діючої СОТС ціноутворення. При цьому СОТС ціноутворення представляє собою складну динамічну систему децентралізованої взаємодії між агентами (виробниками, постачальниками ЕЕ і послуг) та споживачами в

процесі взаємопов'язаного електричного та економічного поточкорозподілу на всіх етапах трансформації ціни на ЕЕ від виробника до споживача. Однією з ключових вимог до її імітаційної моделі є те, що вона має розвиватися з урахуванням динаміки змін у зовнішніх факторах впливу на ціноутворення на ринку, зокрема впливу організаційної, технічної й інформаційно-технологічної інфраструктури діючого централізованого ринку.

Тому розглянемо далі питання щодо побудови архітектури мультиагентного середовища імітаційної моделі процесу ціноутворення як системи взаємопов'язаної організаційної, інформаційної, технологічної та економічної взаємодії агентів у єдиному процесі ціноутворення в СОТС мікроринку ЕЕ у ЛЕС.

2.4.2. Формалізація процесу ціноутворення для мультиагентної імітаційної моделі

У роботі [45] наведено визначення, яке безпосередньо стосується агентів імітаційного моделювання. Під агентом імітаційного моделювання розуміють модельовану сутність досліджуваної предметної області, яка розташована в модельованому навколишньому середовищі та спроможна до автономних дій у ньому для того, щоб забезпечити досягнення закладених у неї цілей. Принципово важливими є і вимоги до складу основних елементів імітаційних моделей, що розробляються. Моделі такого класу мають містити три елементи [45]: множину агентів та їхніх властивостей; навколишнє середовище — простір, у якому безпосередньо діють та взаємодіють агенти; множину правил, що визначають, як агенти діють у навколишньому середовищі та взаємодіють між собою. Навколишнє середовище стає ключовим елементом імітаційної моделі в значенні мультиагентного комунікаційного середовища агентів процесу ціноутворення. Воно містить такі складові: набір програмно-апаратних засобів комунікації, що забезпечують функціонування систем комунікації

та управління процесом інформаційної взаємодії автономних агентів; набір засобів інформаційно-технологічного забезпечення, що дають змогу формувати, зберігати, використовувати дані про динаміку функціонування мультиагентної системи та спільні знання про вплив зовнішнього середовища, а також аналізувати результати роботи та механізми координації агентів із реалізації мети системи; набір засобів математичного забезпечення для розв'язання завдань з імітаційного моделювання процесу ціноутворення.

Характерна риса СОТС, яка полягає в тому, що на процес ціноутворення в ній може істотно впливати зовнішня багаторівнева система організаційного й оперативно-технологічного управління, а також зовнішні чинники, прояв яких у часі має переважно непрогнозований характер. Тому поряд з описаними вище трьома елементами імітаційної моделі є доцільним врахування й четвертого елемента, який назвемо зовнішнім середовищем. А сукупність множин автономних агентів, агентів навколишнього середовища, правил взаємодії агентів, факторів зовнішнього середовища назвемо мультиагентним середовищем імітаційної моделі процесу ціноутворення ринком ЕЕ.

Отже, утворюється гетерогенна, розподілена, мультиагентна система, до множини агентів якої увійшли агенти, різноманітні за своїм функціональним призначенням, у значенні яких виступають складові у вигляді мультиагентних систем, що перебувають у зовнішньому середовищі інтегрованої системи енергоринку, через яке здійснюється взаємодія цих систем.

2.4.3. Концептуальна схема інтегрованої мультиагентної системи ціноутворення

На рис. 2.3 зображена концептуальна схема інтегрованої мультиагентної системи, яка відображає ієрархічну підпорядкованість її складових та необхідний рівень деталізації подання предметної області

модельовання ринку ЕЕ. Агенти Оптового ринку електроенергії (ОРЕ) — ПУП та ОСР забезпечують зв'язок фізичного (енергії) та економічного (фінансів) потокорозподілів із централізованою енергосистемою. У результаті МАС мікроринку стає агентом в інтегрованій за своєю структурою мультиагентній системі ціноутворення (МАСЦ) ОРЕ. З точки зору організації управління її можна розглядати окремо в складі власних агентів, що взаємодіють у навколишньому середовищі, на яке впливає зовнішнє середовище ОРЕ. Отже, процес керування таким об'єктом можна подати у вигляді класичної схеми управління (див. рис. 2.4) зі зворотними зв'язками та компенсацією завад, у якій система управління - це сукупність агентів, об'єкт управління – це правила навколишнього середовища, а завади – це вплив зовнішнього середовища.

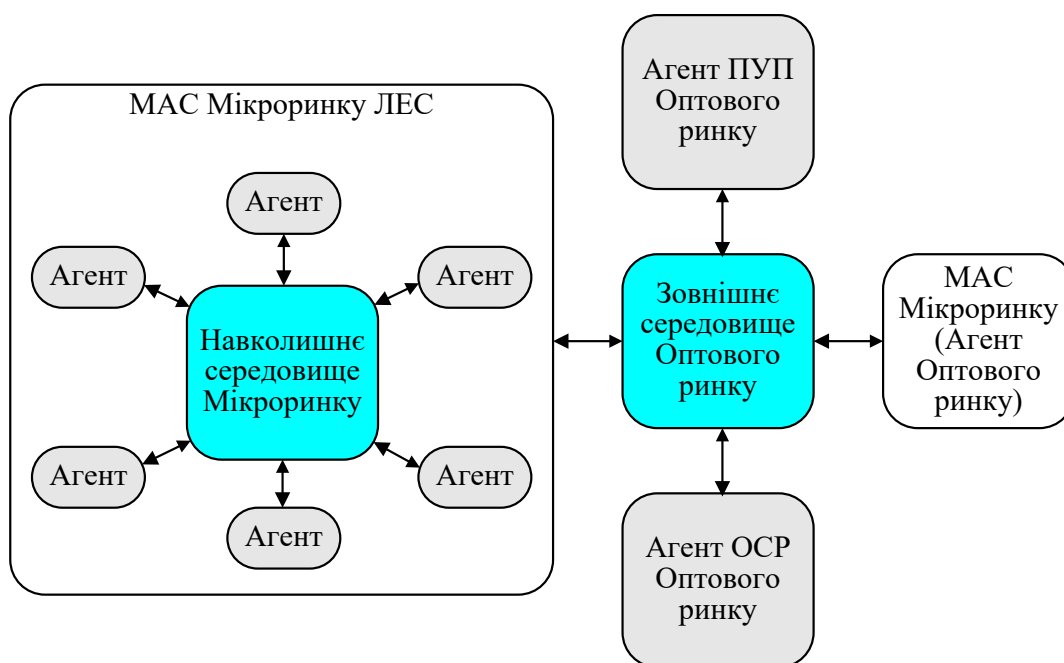


Рисунок 2.3. Архітектура гетерогенної розподіленої МАС процесу ціноутворення

Кожен агент на рис.2.4 через рецептори-датчики вимірює й формує власне бачення стану навколишнього середовища та через систему дій за допомогою ефекторів-прийняття рішень впливає на його утворення. Такий підхід до розгляду всіх агентів системи сприяє формуванню уявлення про загальний стан середовища, але воно може бути неповним, оскільки виміри

кожного агента є суб'єктивними й частковими. Уся сукупність агентів мікроринку ЛЕС поділяється на внутрішні й комунікаційні агенти. Внутрішні агенти складаються із суб'єктів ЛЕС, а комунікаційні — із забезпечувальних засобів, що підтримують взаємодію внутрішніх агентів між собою та із зовнішнім середовищем у гетерогенній розподіленій мультиагентній системі.

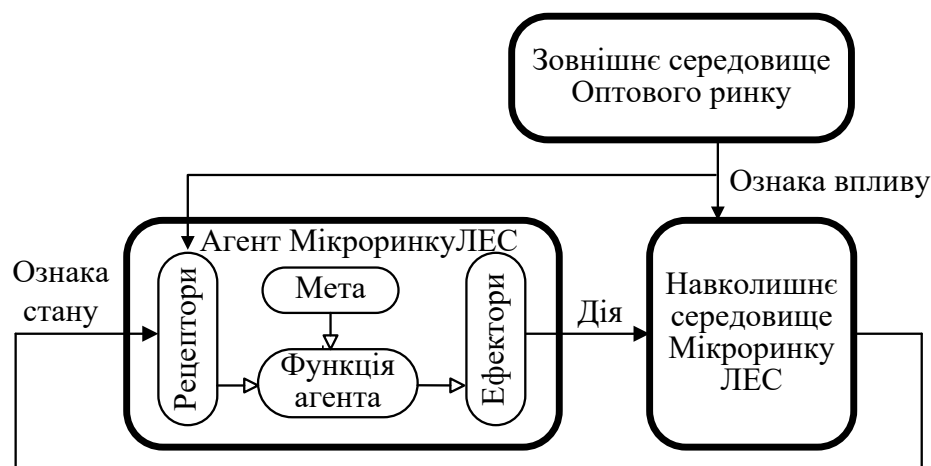


Рисунок 2.4. Архітектура агента в інтегрованій МАСЦ ОРЕ

Вважатимемо, що ЛЕС побудовано шляхом використання складових концепції Microgrid [38, 63], ключовою з яких є цифровізація, відповідно до якої до переліку структурних елементів ЛЕС належать не лише генерувальні установки та електричні мережі, а й «розосереджені пристрої і передавачі, які реалізують функції контролю, вимірювання, передавання даних до центрів оперативного управління» [38]. До числа елементів ЛЕС віднесено також інформаційно-комунікаційні мережі, що реалізують функції обміну даними між пристроями та забезпечують оброблення даних, що надходять від цифрових пристроїв. Крім того, МАСЦ ОРЕ має забезпечувати можливість побудови індивідуального інтерфейсу взаємодії з середовищем для імітованого агента задля інформаційної підтримки прийняття ним рішень. Необхідність реалізації автономним агентом функцій децентралізованого мультиагентного управління процесом ціноутворення вимагає створення в середовищі спеціальних засобів для забезпечення

коректного сприйняття ним інформаційних повідомлень на основі використання уніфікованої мови комунікації агентів із метою організації належної взаємодії й обміну інформацією та формування механізмів координації цілеспрямованої діяльності агентів. Не менш важливим є і надання автономним агентам можливостей для планування й корегування їхньої неоднорідної поведінки відповідно до певної угоди з початку спільної діяльності агентів, адаптування до мінливого середовища та розв'язання конфліктів між агентами. На основі аналізу реальних можливостей мультиагентного середовища створюються моделі агентів різних функціональних типів. У нашому випадку характерна риса зовнішнього середовища полягає в тому, що воно ґрунтуватиметься на інформаційно-технологічній взаємодії агентів-учасників ринку ЕЕ в імітованому процесі наявної системи ціноутворення, яку створено відповідно до Правил ринку [2] та інших нормативних документів [3].

Варто також зазначити, що в мультиагентному середовищі взаємодіють об'єкти множини імітованих агентів – моделі агентів, функціональна діяльність яких обмежена тільки чинними Правилами ринку й системою технічних обмежень, пов'язаних із необхідністю забезпечення стійкої роботи ОЕС та надійного постачання ЕЕ кінцевому споживачеві. Побудоване таким способом навколишнє середовище в мультиагентній імітаційній моделі ціноутворення надасть агентам можливості не лише розв'язувати поточні завдання в межах торгової діяльності, але й досліджувати різні еволюційні сценарії розвитку системи ціноутворення з урахуванням різних припущень щодо вдосконалення регуляторних механізмів, інституційних норм з урахуванням технологічних змін у структурі виробництва ЕЕ в майбутньому за допомогою засобів математичного забезпечення та інформаційно-аналітичної системи аналізу процесу ціноутворення.

Відповідно до класифікації властивостей навколишнього середовища, наведеної у літературі [71], мультиагентне середовище імітаційної моделі, що розглядається в цій роботі та є зовнішнім щодо кожного окремого автономного агента з множини агентів, вважатимемо таким, що придатне для часткового спостереження, а також стохастичним, динамічним, але з дискретним фіксуванням різноманітних станів спостереження.

2.4.4. Функціональна модель мультиагентної системи ціноутворення

Метою створення функціональної моделі системи ціноутворення є специфікація функцій – індивідуальних функціональних особливостей усіх агентів, здійснюваних у межах процесу ціноутворення. Така модель здатна забезпечити повне уявлення як про функціонування досліджуваного процесу, так і про всі потоки інформації, що мають у ньому місце.

Розглянемо опис елементів структури мультиагентного середовища МАСЦ у складі її агентів імітаційного моделювання на прикладі мікроринку в ЛЕС, яка утворена в межах регіональної системи електропостачання централізованої мережі. Уведемо такі позначення:

MS_{masp} - мультиагентне середовище МАСЦ, $AG_{mas,vns}$ - множина внутрішніх агентів МАСЦ, $AG_{mas,ans}$ - множина агентів навколишнього середовища МАСЦ, $AG_{mas,aprs}$ - множина правил взаємодії агентів середовища, $FW_{mas,fzs}$ - множина факторів зовнішнього середовища МАСЦ.

Тоді в загальному вигляді мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення МАСЦ можна представити у вигляді кортежу як сукупність певних множин імітованих агентів та факторів впливу зовнішнього середовища так:

$$MS_{masp} = \{AG_{mas,avn}, AG_{mas,ans}, AG_{mas,aprs}, FW_{fzs}\}.$$

Перейдемо безпосередньо до опису індивідуальних функціональних особливостей роботи імітованих агентів під час вирішенні задач щодо виробництва та постачання ЕЕ з необхідними показниками надійності постачання та якості ЕЕ в ЛЕС задля подання архітектури мультиагентного середовища.

Вважатимемо, що МАСЦ Мікроринку в ЛЕС об'єднує групи внутрішніх автономних агентів та агентів навколишнього середовища. Отже, до складу множини агентів МАСЦ входять такі типи внутрішніх агентів.

1) *Агенти навантаження* – множина пасивних агентів – споживачів ЕЕ (ПАНВ); множина активних агентів – споживачів-виробників ЕЕ різного класу (ААНВ); множина агентів споживання ЕЕ сусідніх мікроринків (АНВСМ); множина агентів споживання оптового ринку ЕЕ (АНВОР).

2) *Агент виробників* – множина різнорідних агентів за ознакою використання джерел виробництва ЕЕ – пасивних агентів-виробників (ПАВ); множина активних агентів виробників-споживачів з установками децентралізованої (розосередженої, розподіленої) генерації (ААСВ); множина активних агентів із накопичувачами електроенергії (ААН).

3) *Агент адміністративних послуг* – множина, що складається з агента адміністратора системи комунікації (ААСК); агента адміністратора управління торговими взаємовідносинами агентів постачання ЕЕ (ААУТВ); агента адміністратора оператора режиму перетікань потужності (ААОР); агента адміністратора розподільчої мережі (ААРМ); агента адміністратора втрат потужності (ААВП); агента адміністратора управління попитом (ААУП).

Більшість із перелічених агентів за належного рівня цифровізації процесів технологічного керування та організаційного управління можуть бути винятково програмними агентами.

До числа агентів навколишнього середовища відноситимемо агентів двох рівнів. Перший рівень утворюють зовнішні постачальники ЕЕ від ПУП ОРЕ:

- різnorідні агенти-виробники з ОРЕ (АПОР);
- агенти-трейдери (АПТР);
- агенти постачання ЕЕ сусідніх мікроринків (АПСМ).

Другий рівень утворюють агенти допоміжних послуг:

- агент диспетчерського керування ОСР централізованої електромережі (АПДК);
- агент послуг системи комерційного обліку централізованої електромережі (АПКО);
- агент сервісного обслуговування та ремонту електротехнічного обладнання (АПЕО);
- агент із сервісного обслуговування та ремонту обчислювальних засобів (АПОЗ);
- агент із розроблення та супроводу програмного забезпечення інформаційно-комунікаційних систем (АПКС);
- агент із розроблення інформаційно-вимірювальних систем контролю якості ЕЕ та їх метрологічного забезпечення (АПВС);
- агенти із розроблення та сервісного обслуговування системи кібербезпеки (АПКБ).

Отже, множину $AG_{mas,avn}$ утворюють множини агентів «навантаження», «виробники», «адміністративні послуги», до складу яких входять підмножини вищенаведених типів агентів із відповідним функціональним призначенням. Множину агентів навколишнього середовища $AG_{mas,ans}$ утворюють агенти з підмножин «зовнішні постачальники» та «допоміжні послуги», а множина правил взаємодії агентів середовища $AG_{mas,apr}$ формується на основі Правил роздрібного

ринку [72]. Множину факторів впливу зовнішнього середовища FW_{fs} складають, відповідно до наукової публікації [60], такі групи, як «зовнішні політичні», «зовнішні сезонні», «зовнішні екологічні», «внутрішні ринкові», «внутрішні економічні», «внутрішні технологічні».

2.4.5. Структура мультиагентного подання системи ціноутворення

Структуру мультиагентного подання суб'єктів процесу ціноутворення в мікроринку ЛЕС для побудови імітаційної моделі розробляємо на основі використання запропонованої в роботі [61] декомпозиції процесу ціноутворення. Оскільки цінова трансформація є досить тривалим і фактично динамічним процесом перетворення ресурсів автономних агентів в ЕЕ із застосуванням допоміжних послуг, що розповсюджується в навколишньому середовищі агентів мікроринку, то кожен із цих агентів під час виконання своїх функціональних обов'язків у ЛЕС за винагороду змінює (трансформує) на мікроринку вихідну ціну товару на певну величину залежно від обсягу потужності потоку електроенергії, яка пройшла через агента, або на вартість (ціну, тариф) наданої послуги. Дотримуючись запропонованого в науковому дослідженні [61] способу декомпозиції процесу ціноутворення, представимо його поділенням та згрупуванням у вигляді множини підсистем (що утворюються з двох і більше елементарних вузлів), множини елементарних вузлів (що утворюються з двох і більше вузлових точок), множини вузлових точок (тільки з одної складової зміни вхідної ціни).

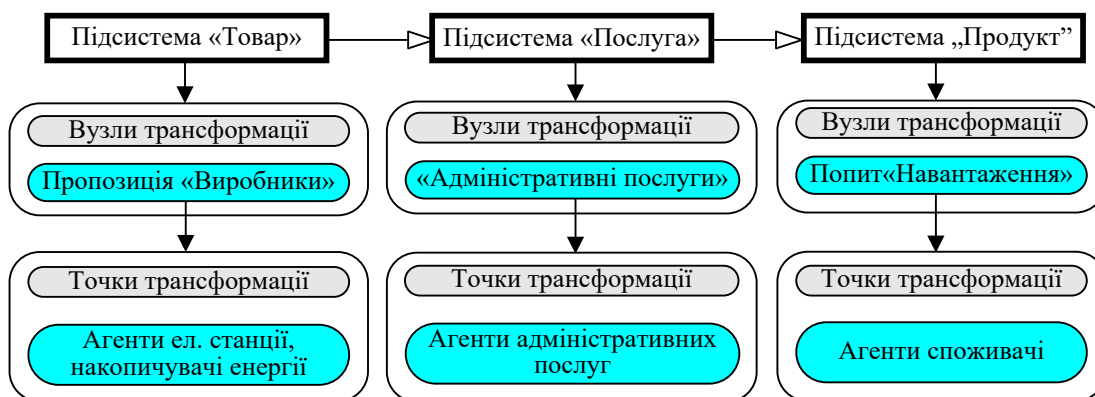


Рисунок 2.5. Структура мультиагентного подання суб'єктів системи ціноутворення

2.4.6. Комунікаційне середовище агентів мультиагентної системи ціноутворення

Відомо, що кожен агент МАСЦ мікроринку в ЛЕС має свої переваги, інтереси, цілі та стратегії для їх досягнення. Наприклад, для суб'єктів-виробників ЕЕ такою метою є досягнення максимально можливих фінансових результатів та скорочення термінів окупності вкладених інвестицій. Для суб'єктів-побутових споживачів енергії пріоритетним критерієм є ціна та стабільне постачання електроенергії належної якості, а для активних споживачів максимально можлива реалізація на мікроринку надлишку власної генерації та зниження витрат на споживання електроенергії тощо. Природно, що розроблення МАСЦ має передусім спрямовуватися на створення такого середовища комунікації агентів, яке надасть рівні можливості суб'єктам мікроринку для розв'язання завдань щодо забезпечення реалізації пріоритетних цілей. Запропонований вище перелік агентів свідчить про те, що таке середовище в період реалізації принципів «енергетичного переходу» Microgrid має стати фактично агентноорієнтованою КСМ процесу ціноутворення на основі застосування засобів математичного, інформаційно-технологічного забезпечення, засобів обчислювальної та цифрової вимірювальної техніки, тощо. На основі

застосування наведених у науковій роботі [60] результатів та з урахуванням досвіду проєктування архітектури мультиагентних середовищ [45] у цій роботі запропоновано таку архітектуру комунікаційного середовища агентів, що подана на рис. 2.6.

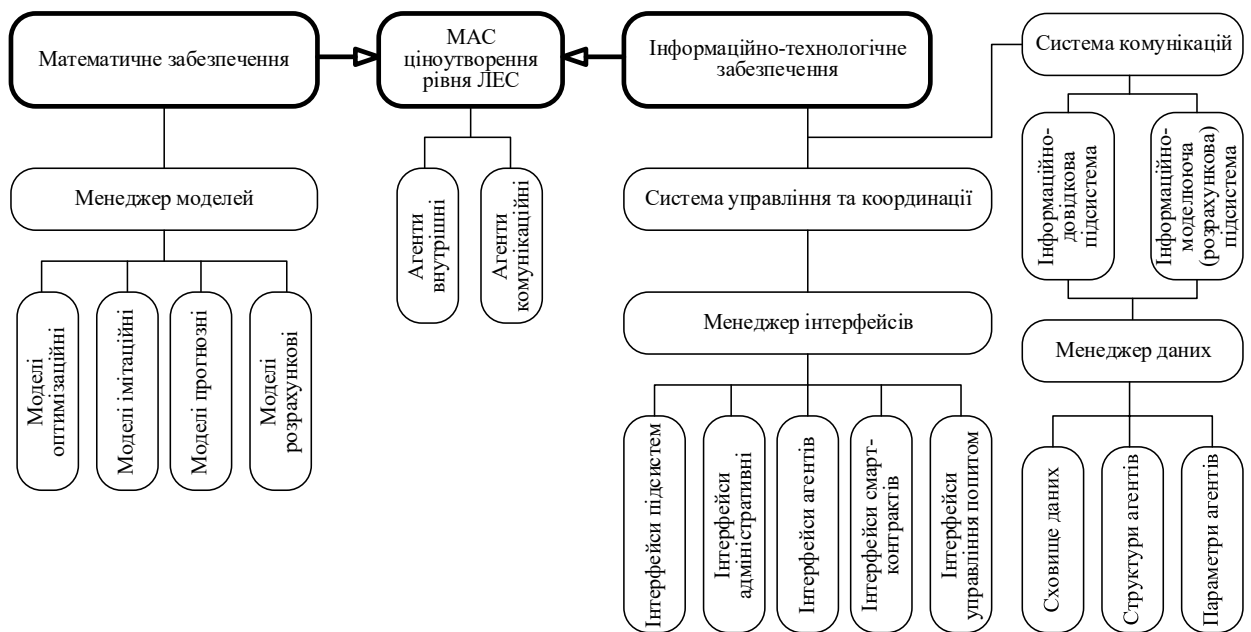


Рисунок 2.6. Архітектура комунікаційного середовища МАСЦ мікроринку

Агентно-орієнтована архітектура комунікаційного середовища взаємодії агентів процесу ціноутворення базується на наведеному вище мультиагентному поданні процесу ціноутворення та на теоретичних і практичних результатах, представлених у монографії [60], яка присвячена розробленню засобів математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування системи ціноутворення, інформаційно-технологічного забезпечення для застосування в програмно-апаратній комп'ютерній системі моделювання із розвиненими засобами змістовного оброблення даних і користувацького інтерфейсу задля організації всебічного дослідження самого процесу ціноутворення й підвищення продуктивності розв'язання завдань щодо удосконалення наявних та розроблення нових механізмів управління цим процесом.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Складено математичний опис процесу ціноутворення у СОТС як сукупності формалізованих дій з урахуванням реальних особливостей організаційної, технологічної та інформаційної взаємодії суб'єктів ринку. Його відмінною особливістю є спосіб декомпозиції подання процесу ціноутворення у вигляді взаємопов'язаних підсистем фізичного та економічного поточкорозподілу, які утворюються з різних за кількісним складом множин елементарних вузлів і вузлових точок трансформації енергії та одночасно стають локальними вузлами ціноутворення

2. Розроблено мультиагентне подання процесу ціноутворення, зокрема функціональний опис агентів МАСЦ ОРЕ, архітектуру агента в інтегрований МАС ОРЕ, на основі застосування яких побудовано мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення – МАСЦ у вигляді кортежу сукупності певних множин імітованих агентів та факторів впливу зовнішнього середовища

3. Розроблено агентно-орієнтовану архітектуру комунікаційного середовища взаємодії агентів у процесі ціноутворення у вигляді сукупності множин автономних агентів, агентів навколишнього середовища, агентів зовнішнього середовища в єдиному просторі КСМ у складі системи управління й координації, системи комунікації й математичного та інформаційно-технологічного забезпечення як гетерогенної, розподіленої системи взаємопов'язаної організаційної, інформаційної, технологічної та економічної взаємодії агентів у єдиному процесі ціноутворення в СОТС ринку ЕЕ.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У цьому розділі основну увагу приділено розробленню методів, призначених для вирішення як наукових, так і прикладних практичних завдань щодо аналізу динаміки зміни цін на ринку ЕЕ. Запропоновано метод аналізу вузлової трансформації процесу ціноутворення та метод оцінки результатів сполучення ринків ЕЕ «на добу наперед» України з європейськими країнами. Наведено приклади їх застосування для вирішення завдань стосовно аналізу й дослідження особливостей процесу формування цін на ринку ЕЕ в умовах зміни в структурі виробництва і споживання ЕЕ у ОЕС та на ринках енергоресурсів.

3.1. Метод аналізу вузлової трансформації процесу ціноутворення

Розроблення методу вузлової трансформації й подальше його застосування для аналізу процесу ціноутворення передбачає певну послідовність виконання основних конструктивних етапів моделювання технологічного процесу ціноутворення. Відмінність цього методу від інших відомих та описаних у науковій літературі методів полягає в безпосередній прив'язці потокорозподілу енергії на всіх стадіях технологічного процесу виробництва, передачі, споживання ЕЕ на ринку до економічного потокорозподілу. Опис процесу ціноутворення детально розглянуто в розділі 2, а в цьому розділі зосереджено увагу на питанні розроблення обчислювальних процедур методу, які реалізуються з використанням дискретно-подійного підходу [61].

У монографії [73] детально розглянута основна ідея розробленого методу, яка полягає в застосуванні локального вузлового ціноутворення для

аналізу динаміки ціни в мережах передачі ЕЕ й узагальненні для аналізу динаміки зміни ціни в усьому ланцюгу фізичного потокорозподілу. У результаті основна особливість обчислювальної процедури в межах цього методу полягає в поданні СОТС ціноутворення у вигляді підсистем, що складаються з різних за кількісним складом множин елементарних вузлів, утворених вузловими точками трансформації енергії – локальними вузлами ціноутворення.

3.1.1. Позначення змінних та параметрів процесу ціноутворення

Процес цінової трансформації є досить тривалим, він охоплює певні стадії трансформації та розповсюджується в просторі агентів трансформації, поділених на рівні їхньої декомпозиції – підсистем, вузлів, вузлових точок.

Для визначення процесу ціноутворення введемо такі позначення:

$$\phi^{p,k}(t) = \phi^{p,k}(v^{p,k}(t), z^{p,k}(t), X^{p,k}),$$

де $\phi^{p,k}(t)$ - функція цінової трансформації на часовому інтервалі t , яка визначає такі змінні процесу ціноутворення - обсягу $v^{p,k}(t)$ і ціни $z^{p,k}(t)$ ЕЕ за її одиницю та $X = \bigcup_{p,k} X^{p,k}, X^{p,k} = \{x_l^{p,k}(t) | l = 1, 2, \dots, L\}$ – множини формалізованих залежностей зміни динаміки зовнішніх факторів (змінних), перелік яких наведено в розділі 2 та вплив яких враховується під час трансформації ціни у вузлі k підсистеми p на цьому часовому інтервалі t ; $p=1,2,3$ – номер підсистеми; $k=1,2,\dots,K^p$ – номер елементарного вузла трансформації ціни в підсистемі p . Природно припустити, що в кожному елементарному вузлі зовнішні чинники, які є екзогенними вхідними змінними величинами, мають свої особливості впливу на динаміку зміни основних внутрішніх змінних величин – обсягу виробленої продукції й ціни за його одиницю.

Початком процесу ціноутворення будемо вважати добу визначення акцептованих цін на аукціонах відповідних сегментів оптового ринку – РДД, РДН, ВДР. При розрахунковому періоді в одну годину всі функціональні залежності як функції часу можуть бути представлені дискретними значеннями відповідного часового інтервалу – номеру доби з початку місяця $i=1,2,\dots,I$ і номеру години доби $j=1,2,\dots,24$:

$$v^{p,k}(t) = \left(v_{i,j}^{p,k} \mid i = \overline{1, I}, j = \overline{1, 24} \right),$$

$$z^{p,k}(t) = \left(z_{i,j}^{p,k} \mid i = \overline{1, I}, j = \overline{1, 24} \right), \phi^{p,k}(t) = \left(\phi_{i,j}^{p,k} \mid \phi_{i,j}^{p,k} = \phi^{p,k} \left(v_{i,j}^{p,k}, z_{i,j}^{p,k}, \{x_l^{p,k} \mid l = \overline{1, L}\} \right), i = \overline{1, I}, j = \overline{1, 24} \right).$$

3.1.2. Обчислювальні процедури методу вузлової трансформації процесу ціноутворення

Етап 1. На першому етапі обчислювального процесу – визначенні початкових вихідних даних – будемо вважати, що врахування впливу зовнішніх чинників у елементарних вузлах першої підсистеми "товар" ($p=1$) здійснюється учасниками вказаних сегментів оптового ринку у вигляді заявок на участь в аукціонах купівлі-продажу ЕЕ, системних послуг тощо. Це фактично означає, що на вхід першої підсистеми вузлів надходять початкові умови $\phi_{i,j}^{0,k} = \phi^{0,k} \left(v_{i,j}^{0,k}, z_{i,j}^{0,k} \right)$, які складаються з акцептованих на сегментах ринків РДН, ВДР, у результаті проведеного аукціону, а також значень обсягів енергії та цін за одиницю товару, обсягів та ціни імпортованої енергії на сегменті РДД. Цю множину даних можна вважати вихідними даними планового економічного потокорозподілу на i -у добу місяця.

Етап 2. Далі на другому етапі в елементарних вузлах k відбувається трансформація вихідних даних внаслідок внутрішніх виробничо-технологічних, оперативно-технологічних організаційних процесів, що відбуваються в енергосистемі, стан яких характеризується певним набором

інформативних показників – ендогенних змінних стану ОЕС, а також застосування регуляторних механізмів, передбачених Правилами ринку. Тобто від 0 годин починається процес погодинного обліку автоматизованою системою комерційного обліку електроенергії фактичного поточкорозподілу в мережах системи електропередачі виробленої ЕЕ та її споживання кінцевими споживачами протягом i -ї доби.

У результаті маємо, що

$$\phi^{1,k}(v_{i,j}^{1,k}, z_{i,j}^{1,k}, X^{1,k}) = F^1(v_{i,j}^{0,k}, z_{i,j}^{0,k}, X^{1,k}), k = 1, 2, \dots, K^1,$$

де $F^1(v_{i,j}^{0,k}, z_{i,j}^{0,k}, X^{1,k})$ - композиція впливу певної кількості функцій із множини X (наприклад, зростання попиту, зміна погодних умов, використання резервів потужності тощо) та алгоритмів Правил ринку, які можуть змінити вхідні величини за рахунок зміни обсягових показників і цінових змінних. Отже, відбувається зміна ціни на величину витрат інфраструктури, що забезпечує функціонування сегментів ринку – елементарних вузлів.

Тобто зміна ціни визначається за формулою:

$$z_{i,j}^{1,k} = z_{i,j}^{0,k} + Z_{i,j}^{INF,1,k},$$

де $Z_{i,j}^{INF,1,k}$ - питомі витрати вузла k першої підсистеми на елемент інфраструктури INF . Очевидно, що економічний поточкорозподіл ЕЕ, що здійснюється на основі результатів торгів на відповідних торгових майданчиках, передбачає її виробництво в необхідних обсягах за визначеними цінами. При цьому природно здійснюються необхідні витрати в кожному елементарному вузлі першої підсистеми залежно від обсягу енергії, що виробляється. Це призводить до зміни як обсягів, так і ціни за одиницю продукції у вузлах.

Позначимо через $\Delta^{p,k}(t) = \Delta^{p,k}(\phi^{p,k}(t))$ функцію, що виражає закономірність зміни обсягу енергії та ціни в елементарному вузлі. Тоді для

вузлів першої підсистеми отримаємо функції зміни обсягів виробленої енергії та цін на неї в такому вигляді:

$$\Delta^{1,k}(t) = \phi^{1,k}(t) - \phi^{0,k}(t).$$

Отже, на вхід наступної, другої підсистеми елементарних вузлів, що забезпечує диспетчерське управління потокорозподілом та транспортуванням енергії від шин електростанцій до розподільчих мереж, подається сукупний обсяг енергії, утворений на виході першої підсистеми $\phi^{1,1}(v_{i,j}^{1,1}, z_{i,j}^{1,1}), \dots, \phi^{1,K^1}(v_{i,j}^{1,K^1}, z_{i,j}^{1,K^1})$. У результаті на виході цієї підсистеми маємо, аналогічно до першого перетворення, результат комплексного впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на технологічний процес транспортування енергії високовольтними лініями електропередачі, диспетчерське управління, в умовах жорстких обмежень у точках перетікання потужності та необхідність виконання критерію забезпечення мінімуму витрат на передачі енергії, що матиме такий вигляд:

$$\phi^{2,k}(v_{i,j}^{2,k}, z_{i,j}^{2,k}, X^{2,k}) = F^2(v_{i,j}^{1,k}, z_{i,j}^{1,k}, X^{2,k}), k = 1, 2, \dots, K^2.$$

Відповідно, друге збільшення ціни в елементарних вузлах другої підсистеми визначається шляхом застосування формули:

$$\Delta^{2,k}(t) = \phi^{2,k}(t) - \phi^{1,k}(t).$$

При цьому дуже важливою вимогою залишається дотримання балансу обсягів у момент переходу з однієї підсистеми в іншу, незважаючи на трансформацію ціни та на те, що погодинні обсяги енергії прив'язані до погодинних цін. Крім того, обсяги енергії, закуплені постачальниками на оптовому ринку і призначені для передавання підсистемою вузлів "послуга", фактично набувають адресного характеру, оскільки відправниками товару на адресу одного постачальника чи експортера можуть виявитися всі елементарні вузли першої підсистеми "товар" – сегменти оптового ринку. Аналогічно можуть бути отримані формули для $\phi^{3,k}(v_{i,j}^{3,k}, z_{i,j}^{3,k}, X^{3,k})$ і $\Delta^{3,k}(t)$ під час переходу від другої підсистеми до третьої.

Етап 3. Далі позначимо через $\tilde{V}_i^1 = \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^1} v_{i,j}^{1,k}$ - сумарний обсяг енергії,

що пройшов через першу підсистему вузлів за добу, а через $\tilde{Z}_{i,j}^1 = \frac{1}{K^1} \sum_{k=1}^{K^1} z_{i,j}^{1,k}$

- середню ціну, що склалася у вузлах кожну годину j доби в першій підсистемі.

Тоді індексом ціни першої підсистеми будемо називати середньодобову ціну $\tilde{Z}_i^1 = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^1} z_{i,j}^{1,k}$ або середньозважену добову ціну

$$\tilde{Z}_i^1 = \frac{1}{\tilde{V}_i^1} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^1} z_{i,j}^{1,k} \times v_{i,j}^{1,k}, \text{ яка формується в першій підсистемі.}$$

Враховуючи те, що ОСП компенсує втрати енергії у високовольтних лініях передач, вважатимемо, що обсяг енергії після її трансформації у другій підсистемі залишається незмінним. Можливі відхилення обсягів енергії від акцептованих через зміни погодних ситуацій чи виникнення аварійних ситуацій не розглядаються. Тоді матимемо, що:

$$\tilde{V}_i^2 = \tilde{V}_i^1.$$

Відмінна особливість трансформації ціни в другій підсистемі вузлів полягає в тому, що вона залежить лише від обсягу переданої енергії. А множину елементарних вузлів утворюють центри системних послуг, які забезпечують її передачу. Тому зміни цін відбуваються у зв'язку з необхідністю обліку витрат, понесених у кожному елементарному вузлі. Технічних складнощів розрахунок вузлового розподілу витрат не становить.

Приймемо далі, що:

- витрати на послугу з диспетчерського керування, з урахуванням витрат інфраструктури розраховуються за тарифом T^{DU} за формулою:

$$Z_{i,j}^{DU,2,1}(v_{i,j}^{1,k}) = T^{DU} \times v_{i,j}^{1,k};$$

- витрати на послуги з передачі ЕЕ, з урахуванням витрат інфраструктури на виконання спеціальних обов'язків для реалізації права соціального забезпечення (ПСЗ) та інших загальносупільних інтересів, на покриття витрат із купівлі ЕЕ для компенсації втрат розраховуються за тарифом T^{PE} за формулою:

$$Z_{i,j}^{PE,2,1}(v_{i,j}^{1,k}) = T^{PE} \times v_{i,j}^{1,k};$$

- покриття витрат на надання допоміжних системних послуг розраховуються за тарифом T^{DP} за формулою:

$$Z_{i,j}^{DP,2,1}(v_{i,j}^{1,k}) = T^{DP} \times v_{i,j}^{1,k}.$$

Витрати на допоміжні системні послуги вимагають більшої деталізації через зростання частки ВДЕ у загальному обсязі виробництва ЕЕ. Ця обставина буде врахована за наявності необхідних для розрахунку погодинних вихідних даних.

Тоді для визначення величини збільшення ціни в вузлах другої підсистеми отримаємо:

$$z_{i,j}^{2,k} = z_{i,j}^{1,k} + T^{DU} \times v_{i,j}^{1,k} + T^{PE} \times v_{i,j}^{1,k} + T^{DP} \times v_{i,j}^{1,k}.$$

На основі цих даних визначимо індекс ціни другої підсистеми як середньодобову ціну $\tilde{Z}_i^2 = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^2} z_{i,j}^{2,k}$ або як середньозважену добову ціну:

$$\tilde{Z}_i^2 = \frac{1}{\tilde{V}_i^2} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^2} z_{i,j}^{2,k} \times v_{i,j}^{2,k}.$$

Етап 4. Подальший потокорозподіл енергії здійснюється в третій підсистемі "продукт", елементарні вузли якої забезпечують функціонування роздрібного ринку. Будемо також вважати, що в цих вузлах обсяг закупленої ЕЕ компаніями ПУП на оптовому ринку не змінюється. Проте через необхідність урахування також впливу зовнішніх і внутрішніх факторів у кожному вузлі можуть змінюватися ціни. Крім того, на формування ціни може впливати певна кількість регіональних особливостей, пов'язаних із

віддаленістю від генеруючих потужностей та їхнім типом, обсягом попиту та пропозиції, енергоємністю, структурою та динамікою споживання в різні сезонні періоди року, а також розвиток ВДЕ, які підключені до регіональних розподільних мереж. Тому, як і раніше, загальне вираження трансформації цін у третій підсистемі матиме вигляд:

$$\phi^{3,k}(\nu_{i,j}^{3,k}, z_{i,j}^{3,k}, X^{3,k}) = F^3(\nu_{i,j}^{2,k}, z_{i,j}^{2,k}, X^{3,k}), k = 1, 2, \dots, K^3.$$

Але в підсистемі "продукт" зміна ціни на ЕЕ проходить дві стадії. Перша пов'язана з її передачею розподільними електромережами компаніями ОСР, а друга з компаніями ПУП та іншими постачальниками, які здійснюють збут ЕЕ кінцевим споживачам – населенню та іншим суб'єктам господарювання. Крім того, у цій підсистемі може відбуватися в деякій частині вузлів зміна вхідних показників обсягів споживання за рахунок купівлі/продажу енергії на сегменті БР або у ПОН, а також і вхідних цін. Тому формальний опис процесу ціноутворення в цій підсистемі відрізняється від опису попередніх підсистем.

Уведемо додаткові позначення:

а) $z_{i,j}^{OSR,3,k}$, $z_{i,j}^{PUP,3,k}$ - ціни за розподіл купованої енергії у ОСР і ПУП;

б) $\nu_{i,j}^{BR,3,k}$, $\nu_{i,j}^{PON,3,k}$, $\nu_{i,j}^{VDE,3,k}$ - додаткові обсяги купованої енергії відповідно

у ПУП на БР, у ПОН та у ВДЕ;

в) $z_{i,j}^{BR,3,k}$, $z_{i,j}^{PON,3,k}$, $z_{i,j}^{VDE,3,k}$ - ціни за одиницю додаткового обсягу енергії

відповідно від БР, ПОН і ВДЕ.

Тоді отримаємо, що:

$$\nu_{i,j}^{3,k} = \nu_{i,j}^{2,k} + \nu_{i,j}^{BR,3,k} + \nu_{i,j}^{PON,3,k} + \nu_{i,j}^{VDE,3,k},$$

$$\tilde{\nu}_i^3 = \tilde{\nu}_i^2 + \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^3} (\nu_{i,j}^{BR,3,k} + \nu_{i,j}^{PON,3,k} + \nu_{i,j}^{VDE,3,k}).$$

Ці дані надходять на вхід компаній ОСР третьої підсистеми. На основі цих даних формуються вихідні ціни ПУП для кінцевих споживачів. Відповідно, для вихідних цін будемо мати формулу:

$$z_{i,j}^{3,k} = z_{i,j}^{2,k} + z_{i,j}^{BR,3,k} + z_{i,j}^{PON,3,k} + z_{i,j}^{VDE,3,k} + z_{i,j}^{OSR,3,k} + z_{i,j}^{PUP,3,k}.$$

Тоді індекс ціни третьої підсистеми визначається як середньодобова

$$\tilde{Z}_i^3 = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^3} z_{i,j}^{3,k} \text{ або як середньозважена добова } \tilde{Z}_i^3 = \frac{1}{\tilde{V}_i^3} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^3} z_{i,j}^{3,k} \times v_{i,j}^{3,k}.$$

3.1.3. Схема візуалізації вузлової трансформації у процесі ціноутворення

На рис 3.1 зображено укрупнену схему процесу трансформації ціни в системі ціноутворення на ринку ЕЕ.

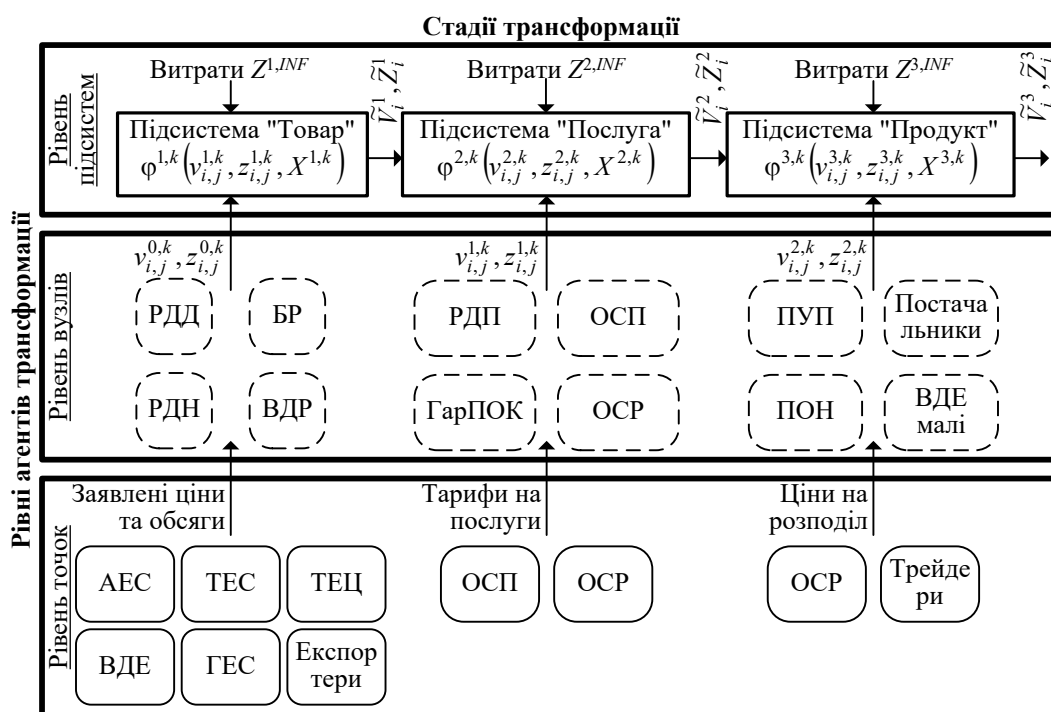


Рисунок 3.1. Схема вузлової трансформації у процесі ціноутворення

Очевидно, що наведена формалізація процесу ціноутворення шляхом його декомпозиції та подання у вигляді трьох взаємопов'язаних підсистем економічного поточкорозподілу, прив'язаних до фактичного адресного розподілу виробленої ЕЕ в мережах електропередачі не є єдиною можливою. Необхідно також зазначити, що для обліку всіх особливостей процесу ціноутворення з урахуванням впливу на нього наведених вище

зовнішніх факторів знадобиться більша деталізація (декомпозиція) виділених стадій трансформації ціни.

Але навіть таке її уявлення не дає можливості для аналітичного розв'язання задачі без знання нелінійних залежностей F^1 , F^2 , F^3 , вихідними даними для яких можуть бути не тільки кількісні, але й слабо формалізовані якісні дані. Тому основним результатом застосування методу вузлової трансформації є побудова імітаційної (алгоритмічної) моделі процесу ціноутворення (спрощена схема подана на рис. 3.1) на основі максимального наближення економічного потокорозподілу до фізичного розподілу ЕЕ у ланцюзі «виробник–транспортувальник–споживач» та використання її для створення мультиагентного середовища комп'ютерної інформаційно-моделювальної системи, агентами-користувачами якої можуть бути людино-машинні комплекси елементарних вузлів, вузлових точок.

3.2. Задача аналізу динаміки попиту електроенергії на сегментах оптового ринку

3.2.1 Алгоритмічна модель аналізу динаміки попиту на електроенергію на ціноутворюючих сегментах оптового ринку

Функція моделювання комп'ютерної інформаційно-моделюючої системи обумовлює необхідність аналітичної обробки вхідних оперативних і ретроспективних даних функціонування суб'єктів і сегментів ринку (агентів мультиагентного середовища) з наступною підготовкою інформації для процесів оцінки і прогнозування показників діяльності на сегментах оптового ринку. Однією із важливих комп'ютерних моделей оцінки процесів ціноутворення на ринку ЕЕ є модель аналізу динаміки попиту на ЕЕ на ціноутворюючих сегментах оптового ринку [61].

Алгоритмічна модель. Розглянемо процес утворення моделі з використанням методу вузлової трансформації, який починається з

визначення вхідних і вихідних змінних величин і параметрів моделі та формалізації критеріїв оцінювання попиту. Відповідно до Правил ринку, визначено такі часові інтервали в організації процесу купівлі-продажу ЕЕ: доба постачання – доба, у межах якої відбувається фізичне постачання обсягів ЕЕ, визначених за результатами торгів; розрахунковий період – мінімальний відрізок часу доби постачання (година), щодо якого визначено результати торгів (ціна та обсяги) на сегменті ринку.

Вихідними даними під час аналізу динаміки розподілу купівлі-продажу ЕЕ для оцінювання попиту на оптовому ринку в розрізі часток сегментів ринку є погодинні вхідні величини, для яких уведемо такі позначення:

- 1) $q^{\text{РДД},k}(i,j)$ - обсяги продажу електроенергії в ОЕС України та Енергетичному острові «Бурштинська ТЕС» (БуТЕС) РДД;
- 2) $q^{\text{РДН},k}(i,j)$ - акцептовані обсяги купівлі-продажу в ОЕС та БуТЕС на РДН;
- 3) $q^{\text{ВДР},k}(i,j)$ - акцептовані обсяги купівлі-продажу в ОЕС та БуТЕС на ВДР;
- 4) $q^{\text{БР},k}(i,j)$ - обсяги балансууючої енергії «вгору» та «вниз» в ОЕС та БуТЕС на БР;
- 5) $p^{\text{РДН},k}(i,j)$ - маржинальна ціна в ОЕС та БуТЕС на РДН.

Уведені позначення змінних обсягів і ціни уніфіковано представлено так:

- а) $q^{s,k}(i,j)$ – обсяг продажу на сегменті $s \in \{\text{РДД}, \text{РДН}, \text{ВДР}, \text{БР}\}$ у системі $k \in \{\text{ОЕС}, \text{БуТЕС}\}$, що склався на аукціоні в розрахункову годину $j \in (1,24)$ доби постачання $i \in (01.01, \dots, 31.12)$;
- б) $p^{s,k}(i,j)$ – ціна продажу на сегменті s у системі k , що склалася в годину j доби i .

Вважатимемо, що розглядається тільки маржинальна ціна на РДН у системі ОЕС, як визначальна (індикативна), за якою обчислюються всі цінові показники про витрати на допоміжні послуги у процесі виробництва, постачання й розподілу електроенергії в ОЕС.

Показниками оцінювання попиту на оптовому ринку будемо вважати обрані вихідні величини, які позначимо так:

1) $\{v^s(n, j) | j = \overline{1, 24}, s \in (\text{РДД, РДН, ВДР, БР})\}$ - погодинні профілі середніх обсягів продажу електроенергії на сегментах ринку s за період постачання (сезонною ознакою) $n \in (\text{рік, кліматичний період, місяць})$;

2) $\{w^s(n, j) | j = \overline{1, 24}, s \in (\text{РДД, РДН, ВДР, БР})\}$ - погодинні профілі відсотків (часток) середніх обсягів продажу електроенергії на сегментах ринку s за період постачання n ;

3) $\{v^s(n) | n \in (\text{рік, кліматичний період, місяць}), s \in (\text{РДД, РДН, ВДР, БР})\}$ - інтервальні (сезонні) профілі середніх (середньогодинних, середньодобових) обсягів продажу електроенергії на сегментах ринку s ;

4) $\{w^s(n) | n \in (\text{рік, кліматичний період, місяць}), s \in (\text{РДД, РДН, ВДР, БР})\}$ - інтервальні (сезонні) профілі відсотків (часток) середніх обсягів продажу електроенергії на сегментах ринку s ;

5) $\{z^{\text{РДН}}(n, j) | j = \overline{1, 24}\}$ - погодинні профілі середньої (середньозваженої) ціни продажу електроенергії на РДН за сезонною ознакою n ;

6) $\{z^{\text{РДН}}(n) | n \in (\text{рік, кліматичний період, місяць})\}$ - інтервальні (сезонні) профілі середньої (середньозваженої) ціни продажу електроенергії на РДН.

Алгоритмічна модель. Для оцінювання попиту розрахунок профілів визначається за такими алгоритмами:

$$v^s(n, j) = \frac{1}{K(n)} \sum_{i \in S(n)} (q^{s, \text{OEC}}(i, j) + q^{s, \text{ByTEC}}(i, j)); \quad w^s(n, j) = \frac{v^s(n, j)}{\sum_s v^s(n, j)};$$

$$v^s(n) = \sum_{j=1}^{24} v^s(n, j); \quad w^s(n) = \frac{v^s(n)}{\sum_s v^s(n)};$$

$$z^{\text{РДН}}(n, j) = \frac{\sum_{i \in S(n)} p^{\text{РДН, ОЕС}}(i, j) \times q^{\text{РДН, ОЕС}}(i, j)}{\sum_{i \in S(n)} q^{\text{РДН, ОЕС}}(i, j)}; \quad z^{\text{РДН}}(n) = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} z^{\text{РДН}}(n, j), \text{ де}$$

$S(n)$ – множина одиниць часу, що належать до інтервалу сезонності $n \in (\text{рік, зима, весна, літо, осінь, місяць})$, $K(n) = |S(n)|$ – кількість одиниць часу інтервалу сезонності.

У результаті використання алгоритмічної моделі виникає можливість для визначення таких залежностей: ціни купівлі-продажу (погодинної, інтервальної) від структури продажу ЕЕ; загального обсягу (погодинного, інтервального) від структури продажу ЕЕ.

Інтегрованим критерієм для оцінювання динаміки попиту в наведеній моделі визначено загальну, середньодобову ціну ЕЕ з урахуванням ціни на РДН, яка визначається за формулами:

$$Z(n) = \sum_s \sum_{j=1}^{24} \sum_{i \in S(n)} p^{\text{РДН, ОЕС}}(i, j) \times (q^{s, \text{OEC}}(i, j) + q^{s, \text{ByTEC}}(i, j)),$$

$$\tilde{Z}(n) = \frac{1}{K(n)} Z(n).$$

3.2.2. Аналіз результатів розрахунково- експериментального дослідження моделі

Для аналізу динаміки змін обсягів попиту на електроенергію на відповідних сегментах ринку та ціни на РДН використано модельні профілі

й побудовано їхні графічні діаграми змін за період з 2020 по 2021 роки, зокрема: погодинні середні обсяги й ціна продажу (рис. 3.2); посезонні середньогодинні обсяги й ціна продажу (рис. 3.3); річний середньогодинний обсяг і ціна продажу ЕЕ на сегментах ринку. Інформацію для аналізу було отримано за допомогою програми Excel, електронних таблиць та інформаційного ресурсу КСМ Equant, сформованого на основі ретроспективних даних із відкритих джерел інформації ОР [42], ОСП та Української енергетичної біржі.



Рисунок 3.2. Динаміка посезонного профілю середньогодинних обсягів продажу ЕЕ

На рис. 3.2 відображена графічна інформація про динаміку погодинного профілю середніх обсягів і ціни продажу, яка підтверджує суттєву нестаціонарність у часі процесу ціноутворення та дає змогу зробити відповідні висновки про наявність якісної залежності середньої ціни РДН від зміни структури обсягів акцептованої ЕЕ на відповідних сегментах ринку.

Аналогічну залежність можна спостерігати на рис. 3.3, зокрема в посезонному профілі середньогодинних обсягів продажу ЕЕ за 2020-2021 роки.



Рисунок 3.3. Динаміка посезонного профілю середньодобових обсягів продажу ЕЕ

Як відомо, в ОЕС України визначено режими роботи енергетичного устаткування, при яких ОСП для балансування генерації й попиту на ринку ЕЕ (активного навантаження) здійснює розвантаження (вниз) або завантаження (вгору) енергоблоків, адже енергетична система не може в часі не реагувати на зміну фактичного попиту ЕЕ шляхом корекції її виробництва. Отже, вона перебуває в дефіцитному режимі, коли на ринку існує непокритий попит, або у профіцитному режимі, коли на ринку є надлишок пропозицій. Наведені на рис. 3.2 результати розрахунків профілів щодо зміни обсягів реалізації ЕЕ та ціни її продажу на БР підтверджують, що в умовах профіцитного режиму роботи енергосистеми ціна на продаж ЕЕ зменшується і, навпаки, в умовах дефіцитного режиму – ціна збільшується.

У таблиці 3.1 наведено результати розрахунків відсоткових річних, сезонних профілів динаміки попиту на електроенергію, що визначають структуру продажу та приріст ціни й обсягів для якісного оцінювання залежностей цих основних показників від функціонування оптового ринку.

Таблиця 3.1 Результати розрахунків відсоткових річних, сезонних профілів динаміки попиту на електроенергію

Профіль	Період постачання		Відсоток					
	Рік	Інтервал (сезон, година)	Обсяг РДД	Обсяг РДН	Обсяг ВДР	Обсяг БР	Приріст ціни	Приріст обсягу
Річний середньогодинний	2020		78,3%	27,4%	4,5%	-10,2%		
	2021		71,6%	25,2%	3,6%	-0,3%	39,3%	6,4%
Посезонний середньогодинний	2020	Зима	68,3%	30,8%	2,1%	-1,2%		
		Весна	79,6%	30,3%	4,7%	-14,7%	-7,1%	-24,5%
		Літо	89,4%	24,7%	6,1%	-20,3%	-2,2%	-10,6%
		Осінь	80,1%	22,7%	5,8%	-8,7%	14,9%	17,3%
	2021	Зима	69,5%	25,9%	2,9%	1,7%	40,6%	25,1%
		Весна	73,3%	23,3%	6,3%	-2,9%	-38,1%	-15,0%
		Літо	74,4%	23,9%	2,5%	-0,8%	26,9%	-8,5%
		Осінь	69,7%	27,4%	2,6%	0,3%	63,6%	7,5%

За річними й сезонними профілями можна встановити певні тенденції в зміні структури продажу ЕЕ на оптовому ринку – постійними компонентами є РДД до 70-75%, РДН до 25-30%, ВДР до 5%, а змінною (непостійною) компонентною є БР.

Прирости ціни та обсягу в цих профілях мають певну залежність у динаміці напряму зміни. Так, напрями зміни обсягу й ціни в поточному розрахунковому періоді постачання в цілому збігаються, але сповільнення спаду ціни поточного періоду (літо 2020 року до -2%) обумовлює зростання обсягу наступного періоду (осінь 2020 року до 17%), а пришвидшення зростання ціни поточного періоду (зима 2021 року до 40%) обумовлює спадання обсягу наступного періоду (весна 2021 року до -15%).

Наведені в таблиці результати ґрунтуються на погодинних значеннях досліджуваних величин. Їх короткий аналіз засвідчив, що за погодинним профілем середніх обсягів у 2020 році для годин 1-16 частка БР складає 10-20%, що є орієнтовно половиною від частки РДН у 25-30%. Це може вказувати на «неефективну» участь частини учасників аукціону РДН, внаслідок недостатньо якісного прогнозування тенденцій на ринку або

наявність «коаліційної гри» деяких учасників ринку. Що було враховано у 2021 році, коли частка БР у погодинному розрізі вже склала 1-4%.

3.3. Метод оцінки результатів сполучення ринків електричної енергії «на добу наперед» України з європейськими країнами

На сьогодні розвиток ОЕС України відбувається в технологічних умовах паралельної роботи з об'єднанням енергосистем країн континентальної Європи (ENTSO-E). Процеси подальшої інтеграції ринку ЕЕ до загальноєвропейського ринку тісно пов'язані із запровадженням механізмів сполучення ринків ЕЕ, зокрема і на рівні сегментів оптових ринків, наприклад РДН. Під сполученням ринків розглядають поєднання ринків ЕЕ, які мають свої особливості й відмінності у функціонуванні в межах єдиної системи взаємообміну ЕЕ між ринками.

Відповідно, завдання щодо розроблення методів оцінювання результатів сполучення РДН України з європейськими міждержавними біржами ЕЕ є актуальним.

На ринках ЕЕ європейських країн питання про врахування мережевих обмежень у сегменті РДН вирішують із урахуванням особливостей як структури виробництва і споживання ЕЕ, так і структури електричних мереж. Ці чинники зумовили реалізацію різних підходів до організації та проведення торгів на ринках ЕЕ європейських країн. Навіть в умовах об'єднання національних ринків ЕЕ в міжнаціональні ринкові об'єднання відмінності в підходах до організації та проведення торгів не усунуто повністю. Тому не втрачає актуальності проблема створення єдиного методу або набору методів ціноутворення, що мають на меті об'єднання наявних ринків з урахуванням технологічних обмежень на обмін ЕЕ між ними, основоположні принципи реалізації яких визначені в Регламентах Європейської Комісії [74, 75]. Так, на сьогодні європейські оператори ринку

об'єднані в єдину систему, основу діяльності якої формує спеціальний алгоритм розрахунку рівноважних обсягів та цін – EURNEMIA [76]. При цьому європейським законодавством допускається утворення різних зон чи об'єднань зон для процесу сполучення ринків ЄЕ.

Для України важливим завданням є попередній аналіз наслідків сполучення національного ринку ЄЕ із сусідніми європейськими країнами стосовно визначення можливих обсягів імпорту та експорту ЄЕ, взаємного впливу сполучуваних сегментів ринків на ціни в них, попередній аналіз правил такого об'єднання задля оцінювання його доцільності з погляду вигідності під час прийняття відповідних управлінських рішень.

Цей підрозділ присвячено опису методу аналізу результатів сполучення ринків ЄЕ в сегменті ринку РДН на основі побудови та застосування алгоритмів пошуку оптимальних рішень [77].

3.3.1. Теоретичні підґрунтя розроблення методу оцінки сполучення ринків

У дослідженні за основу взято метод вирівнювання цін [53], який вдосконалено з урахуванням чинних правил ціноутворення на РДН України. Розглянемо основні складові цього методу.

Теоретичним підґрунтям методу є поняття ринкової рівноваги [79], стан якої імітується наявною ретроспективною інформацією про рівновагу між попитом і пропозицією в сегменті РДН. Використання ретроспективних даних про фактичні рівноважні стани дає змогу використати положення методу Вальраса [80] про самостійне досягнення нового стану ринкової рівноваги під дією зовнішніх нецінових чинників на ринку з досконалою конкуренцією.

Порівняння станів початкової та кінцевої ринкової рівноваги дає можливість отримати кількісну оцінку чинників, які вплинули на ринкову

рівновагу [77]. Під впливом зовнішніх чинників розуміємо передусім появу деякого обсягу обміну ЕЕ між торговими зонами, які до цього перебували в стані ринкової рівноваги. Структуру попиту та пропозиції в торгових зонах пропонуємо подавати функціями чистого експорту (ФЧЕ) [81], які найбільш точно відтворюють відношення між попитом та пропозицією за різних позицій ринкової рівноваги. Тоді імітація процедури сполучення двох ринків ЕЕ з використанням ФЧЕ дає змогу визначити нові стани ринкової рівноваги в результаті появи деякого обсягу імпорту/експорту ЕЕ та отримати чисельні оцінки результатів такого сполучення. Це також означає, що порівняння в дослідженнях початкового та нового (за результатами впливу окремого зовнішнього чинника) станів ринкової рівноваги дає змогу дослідити результати впливу окремого чинника (наприклад, потоку ЕЕ між сполучуваними енергосистемами) та отримати чисельні характеристики такого впливу, нехтуючи іншими особливостями ціноутворення на сполучуваних ринках ЕЕ (наприклад, нехтуючи наявністю блокових цінових заявок).

3.3.2. Формалізація методу оцінки сполучення сегментів ринків «на добу наперед»

Нехай об'єднання РДН складається із Z торгових зон, причому в кожній z -й торговій зоні на торгах для кожної години доби h присутні I заявок [3] подільного типу на купівлю ЕЕ та J заявок подільного типу на продаж ЕЕ:

$$\begin{cases} x_{z,h,i}^{\text{куп}}(C_i^{\text{куп}}, V_i^{\text{куп}}) \forall i \in I \\ x_{z,h,j}^{\text{прод}}(C_j^{\text{прод}}, V_j^{\text{прод}}) \forall j \in J \end{cases} \quad \forall z \in Z \forall h = [1..24],$$

де $x_{z,h}^{\text{куп}}$, $x_{z,h}^{\text{прод}}$ — заявки, відповідно, на купівлю та продаж ЕЕ у торговій зоні z на годину доби h ; $C_x^{\text{куп}}$, $C_x^{\text{прод}}$ — визначена заявкою x ціна відповідно до

купівлі та продажу ЕЕ; $V_x^{\text{куп}}$, $V_x^{\text{прод}}$ – визначений заявкою x обсяг відповідно до купівлі та продажу ЕЕ.

Тоді Парето-оптимальна рівновага [82] об'єднання Z торгових зон на торгах РДН забезпечується таким акцептом [83] поданих на торги заявок, за якого виконуються умови:

$$\sum_{h=1}^{24} \sum_{z=1}^Z \sum_{i,j} (C_i^{\text{куп}} \cdot V_i^{\text{куп}} - C_j^{\text{прод}} \cdot V_j^{\text{прод}}) \rightarrow \max \quad (3.1)$$

$$\sum_{z=1}^Z \sum_i V_i^{\text{куп}} = \sum_{z=1}^Z \sum_j V_j^{\text{прод}} \forall h = [1..24]$$

У системі (3.1) визначено для кожної торгової зони максимізацію цільової функції добробуту [84] із врахуванням обмежень обсягів імпорту/експорту ЕЕ. Пошук оптимального рішення системи (3.1) пропонуємо здійснювати з використанням ФЧЕ.

Нехай на кожну годину h у торговій зоні z множина заявок на купівлю ЕЕ подається агрегованою функцією попиту як формальною залежністю рівноважної ціни від обсягу торгів:

$$f_{z,h}^{\text{поп}}(V) = C_{z,h}^{\text{поп}}(V) \forall z \in Z \forall h = [1..24],$$

а множина заявок на продаж ЕЕ також подається агрегованою функцією пропозиції як формальною залежністю рівноважної ціни від обсягу торгів:

$$f_{z,h}^{\text{проп}}(V) = C_{z,h}^{\text{проп}}(V) \forall z \in Z \forall h = [1..24].$$

Тоді ФЧЕ визначається як:

$$NEC_{z,h}^{\text{проп}}(V) = f_{z,h}^{\text{поп}}(V) - f_{z,h}^{\text{проп}}(V) \forall z \in Z \forall h = [1..24].$$

Для двох торгових зон A та B за відсутності обмежень на обсяги обміну ЕЕ оптимальний розв'язок (3.1) визначається на перетині ФЧЕ сполучуваних торгових зон:

$$NEC_{A,h}(V) = NEC_{B,h}(V) \forall h = [1..24]. \quad (3.2)$$

Оскільки ФЧЕ означені залежностями рівноважних цін від обсягу торгів, то завдання щодо пошуку оптимального розв'язку (3.1) зводиться до

пошуку такого обсягу обміну ЕЕ $V_{A \rightarrow B, h}^{\text{опт}}$, за якого мінімізується різниця ринкових цін у цих зонах [84, 85]:

$$\left| NEC_{A, h}(V_{A \rightarrow B, h}^{\text{опт}}) - NEC_{B, h}(V_{A \rightarrow B, h}^{\text{опт}}) \right| \rightarrow \min \equiv \left| C_{A, h}^{\text{рівн}} - C_{B, h}^{\text{рівн}} \right| \rightarrow \min \forall h = [1..24], \quad (3.3)$$

де $C_{A, h}^{\text{рівн}}$, $C_{B, h}^{\text{рівн}}$ – рівноважні ціни у торгових зонах, відповідно A та B для години h .

Якщо графіки функцій $NEC_{A, h}(V)$ та $-NEC_{B, h}(V)$ (обернена ФЧЕ для торгової зони B) перетинаються, то для отримання оптимального розв'язку (3.1) достатньо використати рівність (3.2). У цьому випадку в обох торгових зонах встановлюються однакові ринкові ціни $C_{A, h}^{\text{рівн}} = C_{B, h}^{\text{рівн}}$ і результати торгів еквівалентні результатам, отримуваним за умови єдиного аукціону в об'єднанні двох торгових зон.

Якщо графіки функцій $NEC_{A, h}(V)$ та $-NEC_{B, h}(V)$ не перетинаються, то завдання щодо пошуку оптимального обсягу обміну ЕЕ між двома сполучуваними торговими зонами розв'язується алгоритмічно з використанням цільової функції (3.3). Алгоритм пошуку оптимального рішення подібний до алгоритмів пошуку ринкової рівноваги для агрегованих функцій попиту і пропозиції на залповому двосторонньому аукціоні [86] або на аукціоні Вальраса [87]. Основна відмінність пошуку оптимального рішення по (3.3) полягає в можливості отримання від'ємного значення обсягів обміну ЕЕ, що означає фактичний комерційний потік ЕЕ із торгової зони B у торгову зону A . У загальному випадку такий алгоритм дає змогу отримати оптимальний розв'язок і для ситуацій, коли графіки ФЧЕ двох сполучуваних торгових зон перетинаються.

Технічні та режимні обмеження на обсяги обміну ЕЕ між двома торговими зонами враховуються перевіркою отриманого по (3.3) оптимального обсягу обміну ЕЕ між двома торговими зонами на відповідність умові:

$$-V_{B \rightarrow A, h}^{\max} \leq V_{A \rightarrow B, h}^{\text{опт}} \leq V_{A \rightarrow B, h}^{\max} \quad \forall h = [1..24], \quad (3.4)$$

де $V_{B \rightarrow A, h}^{\max}$, $V_{A \rightarrow B, h}^{\max}$ – максимально допустимий погодинний обсяг потоку ЕЕ відповідно із торгової зони B у торгову зону A та із торгової зони A у торгову зону B .

Отримані для (3.3) оптимальні значення обсягів обміну ЕЕ між двома торговими зонами приймаються як результат розрахунків, якщо вони задовольняють обмеження (3.4). Якщо умови (3.4) порушуються, то результат розрахунків визначається за визначеної в (3.4) допустимої межі.

Граничні ціни в кожній із двох сполучених торгових зон достатньо просто визначаються з використанням ФЧЕ:

$$\begin{cases} C_{A, h}^{\text{рівн}} = NEC_{A, h}(V_{A \rightarrow B, h}^{\text{опт}}) \\ C_{B, h}^{\text{рівн}} = NEC_{B, h}(-V_{A \rightarrow B, h}^{\text{опт}}) \end{cases} \quad \forall h = [1..24].$$

Інший спосіб визначення результатів сполучення двох торгових зон – це розрахунок результатів двостороннього аукціону в кожній торговій зоні із врахуванням оптимального балансу імпорту/експорту ЕЕ [88]. За такого способу розрахунків додатково визначаються множини акцептованих та відхиленних заявок із купівлі і продажу ЕЕ.

Для здійснення сполучення більше, ніж двох торгових зон, організується ітераційний процес, де на кожній ітерації послідовно аналізується кожний електричний перетин між двома суміжними торговими зонами.

3.3.3. Алгоритмічна організація імітаційної моделі оцінки сполучення ринків

Алгоритм імітаційної моделі проведення порівняльного аналізу двох станів до та після сполучення торгових зон передбачає таке.

1. За базову точку приймається ретроспективна інформація про стан ринкової рівноваги в сполучуваних торгових зонах.

2. Імітується вплив зовнішніх чинників на ринкову рівновагу. Під імітацією впливу розуміється створення нового чи зміна характеристик наявного електричного перетину, зміни у структурі попиту/пропозиції сполучуваних торгових зон або інші дії, що порушують усталену ринкову рівновагу.

3. Запропонований метод сполучення торгових зон використовується для пошуку нового парето-оптимального стану ринкової рівноваги.

4. Здійснюється порівняльний аналіз початкового та нового станів ринкової рівноваги. До основних критеріїв порівняльного оцінювання належать значення функцій добробуту та значення ринкових цін. За потреби порівняльний аналіз двох станів ринкової рівноваги виконується для окремих учасників ринку. Такий аналіз охоплює передусім порівняння обсягів і цін купівлі/продажу ЕЕ.

3.4 Задача оцінки сполучення двох ринків електричної енергії

3.4.1 Вхідні дані імітаційної моделі

Розглянемо розв'язання задачі оцінки сполучення двох ринків ЕЕ на прикладі сполучення сегментів «на добу наперед» ринків України та Молдови.

Ринок ЕЕ Молдови складається з сегментів двосторонніх договорів та балансуючого ринку. На відміну від РДН, сегмент двосторонніх договорів не формує інформацію про структуру попиту і пропозиції, необхідну для побудови ФЧЕ. Крім того, особливості функціонування сегмента двосторонніх договорів не дає змоги отримати адекватні цінові індикатори ринкової ціни ЕЕ стосовно перспектив імпорту/експорту. Саме тому для оцінювання перспектив імпорту/експорту ЕЕ між Україною та Молдовою використано ретроспективну інформацію про імпорт/експорт ЕЕ між Молдовою та Румунією.

З листопада 2022 року Молдова імпортувала з Румунії від 50% до 75% обсягів власного електроспоживання. Отже, ринкові ціни РДН Румунії суттєво впливають на формування ціни на ЕЕ для споживачів у Молдові.

Прийняті припущення. Вважаючи структуру попиту на ЕЕ в Молдові умовно незмінною, а також враховуючи значну частку імпорту ЕЕ в енергосистемі Молдови, яка закуповується централізовано, приймаємо такі припущення: 1) у розрахункову годину доби частина електроспоживання енергосистеми Молдови покривається власними виробничими потужностями, причому обсяг компенсованого власними електростанціями електроспоживання не залежить від цін на суміжних ринках ЕЕ; 2) для імітації процедури сполучення торгових зон Молдови й України на кожну розрахункову годину визначаються фіксовані обсяги імпорту та експорту ЕЕ в енергосистемі Молдови, які позначені заявками на купівлю і продаж ЕЕ, обсягами комерційних потоків ЕЕ між Молдовою та Румунією та погодинними цінами на електричну енергію в сегменті РДН Румунії. Такі припущення дають змогу оцінити вплив некомпенсованого попиту в енергосистемі Молдови на процеси ціноутворення в сегменті РДН України.

Розглянемо результати оцінювального аналізу для двох характерних розрахункових годин доби, а саме: 18-та година 5 грудня 2023 року, коли погодинна ціна РДН України нижча за погодинну ціну РДН Румунії, а також 19-та година 10 грудня 2023 року, коли погодинна ціна РДН України вища за погодинну ціну РДН Румунії. Інформацію про комерційні потоки ЕЕ між Молдовою та Румунією отримано з офіційного сайту ENTSO-E Transparency Platform, інформацію про ринкові ціни на ЕЕ в сегменті РДН Румунії отримано з офіційного сайту румунського Оператора ринку, а інформацію про ціни та агреговані функції попиту і пропозиції на РДН України отримано з офіційного сайту українського ОР [42].

Утворені ФЧЕ торгових зон Молдови й України за обраними статистичними даними на 19-ту годину 10 грудня 2023 року наведені на рис. 3.4.

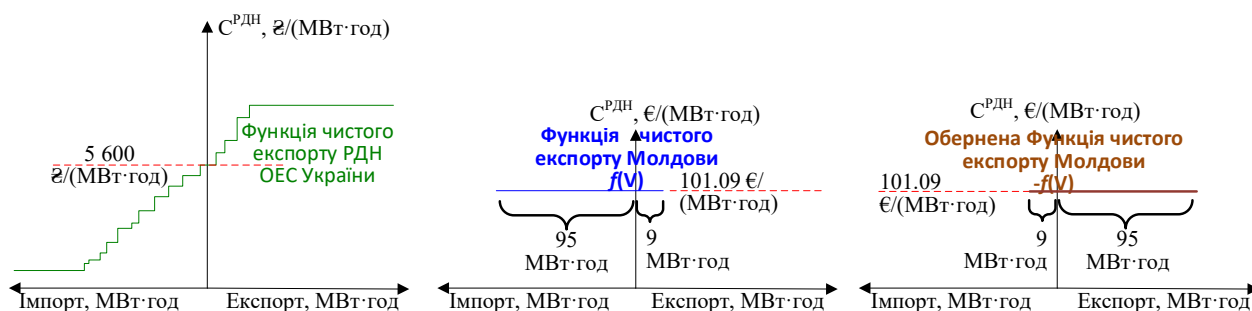


Рисунок 3.4. Приклад утворення функцій чистого експорту:
а) України; б) Молдови; в) обернена Функція чистого експорту Молдови

У дослідженні обернена ФЧЕ формувалася для енергосистеми Молдови з метою порівняльного аналізу впливу ринку Молдови на баланс попиту і пропозиції РДН України. Проте наведена вище математична модель (п. 3.3.2., 3.3.3) не дає змоги визначити вимоги щодо структури попиту і пропозиції торгової зони, для якої необхідно формувати обернену ФЧЕ. У математичній моделі для кожного міжсистемного електричного перетину формально визначаються початкова та кінцева торгові зони, а обернена ФЧЕ в моделі формується для кінцевої торгової зони. Відповідно, за результатами розрахунків, потоки ЕЕ із початкової в кінцеву торгові зони матимуть додатне значення, а потоки ЕЕ із кінцевої в початкову торгові зони – від’ємне значення. При цьому для двох сполучуваних торгових зон вибір ознаки початкової чи кінцевої може здійснюватися довільно.

3.4.2. Аналіз результатів імітаційного моделювання

Для розрахункової години за статистичною інформацією на 19-ту годину 10 грудня 2023 року результати порівняльного аналізу ФЧЕ України і Молдови відображені на рис. 3.5. Обсяг ЕЕ, закуплений на РДН Румунії для покриття попиту в Молдові, має ціну нижчу за ціну, сформовану в цю

годину доби на РДН України. Тому правила сполучення ринків електроенергії стимулюють потік ЕЕ із Молдови в Україну. У результаті, замість покриття власного попиту, Молдова здійснюватиме реекспорт з ЕЕ до України, або навпаки – імпорт з України. Для недопущення неповного покриття власного попиту Національний регуляторний орган Молдови, відповідно до вимог [89], має вживати заходи щодо обмеження обсягів транзиту ЕЕ з Румунії в Україну через енергосистему Молдови.

Для РДН України сполучення з Молдовою еквівалентне появі додаткової заявки з пропозицією ЕЕ в обсязі 104 МВт·год та ціною 4 422,34 €/МВт·год). Згідно із припущеннями про функції й особливості ціноутворення ринку ЕЕ Молдови, така ціна є фіксованою і не може змінюватися. Тому вирівнювання цін для ринків ЕЕ України і Молдови можливе лише за ціною 4 422,34 €/МВт·год). Як показано на рис. 3.5, для вирівнювання ринкових цін в Україні і Молдові в межах розглянутої розрахункової години необхідно забезпечити потік ЕЕ в обсязі 709,7 МВт·год. Проте можливості експорту ЕЕ з Молдови до України в розглянуту розрахункову годину обмежені обсягом 104 МВт·год.

Як видно з рис. 3.5, графіки ФЧЕ України та оберненої ФЧЕ Молдови не перетинаються, що означає неможливість повного злиття двох торгових зон у розглянуту розрахункову годину. Тому експорт ЕЕ з Молдови в Україну спричиняє зниження ринкової ціни на РДН України з 5 600 €/МВт·год) до 5 400 €/МВт·год). Обмежений обсяг потенціалу експорту ЕЕ в енергосистемі Молдови варто вважати наслідком несумісності структур попиту і пропозиції ЕЕ в Україні і Молдові, що не дає змоги досягти повного злиття двох ринків. Крім того, обсяг обміну ЕЕ між двома енергосистемами може обмежуватися пропускнуою спроможністю міждержавних електричних перетинів та потребами забезпечення стійкості енергосистем. Наприклад, технологічне обмеження потоку ЕЕ з Молдови в

Україну до потужності 31 МВт призводитиме до зниження ціни на РДН України з 5 600 $\text{€}/(\text{МВт}\cdot\text{год})$ до 5 500 $\text{€}/(\text{МВт}\cdot\text{год})$.

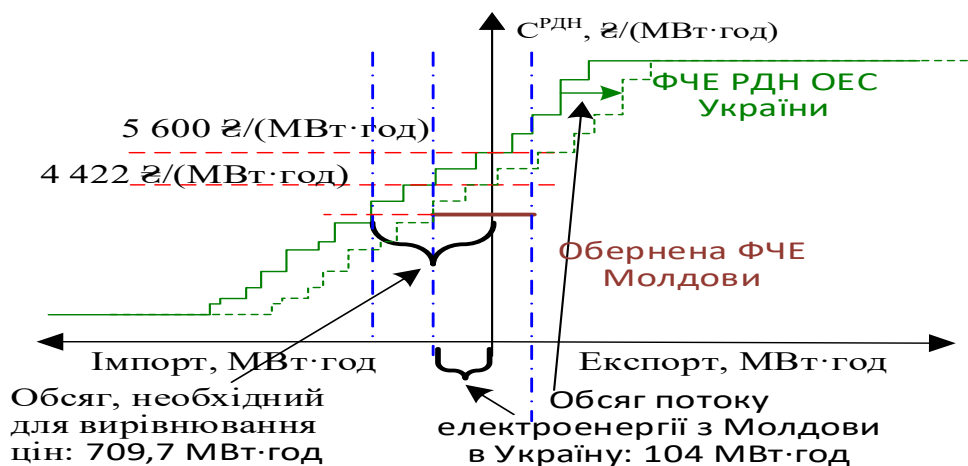


Рисунок 3.5. Результат сполучення ринків із потоком ЕЕ від Молдови в Україну

Для розрахункової години за статистичною інформацією на 18-ту годину 5 грудня 2023 року результати порівняльного аналізу ФЧЕ України і Молдови відображені на рис.3.6. На 18-ту годину 5 грудня 2023 року в ОЕС України утворився дефіцит виробництва ЕЕ і ОСП України відповідно до Директиви [89] здійснював запит про аварійну допомогу із суміжних енергосистем. На РДН України пропозиція ЕЕ не покрила увесь наявний попит і гранична ціна торгів встановилася на рівні максимального регуляторного обмеження. На РДН Румунії на цю розрахункову годину також спостерігалось підвищення попиту на ЕЕ. В умовах більш ліберальної регуляторної політики Румунії сформувалася ринкова ціна, вища за ринкову ціну в Україні.

Припустимо, що в наведеній на рис. 3.6 ситуації відбулося сполучення ринків ЕЕ України та Молдови. Тоді більш висока ціна на ринку ЕЕ Молдови стимулюватиме потік ЕЕ з України у Молдову. Для РДН України вплив оберненої ФЧЕ Молдови еквівалентний появі додаткової заявки на купівлю ЕЕ за ціною, вищою за верхнє цінове обмеження. Така ситуація

характеризується як цінова дискримінація третього ступеня [90], оскільки покупці ЕЕ в Україні не мають можливості подавати свої заявки з цінами вищими, ніж 7 500 $\text{€}/(\text{МВт}\cdot\text{год})$. Тоді попит ЕЕ Молдови з більш високою ціною витіснить внутрішній український попит на торгах РДН, що збільшуватиме обсяг дефіциту виробничих потужностей в ОЕС України. При цьому гранична ціна на торгах РДН України не зміниться, оскільки вона вже досягла максимального регуляторного обмеження.

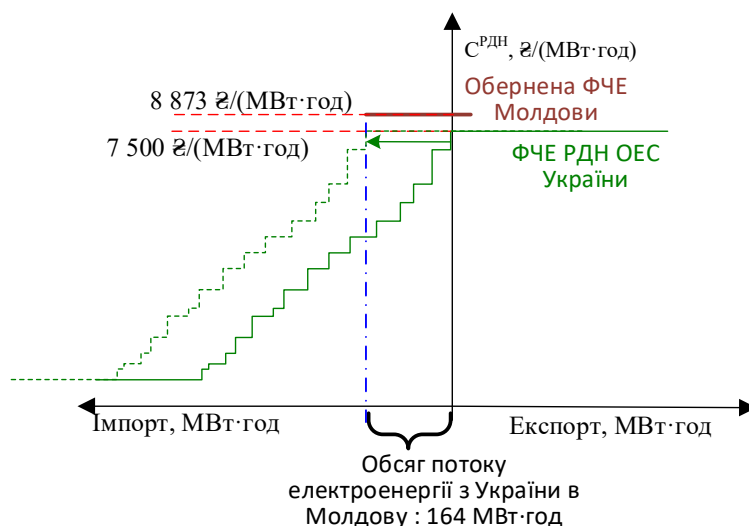


Рисунок 3.6. Результат сполучення ринків із потоком ЕЕ від України в Молдову

Отже, за умови дотримання чинних в Україні регуляторних обмежень на ціни в сегменті РДН, процедури сполучення мають доповнюватися правилом, яке унеможливило б прийняття цінових заявок від суміжних енергосистем із цінами поза регуляторним діапазоном обмежень. У такому випадку для відображеного на рис. 3.6 результату сполучення ємність експорту ЕЕ у Молдову із ціною, вищою за встановлене цінове обмеження, автоматично відхилятиметься і відображена на рис.3.6 ринкова рівновага в розрахункову годину на РДН України не зміниться.

3.5. Висновки до розділу 3

1. Складено математичний опис процесів ціноутворення на ринку ЕЕ як сукупності формалізованих дій. Розроблено метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку ЕЕ для аналізу динаміки змін ціни в вузлах усього ланцюга фізичного та економічного потокорозподілу від виробника до кінцевого споживача, із застосуванням обчислювальних процедур визначення індексів. Особливість застосування цього методу полягає в тому, що він дає змогу відображати динаміку зміни цін та обсягів ЕЕ у підсистемах, елементарних вузлах і вузлових точках СОТС та побудувати систему моніторингу та індикаторного аналізу стану ринку ЕЕ, а також проведення розрахунково-експериментальних досліджень із прогнозування й оцінювання впливу на ціноутворення динамічних процесів зміни як внутрішніх, так і зовнішніх факторів.

2. Розроблено з використанням методу вузлової трансформації алгоритмічну модель аналізу динаміки попиту на ЕЕ на ціноутворюючих сегментах оптового ринку задля якісного оцінювання стану процесу ціноутворення ринку. Результати розрахунково-експериментальних досліджень моделі із застосуванням реальних даних щодо змін цін та обсягів дають можливість отримати інформацію про динаміку погодинного профілю середніх обсягів і ціни продажу, а також посезонного профілю середньогодинних обсягів продажу ЕЕ за 2020-2021 роки, яка підтверджує суттєву нестаціонарність у часі процесу ціноутворення та дає змогу зробити відповідні висновки про наявність якісної залежності середньої ціни РДН від зміни структури обсягів акцептованої ЕЕ на відповідних сегментах ринку.

3. Розроблено метод оцінки результатів сполучення ринків ЕЕ, який дає змогу здійснити аналіз впливу зовнішніх чинників на рівноважні стани сполучуваних ринків ЕЕ України і країн ЄС та отримати чисельні

характеристики можливостей і наслідків застосування відповідного регуляторного рішення про сполучення.

4. Розглянуто приклад використання запропонованого методу для оцінювання наслідків сполучення ринків ЕЕ України та Молдови. Показано, що утворена на основі застосування запропонованого методу імітаційна модель може використовуватися і для більш ґрунтовних досліджень щодо перспектив сполучення РДН України із ринками ЕЕ інших суміжних країн.

РОЗДІЛ 4

КОМП'ЮТЕРНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЦІНИ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ НА СЕГМЕНТІ РИНКУ "НА ДОБУ НАПЕРЕД"

4.1. Формування ціни на електроенергію на сегменті оптового ринку «на добу наперед»

З моменту початку періоду функціонування організаційної моделі «конкуренція на всіх рівнях» на ОРЕ України діє принципово нова система ціноутворення на «товар» виробників ЕЕ – учасників РДД, РДН, ВДР, БР, на «послуги» енергетичних компаній – учасників РДП, яка базується на ринкових принципах. Тому залежність обсягів продажів ЕЕ і допоміжних послуг від вихідних цін у торгових заявках учасників ринку ЕЕ на відповідній біржі, аукціоні істотно зросла. А отже, учасникам ринку необхідно переглянути принципи й методичні основи прийняття рішення про ціни та обсяги під час формування торгових заявок. Окрім того, у нових умовах функціонування ОРЕ потрібно виробити певну стратегію цінового позиціонування на сегментах ринку, сформованих і діючих у підсистемі ОР – РДД, РДН, ВДР, а також у підсистемі ОСП - БР, РДП. Конкурентна модель ринку ЕЕ України офіційно запрацювала з 1 липня 2019 року. Згідно з Правилами ринку [2], основними учасниками ринку є виробники ЕЕ - ГК і покупці - постачальники оптові та роздрібні, енерготрейдери. Структурна схема організаційно-технічної системи управління ціноутворенням на ринку ЕЕ для нової конкурентної моделі ринку представлена на рис. 1.1.

Основними структурними елементами системи організаційного, оперативно-технологічного та інформаційного управління, відповідно до Правил ринку [2], є ОР і ОСП, які й організують роботу на сегментах ринку в сенсі організації торгівлі ЕЕ і допоміжними послугами шляхом проведення аукціонів у цілях забезпечення умов конкурентного ціноутворення під час проведення торгів, для забезпечення надійності

поставок ЕЕ і з урахуванням вимог до гарантування стійкості режимів ОЕС. Теоретично всі суб'єкти могли б купувати і продавати ЕЕ за вільними ринковими (нерегульованим) цінами. Однак фактично склалося так, що тільки на сегментах ринку РДН, ВДР і БР реалізований ринковий принцип ціноутворення. У його основу покладено механізм конкурентного ціноутворення, що враховує баланс попиту і пропозиції на аукціоні торгових заявок (про ціни, обсяги) покупців і продавців ЕЕ. На рис.4.1 представлено принцип формування кривих попиту і пропозиції та визначення маржинальної ціни під час проведення аукціонів купівлі-продажу ЕЕ на сегментах ринку за даними сайтів [42, 91].

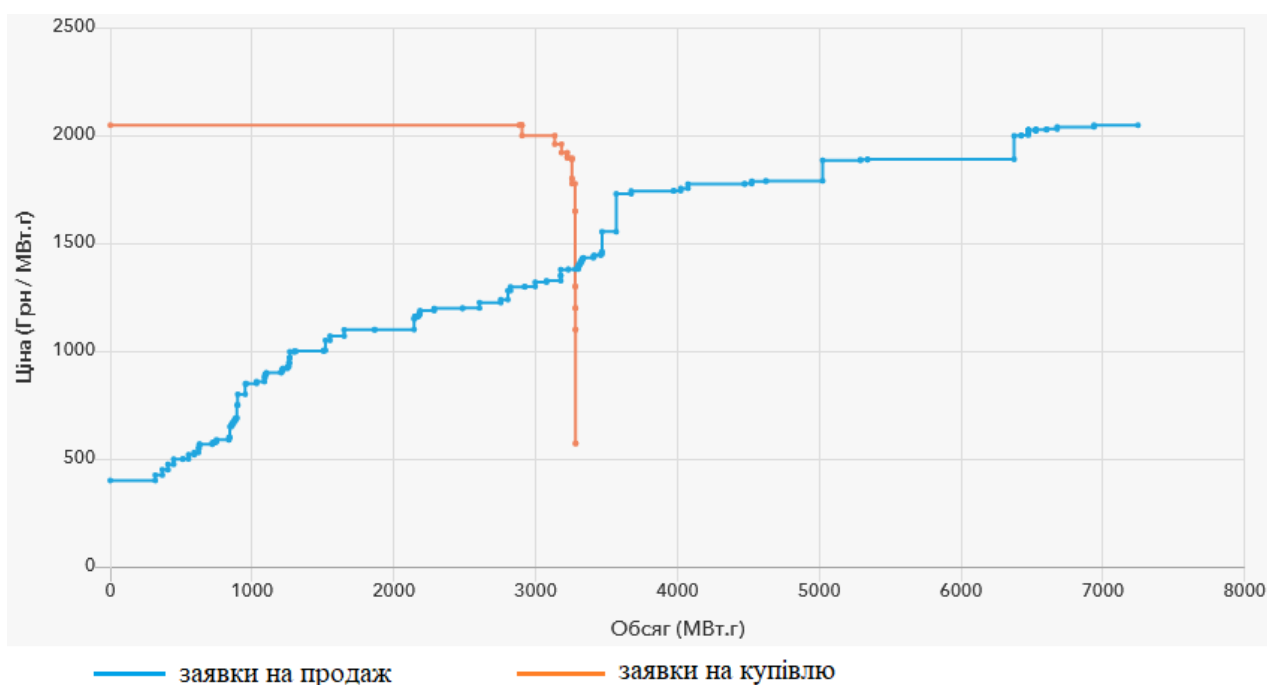


Рисунок 4.1. Криві попиту і пропозиції цін на РДН

У науковому дослідженні [92] проаналізовано світовий досвід функціонування конкурентних ринків ЕЕ стосовно застосування різних способів подання заявок учасників ринків РДН та БР. Встановлено, що існує два основних підходи щодо подання заявок купівлі-продажу ЕЕ. Перший підхід полягає в тому, що в заявках використовується принцип «поетапно

ціново-кількісної пари» і застосовується ГК на ринках Іспанії, Італії, Нідерландів, Польщі та Румунії. У другому підході в заявках використовується принцип подання «дискретних ціново-кількісних пар із лінійною інтерполяцією поміж ними», що застосовується на біржах ЕЕ NordPool, Німеччини, Франції. У цій роботі також детально описано особливості використання зазначених підходів.

Проведений аналіз літературних джерел [53,93], показує, що для формування заявок застосовують різні імітаційні моделі сегментів ринку з метою пошуку оптимальних рішень для подання заявок із купівлі-продажу ЕЕ, а також моделі процесів ціноутворення на них. Чимало досліджень присвячено удосконаленню методів прогнозування цінових показників функціонування ринку. Природно, що перераховані інструментальні засоби з різним ступенем продуктивності можуть бути використані й використовуються компаніями виробниками під час формування цінових показників заявок на аукціоні.

Особливостям встановлення цін під час використання різних методів обліку витрат присвячено роботи [94, 95]. Автори розглядають історію розвитку методів ціноутворення на енергію, досліджують вплив загальної стратегії бізнесу компанії на вибір методу встановлення цін.

У науковому дослідженні [94] виділено три основні концепції формування цін, які застосовуються в економічно розвинених країнах.

1. Концепція формування ціни, що ґрунтується на визначенні повних середніх витрат на виробництво ЕЕ за весь термін її експлуатації - Average Total Costs of Utility (ATCU). Під час використання цієї концепції ціну визначають на основі принципу, що повний прибуток від реалізації енергії має бути достатнім для покриття всіх поточних витрат енергопостачальної компанії за весь період її діяльності та для отримання певного прибутку.

2. Концепція, заснована на визначенні короткострокових граничних витрат – Short Run Marginal Costs (SRMC). Граничні критичні витрати є

додатковими витратами, які необхідні для покриття короткочасного одиничного приросту потреби в ЕЕ. Фактично короткострокові граничні витрати представляють собою ціну вироблення додаткового обсягу ЕЕ на самому економічному на поточний момент часу генераторі. Під час використання цієї концепції встановлюються диференційовані за часом ціни на ЕЕ. Такі ціни добре відображають витрати енергосистеми на вироблення, передачу й розподіл ЕЕ. Крім того, вони добре балансують попит та пропозицію на ЕЕ.

3. Концепція формування цін з урахуванням визначення довгострокових граничних витрат – Long Run Marginal Costs (LRMC). Такі ціни ґрунтуються на визначенні всіх витрат виробників на тривалу перспективу, пов'язаних із необхідністю забезпечення систематичного приросту попиту на ЕЕ. Отже, такі ціни ґрунтуються на враховуванні витрат на спорудження додаткових генеруючих потужностей, необхідних для покриття зростаючого попиту ЕЕ.

Саме цінові показники заявок виробників і покупців ЕЕ є вихідними даними для представлених у цьому розділі комп'ютерних моделей. Будемо вважати, що в умовах різноманіття технологічних особливостей виробництва ЕЕ, початковий етап формування ціни виробниками здійснюється ними із застосуванням перерахованих вище концепцій.

4.2. Комп'ютерна модель розв'язання оптимізаційної задачі з визначення рівноважних погодинних цін на сегменті ринку «на добу наперед»

Виробники та постачальники ЕЕ подають свої заявки до ОР і надалі починає працювати механізм реалізації ЕЕ з повільними цінами, які визначаються на аукціоні сегмента РДН. Цей механізм відповідає вимогам Правил [2] (Додаток №5 стр.64), у яких визначено алгоритм проведення аукціону РДН, особливість його застосування полягає в тому, що під час

вирішення колізій застосовується принцип максимізації коефіцієнта соціального доходу (КСД), що розраховується за формулами:

$$\begin{aligned} \text{КСД}_z &= \text{Дохід покупців}_z + \text{Дохід продавців}_z, \\ \text{Дохід покупців}_z &= \sum_i \sum_{j=1}^n V_{j,i,z} (P_{j,i,z} - PM_{i,z}), \\ \text{Дохід продавців}_z &= \sum_i \sum_{j=1}^n V_{j,i,z} (PM_{i,z} - P_{j,i,z}), \end{aligned}$$

де $V_{j,i,z}$ - акцептований обсяг j -ої заявки в розрахунковому періоді i в торговій зоні z ;

$P_{j,i,z}$ - заявлена ціна j -ої заявки в розрахунковому періоді i в торговій зоні z ;

$PM_{i,z}$ - ціна на РДН у періоді i в торговій зоні z ;

j - заявка;

n - кількість заявок на торгах;

i - розрахунковий період;

z - торгова зона.

Визначення рівноважної ціни ЕЕ на підставі цінових заявок виробників (продаж ЕЕ) та цінових заявок постачальників (купівля ЕЕ), призводить до необхідності розв'язання нелінійної оптимізаційної задачі. Розглянемо питання щодо побудови математичної моделі задачі та розроблення спеціалізованого обчислювального алгоритму її розв'язку [60].

4.2.1. Математична модель задачі

Нехай $\forall j$ або $\forall k$ та $\forall i$ величини $(\bar{B}_{j,i}, \bar{P}_{j,i})$ або $(\bar{S}_{k,i}, \bar{P}_{k,i})$ - це обсяг і ціна купівлі або продажу ЕЕ, зазначені в заявці j для розрахункового періоду i . При цьому всі заявлені обсяги та ціни задовольняють обмеження:

$$\bar{B}_{j,i} \geq 0, \quad P_i^{\min} \leq \bar{P}_{j,i} \leq P_i^{\max}, \quad \bar{S}_{k,i} \geq 0, \quad P_i^{\min} \leq \bar{P}_{k,i} \leq P_i^{\max}.$$

Нехай I – множина розрахункових періодів, а множини заявок $J = J_1 \cup J_2 \cup J_3 \cup J_4 \cup J_5$ та $K = K_1 \cup K_2 \cup K_3 \cup K_4 \cup K_5$ на купівлю та продаж, що складаються з підмножин заявок певного типу.

Відповідно до затверджених Регулятором Правил ринку РДН та ВДР [3] існує декілька видів заявок на купівлю та продаж ЕЕ на сегменті РДН. Так, можуть бути подані такі види заявок, а саме:

- погодинні, що містять погодинні ціни та обсяги одного розрахункового періоду;
- прості блочні, що містять одну ціну, що є середньозваженою за обсягами, що зазначаються у всіх розрахункових періодах, які входять до блоку;
- профільована блочна, що містять пари «ціна-обсяг» для кожного розрахункового періоду, які входять у блок;
- пов'язані блочні, що складаються з набору простих блочних заявок, пов'язаних у декілька рівнів. Прийняття пов'язаних блочних заявок (другого та третього рівнів) може відбутися лише за умови акцепту простої блочної заявки попереднього рівня. При цьому заявка має такі обмеження, як: максимальна кількість рівнів пов'язаних простих блочних заявок - 3; максимальна кількість простих блочних заявок, пов'язаних із заявкою попереднього рівня - 3; загальна максимальна кількість простих блочних заявок у пов'язаній блочній заявці – 7;
- гнучка заявка передбачає автоматичний вибір розрахункового періоду для акцепту заявленого обсягу електричної енергії за найвигіднішою ціною, тобто дає можливість її ініціатору придбати або продати певний обсяг електроенергії (у МВт-год) за вказаною (бажаною ініціатором) ціною.

Основними серед заявок на сегменті РДН в Україні, як правило, є погодинні і блочні заявки для продажу та погодинні для купівлі. При цьому в Україні більше використовують під час продажу на РДН блочні (прості та

зв'язані) заявки, а під час купівлі – погодинні. Це пов'язано із тим, що в структурі продажу ЕЕ на РДН більше припадає на ТЕС та електростанції з використанням ВДЕ, а під час купівлі – на постачальники та трейдери.

Підмножини типових заявок

на купівлю

на продаж

J_1 – погодинні

K_1 – погодинні

J_2 – прості блочні

K_2 – прості блочні

J_3 – зв'язані блочні

K_3 – зв'язані блочні

J_4 – профільовані блочні

K_4 – профільовані блочні

J_5 – гнучкі блочні

K_5 – гнучкі блочні

Отже, математичне формулювання задачі з визначення ціни та обсягів купівлі-продажу ЕЕ із застосуванням «принципу максимізації коефіцієнта соціального доходу» має вигляд оптимізаційної задачі з таким функціональним критерієм:

$$C_{SI} = \left(\begin{array}{l} \sum_{\forall j \in J_1} \sum_{\forall i \in I} B_{j,i} (\bar{P}_{j,i} - P_i) \\ + \sum_{\forall j \in J_2} b_j \sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i} (\bar{P}_j - P_i) \\ + \sum_{\forall j \in J_3} b_j \sum_{\forall i \in I} B_{j,i} (\bar{P}_j - P_i) \\ + \sum_{\forall j \in J_4} b_j \sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i} (\bar{P}_{j,i} - P_i) \\ + \sum_{\forall j \in J_5} \bar{B}_j \sum_{\forall i \in I} b_{j,i} (\bar{P}_j - P_i) \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \sum_{\forall k \in K_1} \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} (P_i - \bar{P}_{k,i}) \\ + \sum_{\forall k \in K_2} s_k \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i} (P_i - \bar{P}_k) \\ + \sum_{\forall k \in K_3} s_k \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} (P_i - \bar{P}_k) \\ + \sum_{\forall k \in K_4} s_k \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i} (P_i - \bar{P}_{k,i}) \\ + \sum_{\forall k \in K_5} \bar{S}_k \sum_{\forall i \in I} s_{k,i} (P_i - \bar{P}_k) \end{array} \right) \rightarrow \max, \quad (4.1)$$

а також низкою обмежень, які враховують особливості застосування заявок різного типу.

Обмеження, обумовлені параметрами погодинних заявок: $\forall j \in J_1$ та

$\forall k \in K_1$.

За умовою подільності обсягу $\bar{B}_{j,i}$ погодинної заявки на купівлю маємо:

$$0 \leq B_{j,i} \leq b_{j,i} \bar{B}_{j,i}, \quad \forall j \in J_1, \quad \forall i \in I,$$

а за умовою його неподільності:

$$B_{j,i} = b_{j,i} \bar{B}_{j,i}, \quad \forall j \in J_1, \quad \forall i \in I,$$

де $b_{j,i} \in (0,1)$, $\forall j \in J_1, \quad \forall i \in I$.

Обмеження зверху ціни РДН ціною $\bar{P}_{j,i}$ погодинної заявки на купівлю:

$$P_i \leq b_{j,i} \bar{P}_{j,i}, \quad \forall j \in J_1, \quad \forall i \in I.$$

За умовою подільності обсягу $\bar{S}_{k,i}$ погодинної заявки на продаж маємо:

$$0 \leq S_{k,i} \leq s_{k,i} \bar{S}_{k,i}, \quad \forall k \in K_1, \quad \forall i \in I,$$

а за умовою його неподільності:

$$S_{k,i} = s_{k,i} \bar{S}_{k,i}, \quad \forall k \in K_1, \quad \forall i \in I,$$

де $s_{k,i} \in (0,1)$, $\forall k \in K_1, \quad \forall i \in I$.

Обмеження знизу ціни РДН ціною $\bar{P}_{k,i}$ погодинної заявки на продаж:

$$P_i \geq s_{k,i} \bar{P}_{k,i}, \quad \forall k \in K_1, \quad \forall i \in I.$$

Обмеження, обумовлені параметрами простих блочних заявок:

$\forall j \in J_2$ та $\forall k \in K_2$.

Обмеження зверху ціни РДН ціною $\bar{P}_j$ простої блочної заявки на купівлю:

$$\frac{\sum_{\forall i \in I} P_i \bar{B}_{j,i}}{\sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i}} \leq b_j \bar{P}_j, \quad \forall j \in J_2.$$

Обмеження знизу ціни РДН ціною $\bar{P}_k$ простої блочної заявки на продаж, якщо така заявка не є материнською для зв'язаних блочних заявок:

$$\frac{\sum_{\forall i \in I} P_i \bar{S}_{k,i}}{\sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i}} \geq s_k \bar{P}_k, \quad \forall k \in K_2.$$

Обмеження, обумовлені параметрами зв'язаних блочних заявок:

$\forall j \in J_3$ та $\forall k \in K_3$.

Обмеження зверху ціни РДН ціною $\bar{P}_j$ зв'язаної блочної заявки на купівлю:

$$b_m \frac{\sum_{\forall i \in I} P_i \bar{B}_{j,i}}{\sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i}} \leq b_j \bar{P}_j, \quad \forall j \in J_3.$$

Умова першого рівня зв'язності заявки $j \in \bar{J}_3$ з материнською заявкою $m \in J_2$:

$$B_{j,i} = b_m \bar{B}_{j,i}, \quad \forall j \in \bar{J}_3 \in J_3, \quad \forall m \in J_2, \quad \forall i \in I.$$

Умова другого рівня зв'язності заявки $j \in \bar{\bar{J}}_3$ з заявкою першого рівня зв'язності $\bar{m} \in \bar{J}_3$:

$$B_{j,i} = b_{\bar{m}} \bar{B}_{j,i}, \quad \forall j \in \bar{\bar{J}}_3 \in \bar{J}_3 \in J_3, \quad \forall \bar{m} \in \bar{J}_3, \quad \forall i \in I.$$

Умова третього рівня зв'язності заявки $j \in \bar{\bar{\bar{J}}}_3$ із заявкою другого рівня зв'язності $\bar{\bar{m}} \in \bar{\bar{J}}_3$:

$$B_{j,i} = b_{\bar{\bar{m}}} \bar{B}_{j,i}, \quad \forall j \in \bar{\bar{\bar{J}}}_3 \in \bar{\bar{J}}_3 \in \bar{J}_3 \in J_3, \quad \forall \bar{\bar{m}} \in \bar{\bar{J}}_3, \quad \forall i \in I.$$

Обмеження знизу ціни РДН ціною $\bar{P}_k$ зв'язаної блочної заявки на продаж:

$$s_m \frac{\sum_{\forall i \in I} P_i \bar{S}_{k,i}}{\sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i}} \geq s_k \bar{P}_k, \quad \forall k \in K_3.$$

Умова першого рівня зв'язності заявки $k \in \bar{K}_3$ з материнською заявкою $m \in K_2$:

$$s_m \left(\sum_{\forall i \in I} P_i \bar{S}_{m,i} - \bar{P}_m \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{m,i} \right) + s_k \left(\sum_{\forall i \in I} P_i \bar{S}_{k,i} - \bar{P}_k \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i} \right) \geq 0, \\ \forall k \in \bar{K}_3 \in K_3, \quad \forall m \in K_2, \quad \forall i \in I.$$

Умова другого рівня зв'язності заявки $k \in \bar{\bar{K}}_3$ із заявкою першого рівня зв'язності $\bar{m} \in \bar{K}_3$:

$$S_{k,i} = s_{\bar{m}} \bar{S}_{k,i}, \quad \forall k \in \bar{\bar{K}}_3 \in \bar{K}_3 \in K_3, \quad \forall \bar{m} \in \bar{K}_3, \quad \forall i \in I.$$

Умова третього рівня зв'язності заявки $k \in \bar{\bar{\bar{K}}}_3$ із заявкою другого рівня зв'язності $\bar{\bar{m}} \in K_3$:

$$S_{k,i} = s_{\bar{\bar{m}}} \bar{\bar{S}}_{k,i}, \quad \forall k \in \bar{\bar{\bar{K}}}_3 \in \bar{\bar{K}}_3 \in \bar{K}_3 \in K_3, \quad \forall \bar{\bar{m}} \in \bar{\bar{K}}_3, \quad \forall i \in I.$$

Обмеження, обумовлені параметрами профільованих блочних заявок:

$\forall j \in J_4$ та $\forall k \in K_4$.

Обмеження зверху ціни РДН ціною $\bar{P}_{j,i}$ профільованої заявки на купівлю:

$$P_i \leq b_j \bar{P}_{j,i}, \quad \forall j \in J_4, \quad \forall i \in I.$$

Обмеження знизу ціни РДН ціною $\bar{P}_{k,i}$ профільованої заявки на продаж:

$$P_i \geq s_k \bar{P}_{k,i}, \quad \forall k \in J_4, \quad \forall i \in I.$$

Обмеження, обумовлені параметрами гнучких заявок: $\forall j \in J_5$ та $\forall k \in K_5$.

Умови акцептування гнучкої заявки $j \in J_5$ на купівлю:

$$0 \leq \sum_{\forall i \in I} b_{j,i} \leq 1, \quad \forall j \in J_5.$$

Обмеження зверху ціни РДН ціною $\bar{P}_j$ гнучкої заявки на купівлю:

$$P_i \leq b_{j,i} \bar{P}_j, \quad \forall j \in J_5, \quad \forall i \in I.$$

Умови акцептування гнучкої заявки $k \in K_5$ на продаж:

$$0 \leq \sum_{\forall i \in I} s_{k,i} \leq 1, \quad \forall k \in K_5.$$

Обмеження зверху ціни РДН ціною $\bar{P}_k$ гнучкої заявки на продаж:

$$P_i \geq s_{k,i} \bar{P}_k, \quad \forall k \in K_5, \quad \forall i \in I.$$

Обмеження на баланс акцептованих обсягів купівлі та продажу ЕЕ:

$$\begin{pmatrix} \sum_{\forall j \in J_1} \sum_{\forall i \in I} B_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_2} b_j \sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_3} b_j \sum_{\forall i \in I} B_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_4} b_j \sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_5} \bar{B}_j \sum_{\forall i \in I} b_{j,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{\forall k \in K_1} \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_2} s_k \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_3} s_k \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_4} s_k \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_5} \bar{S}_k \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} \end{pmatrix}, \quad \forall i \in I.$$

Функціональний критерій (4.1) оптимізаційної задачі має тотожний спрощений вигляд:

$$C_{SI} = \begin{pmatrix} \sum_{\forall j \in J_1} \sum_{\forall i \in I} B_{j,i} \bar{P}_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_2} b_j \bar{P}_j \sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_3} b_j \bar{P}_j \sum_{\forall i \in I} B_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_4} b_j \sum_{\forall i \in I} \bar{B}_{j,i} \bar{P}_{j,i} \\ + \sum_{\forall j \in J_5} \bar{B}_j \bar{P}_j \sum_{\forall i \in I} b_{j,i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{\forall k \in K_1} \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} \bar{P}_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_2} s_k \bar{P}_k \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_3} s_k \bar{P}_k \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_4} s_k \sum_{\forall i \in I} \bar{S}_{k,i} \bar{P}_{k,i} \\ + \sum_{\forall k \in K_5} \bar{S}_k \bar{P}_k \sum_{\forall i \in I} S_{k,i} \end{pmatrix} \rightarrow \max. \quad (4.2)$$

Сформульована оптимізаційна задача є нелінійною й містить два типи невідомих змінних: цілочисельні змінні, значення яких відображають

ринкові рішення щодо акцепту заявок на купівлю та продаж ЕЕ; дійсні змінні, які визначають рівноважні ціни для кожного розрахункового періоду.

4.2.2. Алгоритмічна організація розв'язання задачі

На сьогодні не існує універсальних алгоритмів, придатних для розв'язання такої нелінійної задачі з різнотипними змінними. Тому пропонуємо спеціалізований алгоритм її розв'язку, загальна схема якого представлена на рис. 4.2. Основою побудови алгоритму є принципова можливість розгляду сформульованої оптимізаційної задачі в параметричному вигляді, де в значенні параметрів виступають рівноважні ціни на ринку. При такому розгляді оптимізаційної задачі її можна представити як задачу змішаного цілочисельного лінійного програмування, невідомими змінними якої є відповідні рішення щодо акцепту заявок на купівлю та продаж ЕЕ. Тоді для знаходження рівноважних цін на РДН – значень невідомих параметрів задачі – можна застосувати ітераційний метод їх пошуку на дискретній множині цін погодинних заявок на продаж ЕЕ. При цьому значення цін на РДН визначаються на кожній ітерації відповідно до Правил ринку.

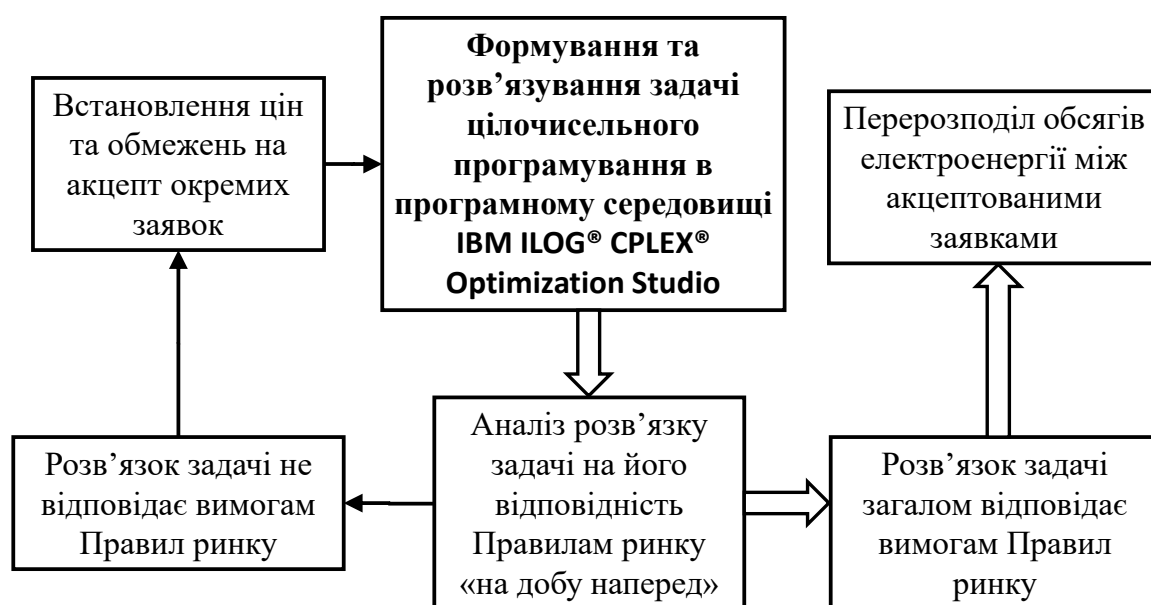


Рисунок 4.2. Узагальнена схема алгоритму пошуку рівноваги на РДН

У сформульованій задачі з математичного моделювання ринкової рівноваги на РДН не відображено такі вимоги «Правил ринку РДН та ВДР № 1740 від 11 лютого 2022 року №250, зазначені в окремих пунктах Додатку 5:

1. пункт 4.6. «Для пропорційного розподілу обсягу проданої електричної енергії між кроками заявок на купівлю визначається відношення обсягу, що має бути розподілений, до загального обсягу, заявленого з ціною на РДН, на яке потім будуть помножені обсяги кожного відповідного кроку заявок на купівлю»;
2. пункт 4.7. «Для пропорційного розподілу обсягу купленої електричної енергії між кроками заявок на продаж визначається відношення обсягу, що має бути розподілений, до загального обсягу, заявленого з ціною на РДН, на яке потім будуть помножені обсяги кожного відповідного кроку заявок на продаж»;
3. пункт 5.2. «Крок погодинної заявки на продаж електричної енергії ... приймається повністю, якщо його ціна нижча або дорівнює ціні на РДН для відповідного розрахункового періоду і є достатній обсяг для купівлі з метою повного задоволення останнього кроку заявки на продаж»;

Врахування перших двох вимог Правил ринку здійснюється на підсумковому етапі оброблення отриманого рішення в межах сформульованої задачі математичного програмування.

Дотримання третьої вимоги забезпечується ітераційною послідовністю дій щодо визначення ринкових цін з уточненням переліку заявок та розв'язування задач щодо оптимізації для цього переліку.

Формулювання та розв'язування задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування здійснюється в програмному середовищі IBM ILOG® CPLEX® Optimization Studio. Програмна імплементація такої задачі здійснена мовою OPL [96, 97].

4.2.3. Аналіз результатів обчислювальних експериментів, перевірка адекватності моделі

Алгоритм реалізований мовою OPL у вигляді програмного коду. Реалізований алгоритм застосовано для отримання розв'язків тестового завдання (з відомими результатами) для пошуку рівноважного стану на РДН. У процесі виконання тестового завдання було встановлено, що витрати часу на отримання розв'язків задач змішаного цілочисельного лінійного програмування не перевищували 0.03 с. Це свідчить про високу швидкість отримання розв'язку сформульованої оптимізаційної задачі.

Нижче в таблиці 4.1 наведено інформацію щодо продуктивності пропонованого алгоритму визначення акцептованої ціни та обсягів РДН (що далі називатимемо альтернативним, стосовно застосовуваного в цей час алгоритму Оператора ринку визначення рівноважної ціни та обсягів на аукціоні) на основі даних за 2021-2022 роки.

Таблиця 4.1. Інформація щодо терміну проведення розрахунків визначення акцептованих цін на РДН

Місяць	Мінімальний час розрахунку, с	Максимальний час розрахунку, с	Середній час розрахунку, с	Середня кількість кроків
2021.01	2	64	16	340
2021.02	1	33	10	300
2021.03	8	43	19	390
2021.04	7	47	24	380
2021.05	8	49	25	330
2021.06	5	20	10	300
2021.07	2	31	9	240
2021.08	2	77	22	450
2021.09	4	45	22	430
2021.10	20	73	40	480
2021.11	3	46	15	470
2021.12	2	32	8	450
2022.01	<1	35	6	460
2022.02	<1	33	8	250

2022.03	<1	3	1	30
2022.04	<1	1	1	25
2022.05	<1	2	1	20
2022.06	<1	1	1	25
2022.07	<1	2	1	30
2022.08	<1	3	1	40
2022.09	<1	2	1	80
2022.10	<1	1	1	90
2022.11	<1	2	2	100
2022.12	<1	2	1	90

У таблиці вище зазначено такі параметри:

- мінімальний, максимальний та середній час розрахунку – мінімальний, максимальний та середній час (секунди), витрачений альтернативним алгоритмом на знаходження акцептованої ціни та обсягу РДН протягом визначеного місяця;
- середня кількість кроків – середня кількість унікальних значень ціни, яка була заявлена на торги. Цей параметр зазначено у зв'язку з тим, що альтернативний алгоритм передбачає використання підходу ітеративного збільшення/зменшення ціни в межах загальної множини заявлених цін.

Як видно з таблиці вище, альтернативний алгоритм демонструє досить високу продуктивність, зокрема варто звернути увагу, що збільшення кількості кроків ціни не призводить до критичного підвищення середнього часу розрахунку. Також необхідно зазначити, що результати, отримані альтернативним алгоритмом, ідентичні до результатів, отриманих наявним програмним комплексом Акціонерного товариства «Оператор рінку». Нижче наведено результати порівняння розрахунків із використанням вихідних даних від 01 червня 2021 року.

Таблиця 4.2. Інформація щодо порівняльного аналізу результатів розрахунків, отриманих з альтернативним алгоритмом та програмним комплексом Оператора ринку

Доба	Година	Ціна визначена альтернативним алгоритмом	Обсяг визначений альтернативним алгоритмом	Відхилення ціни від результатів ПК ОР	Відхилення обсягу від результатів ПК ОР
01.06.2021	1	450,00	2428,6	0	0
01.06.2021	2	408,58	2259,3	0	0
01.06.2021	3	400,00	2199,1	0	0
01.06.2021	4	350,00	2152,8	0	0
01.06.2021	5	350,00	2184,5	0	0
01.06.2021	6	400,00	2280,0	0	0
01.06.2021	7	440,58	2562,9	0	0
01.06.2021	8	900,13	2700,1	0	0
01.06.2021	9	970,13	2749,3	0	0
01.06.2021	10	900,13	2608,9	0	0
01.06.2021	11	900,00	2509,1	0	0
01.06.2021	12	930,13	2529,1	0	0
01.06.2021	13	920,13	2447,8	0	0
01.06.2021	14	920,13	2484,3	0	0
01.06.2021	15	900,13	2396,6	0	0
01.06.2021	16	900,13	2425,7	0	0
01.06.2021	17	940,00	2634,5	0	0
01.06.2021	18	1020,00	2827,6	0	0
01.06.2021	19	1899,90	3069,4	0	0
01.06.2021	20	1959,99	3622,7	0	0
01.06.2021	21	2048,23	3755,7	0	0
01.06.2021	22	2048,23	3464,8	0	0
01.06.2021	23	2048,23	3700,5	0	0
01.06.2021	24	1227,00	3226,3	0	0

Отримані кількісні дані результатів тестових розрахунків визначення погодинних рівноважних цін, які наведено в Таблиці 4.2, підтверджують адекватність моделі рівноважного стану ринку РДН. Запропонований алгоритм розв'язування оптимізаційної задачі з визначення рівноважної ціни та обсягів на аукціоні може бути застосований ОР для виконання щоденних практичних розрахунків.

4.3. Комп'ютерна модель розв'язання задач із розрахунку ціни та обсягів у пропозиціях теплових електростанцій

4.3.1. Алгоритмічна модель процесу підготовки заявок теплових електростанцій на сегменті оптового ринку «на добу наперед»

Алгоритмічна модель – це комплекс алгоритмів, які описують функціонування досліджуваного процесу чи системи. Розглянемо побудову алгоритмічної моделі процесу підготовки пропозицій ГК теплових електростанцій (ТЕС) на РДН [60].

Розглянемо побудову алгоритмічної моделі процесу підготовки пропозицій ГК теплових електростанцій (ТЕС) на РДН, яка заснована на попередньо розробленій імітаційній моделі [60, 78], що використана під час розробки комп'ютерної програми “Equant Cloud” (копія авторського свідоцтва наведена у Додатку Г) . В основі розробленої моделі застосовано формули та вирази, що використовувались для опису загальних техніко-економічних характеристик роботи ТЕС в Правилах оптового ринку електричної енергії (які діяли до 01.07.2019р), але з урахуванням припущень, які використано з метою адаптації відповідних виразів для опису формування заявок ТЕС в сегменті РДН [78, 112].

При цьому, будемо брати за основу розрахунок прогнозованої ціни та платежу виробникам, які працюють за ціновими заявками, попередньої моделі ОРЕ (до 01.07.2019 року), що передбачено затвердженням НКРЕКП «Порядком формування прогнозованої оптової ціни електричної енергії» [49] та описаної імітаційної і розрахункової моделі, запропонованої в роботах [78, 112] , але лише для сегменту ринку - РДН.

І. Прийняті припущення. Для побудови моделі були прийняті такі припущення:

- весь обсяг попиту та пропозиції ЕЕ подається на РДН;

- купівля продажів ЕЕ за двосторонніми договорами враховується виключно для купівлі гарантованим покупцем ЕЕ у виробників ЕЕ за “зеленим” тарифом та виробників на ТЕЦ;

- торги на РДН виконуються для розрахункового періоду в одну годину для всієї доби;

- використано функцію нееластичного попиту, що дорівнює прогнозованому графіку покриття навантаження;

- функція пропозиції формується для усіх виробників електричної енергії в ОЕС України, з урахуванням графіку ремонтів та реконструкції блоків ТЕС та АЕС;

- значення імпорту ЕЕ в Україну відсутній;

- для участі на РДН виробники подають пропозиції {ціна; обсяг} окремо для кожної години розрахункової доби;

- усі розрахунки здійснювались без урахування ПДВ.

II. Формування ціни пропозиції блоку ТЕС.

1. Ціна ЕЕ у пропозиціях ТЕС для відповідного блоку розраховується за формулою, грн./МВт·год:

$$C_{\pi}^{ТЕС} = \frac{b_{p\delta 4} \times C_{\delta}^{yne}}{1000} \times 1,032,$$

де $b_{p\delta 4}$ – питомі витрати умовного палива на відпущену ЕЕ, за максимального значення потужності на кривій графіка вихідних нормативних питомих витрат умовного палива відповідного блоку, г/кВт·год; 1000 – приведення результату розрахунку до одиниць виміру – грн./МВт·год; 1,032 – акциз на ЕЕ виробників, відповідно до вимог чинного на момент розрахунків законодавства; C_{δ}^{yne} – середньозважена ціна тони умовного палива (т.у.п.) на виробництво ЕЕ відповідним блоком, грн./т.у.п.

2. *Середньозважена ціни умовного палива.* Середньозважена ціна умовного палива на виробництво ЕЕ відповідним блоком розраховується за формулою:

$$C_{\delta}^{yne} = \sum_k \left(\frac{C_{\delta k}^{nn}}{K_{\delta k}^Q} \times \frac{r_{\delta k}^e}{100} \right),$$

де k – вид натурального палива (вугілля, газ, мазут); $C_{\delta k}^{nn}$ – ціна натурального палива з урахуванням витрат на транспортування, а також доставки та перевалки викопного палива (без ПДВ), грн./т.; $r_{\delta k}^e$ – відсоток використання умовного палива на виробництво ЕЕ, %; $K_{\delta k}^Q$ – калорійний еквівалент переведення натурального палива в умовне. Калорійний еквівалент $K_{\delta k}^Q$ переведення натурального палива в умовне розраховується за формулою:

$$K_{\delta k}^Q = \frac{Q_k}{7000},$$

де Q_k – теплота згоряння палива k , кКал/кг; 7 000 – теплотворна здатність умовного палива, кКал/кг.

3. *Питомі витрати умовного палива.* Питомі витрати умовного палива на відпущену ЕЕ, за максимального значення потужності на кривій графіка вихідних нормативних питомих витрат умовного палива відповідного блоку, визначаються за такою формулою, г/кВт·год:

$$b_{p\delta 4} = b_{p\delta 4}^{6n} \times K_{ct}^{\phi},$$

де $b_{p\delta 4}^{6n}$ – вихідні нормативні питомі витрати умовного палива на відпущену ЕЕ, що визначаються за кривою графіка вихідних нормативних питомих витрат умовного палива відповідного блоку, затвердженого центральним органом виконавчої влади, що здійснює управління в електроенергетиці, г/кВт·год.; K_{ct}^{ϕ} – коефіцієнт приведення нормативних питомих витрат умовного палива на відповідному блоці до фактичних середньозважених питомих витрат умовного палива на електростанції.

Коефіцієнт приведення нормативних питомих витрат умовного палива на відповідному блоці до фактичних середньозважених питомих витрат умовного палива на електростанції розраховується за формулою:

$$K_{ct}^{\phi} = \frac{b_{ct}^{\phi}}{b_{ct}^{\phi}},$$

де b_{ct}^{ϕ} – середньозважені питомі витрати умовного палива станції, розраховані на основі нормативних питомих витрат умовного палива на відпущену ЕЕ, її блоки, г/кВт·год; b_{ct}^{ϕ} – фактичні питомі витрати умовного палива станції, г/кВт·год.

III. Формування обсягу ЕЕ в пропозиціях ТЕС.

Обсяг виробленої ЕЕ у пропозиціях ТЕС, для відповідного блоку, розраховується за формулою, МВт·год:

$$E_n^{TEC} = \frac{(K \times P_{\delta \max}^{TEC} - P_{\delta \min}^{TEC})}{2} + P_{\delta \min}^{TEC},$$

де $P_{\delta \max}^{TEC}$ – максимальна потужність блоку, МВт; $P_{\delta \min}^{TEC}$ – мінімальна потужність блоку, МВт; K – коефіцієнт корисного відпуску.

4.3.2. Аналіз результатів обчислювальних експериментів

1. *Розрахунок погодинних маржинальних цін купівлі-продажу ЕЕ.* Під час виконання попередніх розрахунків за допомогою моделі отримано погодинні маржинальні ціни купівлі-продажу ЕЕ на РДН, які використано для моделювання середньозваженої ціни РДН та її порівняння з прогнозованою ринковою ціною на 2 півріччя 2019 року, яка була затверджена НКРЕКП постановою №1906 від 14.12.2018 року, з використанням розробленої комп'ютерної моделі.

При цьому, порівняння буде здійснюватися із урахуванням попередньо розрахованої величини відхилення добової ціни та відхилення фактичної середньозваженої маржинальної ціни купівлі-продажу ЕЕ на РДН та встановленою прогнозованою ринковою ціною на 2 півріччя 2019 року.

2. *Дослідження адекватності алгоритмічної моделі.* Задля підтвердження адекватності було проведено порівняльний аналіз цін на ЕЕ, вироблену на ТЕС, які склалися на ОРЕ, та цін, отриманих за результатами

розрахунків за алгоритмічною моделлю ціноутворення на ринку ЕЕ. Метою проведення цього порівняльного аналізу є визначення похибки в розрахунку ціни на ЕЕ за алгоритмічною моделлю ціноутворення на сегменті ринку РДН, порівняно з ціною, яка склалася на попередній моделі ОРЕ. Результатом визначення похибки є оцінювання ступеня адекватності вибору складу генеруючого обладнання ТЕС для покриття графіка навантаження, отриманого за результатами розрахунків у моделі. При цьому, маржинальною ціною купівлі-продажу ЕЕ на РДН може вважати розраховані ціни для ТЕС.

Для здійснення порівняльного аналізу цін на ЕЕ, вироблену на ТЕС, ціни, отримані в результаті розрахунків із використанням моделі, порівнювалися з граничними цінами системи, що склалися на діючому ОРЕ в обраному періоді. Для представлення результатів порівняльного аналізу взято результати розрахунків для 22 грудня 2016 року, як найбільш репрезентативний день роботи ОЕС України в період з 01.10.2016 по 31.12.2016 [60, 78]. Порівняльний аналіз здійснювався для кожної години обраної доби.

Для здійснення порівняльного аналізу фактичних цін на ЕЕ на РДН та встановленої прогнозованої прогнозованою ринковою ціною на 2 півріччя 2019 року, бралися середньозважені фактичні ціни на ЕЕ на РДН за період з липня по грудень 2019 року.

Перелік спільних вихідних даних для обох моделей, а саме: обсяг попиту; графіки покриття АЕС, теплоелектроцентралей (ТЕЦ), гідроелектростанцій (ГЕС), ГУ з використанням ВДЕ; ціни та калорійність палива (вугілля, газ, мазут); рафік ремонтів блоків ТЕС.

Перелік вихідних даних, які не були приведені в моделі, відповідно до вихідних даних, які використовувалися в ОРЕ, а саме: номери блоків ТЕС, які мають бути в роботі за вимогою системних обмежень (у моделі встановлювалась обов'язкова робота блоків на розсуд її розробників за

принципом економічної обґрунтованості); питомі витрати умовного палива на відпущену ЕЕ; резерви потужності.

3. *Аналіз похибки результату розрахунків.* Для проведення аналізу похибки розрахунку цін ЕЕ, виробленої на ТЕС, порівнювалися погодинні та середньозважені добові ціни. Встановлено, що для визначення похибки в розрахунку цін на ЕЕ, вироблену на ТЕС, більш коректним є порівняння середньозважених добових цін. На прикладі 22 грудня 2016 року середньозважена добова ціна на ЕЕ ТЕС, що увійшли до графіку навантаження ОРЕ, склала 1110 грн./МВт·год. Середньозважена добова ціна на ЕЕ, вироблену на ТЕС, що увійшли до графіку навантаження, отриманого в результаті розрахунку, склала 1034 грн./МВт·год. Відхилення середньозваженої добової ціни становило 6,8 %.

На рис 4.3 представлено результат порівняння прогнозованої цін для попередньої моделі ОРЕ та нової моделі лібералізованого ринку електричної енергії.

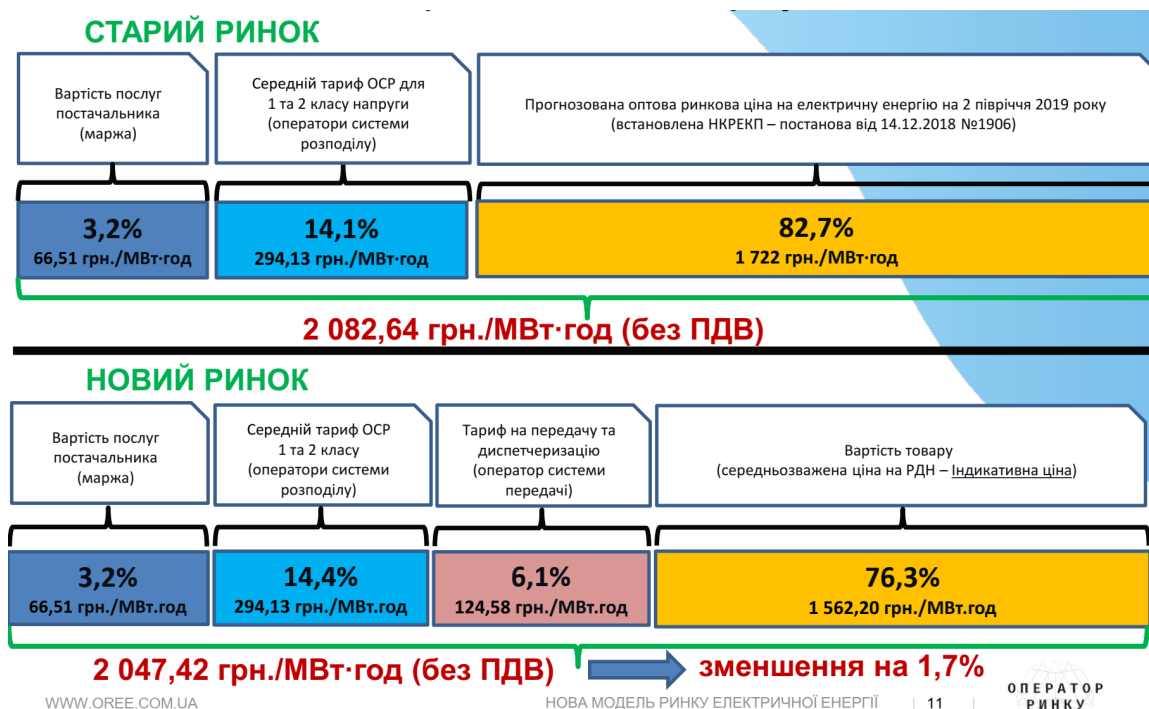


Рисунок 4.3. Результат розрахунку цін в попередній моделі ОРЕ та новій моделі ринку електричної енергії

Як видно із рис.4.3., відхилення від прогнозованої ринкової ціни на ЕЕ на 2 півріччя 2019 року та фактичної середньозваженої ціни на РДН складає близько 9 % , що майже відповідає попереднім розрахункам, які виконані, ще у 2017 році під час розробки імітаційної моделі [60, 78, 112], яка була розвинута та реалізована у вигляді комп'ютерної програми. Зважаючи на рівень отриманого за розрахунками відхилень, можемо зробити висновок, що похибка в розрахунках цін на ЕЕ, вироблену на ТЕС (як «ціноутворюючих учасників ринку»), в алгоритмічній моделі не перевищує 10%, що є прийнятним для визначення ступеня її адекватності.

Отже, такий результат порівняльного аналізу дає змогу зробити висновок про адекватність алгоритмічної моделі процесу формування цін на ЕЕ та визначення її обсягів для підготовки заявок для блоків ТЕС.

4.4. Висновки до розділу 4

1. Побудовано математичну модель оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку - РДН, задля визначення рівноважної ціни ЕЕ на підставі цінових заявок виробників та постачальників ЕЕ як змішаної нелінійної задачі, що містить два типи невідомих змінних для відображення ринкових рішень щодо акцепту заявок на купівлю та продаж ЕЕ як ціло числових змінних та визначення рівноважних цін для кожного розрахункового періоду часу як дійсних змінних.

2. Розроблено обчислювальний алгоритм та програму його реалізації задля розв'язання оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку - РДН. Характерною рисою та основою побудови алгоритму є принципова можливість розгляду сформульованої оптимізаційної задачі в параметричному вигляді, де в значенні параметрів виступають рівноважні ціни на ринку. При такому розгляді оптимізаційної задачі її можна представити як задачу змішаного цілочисельного лінійного програмування,

невідомими змінними якої є відповідні рішення щодо акцепту заявок на купівлю-продаж електроенергії.

3. Програмну реалізацію обчислювального алгоритму задачі моделювання рівноважного стану сегмента ринку - РДН здійснено в програмному середовищі IBM ILOG® CPLEX® Optimization Studio за допомогою мови OPL для отримання інформації щодо продуктивності й адекватності пропонованого алгоритму. У процесі виконання тестового порівняльного завдання було встановлено: результати розрахунку цін, отримані за допомогою запропонованого алгоритму, практично не відрізняються від результатів, отриманих за допомогою чинної моделі ОР, що є підтвердженням адекватності процесу ціноутворення на аукціоні; витрати часу на отримання розв'язків задач зі змішаного цілочисельного лінійного програмування були істотно меншими, вони не перевищували 0.03 с., що свідчить про високу швидкість отримання розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі.

4. Підтверджено розроблену алгоритмічну модель процесу підготовки пропозицій ГК ТЕС на підставі розрахунку ціни та обсягів у пропозиціях ТЕС на аукціон сегмента ринку РДН. Здійснено порівняльні розрахунково-експериментальні дослідження результатів моделі з цінами, що склалися на попередній моделі ОРЕ та фактичних даних існуючої нової моделі ринку. Відхилення середньозваженої добової ціни становить 6,8%, а відхилення середньозважених цін на РДН за 2 півріччя 2019 року становить близько 9%, що відповідає попереднім розрахункам, які виконані, ще у 2017 році та підтверджує адекватність алгоритмічної моделі процесу формування цін на ЕЕ та визначення її обсягів із метою підготовки заявок для блоків ТЕС.

РОЗДІЛ 5

ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЦІНОУТВОРЕННЯ

У цьому розділі розглянуто теоретичні та прикладні засади розроблення сучасних засобів інформаційно-технологічного забезпечення КСМ в електроенергетиці у вигляді інтерактивних адаптивних об'єктно та функціонально орієнтованих систем підтримки прийняття рішень (СППР) для розв'язання задач із планування розвитку генеруючих потужностей на ринку ЕЕ, зокрема запропоновано підхід щодо розв'язання задачі з побудови КСМ процесів ціноутворення з розвиненими засобами об'єктно орієнтованого моделювання (ООМ) процесів функціонування суб'єктів СОТС ціноутворення шляхом формування єдиного інформаційно-технологічного забезпечення щодо організації уніфікованого моделюючого середовища користувача – енергетичних компаній як суб'єктів ринку ЕЕ.

Основною метою пропонованого підходу є підвищення інформаційної забезпеченості роботи користувачів-фахівців, суб'єктів СОТС ціноутворення, за рахунок прискорення процесів прийняття організаційних рішень, автоматизації формування інтерфейсів взаємодії користувача з інтегрованими інформаційно-методичними ресурсами – базою даних, базою моделей, базою знань, створення єдиного (уніфікованого) моделюючого середовища [60].

Досягнення сформульованої мети визначає такі напрями робіт із побудови КСМ і застосування її в значенні базового компонента СППР для організаційного управління процесом ціноутворення на ринку ЕЕ:

- побудова організаційної моделі інформаційно-технологічного забезпечення СППР;

- формування концептуального представлення організаційної структури адаптивної предметно-незалежної СППР;
- об'єктне моделювання даних предметної області з метою формування єдиної (уніфікованої) структури бази даних суб'єктів організаційного управління;
- функціональне моделювання технологічних процесів оброблення й подання даних із метою уніфікації (стандартизації) програмного інтерфейсу системи через типізацію операцій взаємодії користувача з об'єктами предметної області в програмному забезпеченні системи;
- розроблення протоколів (інтерфейсів) інформаційного обміну даними з моделями різного призначення, які підключаються до бази даних суб'єктів організаційного управління ціноутворенням.

5.1. Комп'ютерні системи моделювання процесів прийняття рішень системою ціноутворення ринку електричної енергії

Відомо, що КСМ призначені для забезпечення можливості оперативно оцінювати характер функціонування процесу на основі враховування впливу зовнішніх факторів. Останні досягнення в цій галузі суттєво розширили можливості моделюючих систем. Вони передусім пов'язані з підвищенням швидкості та точності аналізу показників функціонування суб'єктів досліджуваного процесу більш ефективними засобами управління процесом моделювання, можливостями демонструвати динаміку змін показників функціонування процесів моделювання різноманітними (адаптивними) засобами інтерпретації результатів моделювання, візуалізації вхідних та вихідних даних.

Основною метою побудови КСМ для вирішення завдань із підтримки прийняття рішень є істотне підвищення продуктивності організаційного управління, яка визначається:

1. ефективністю – у результаті скорочення чисельності обслуговувального персоналу суб'єктів СОТС ціноутворення;
2. оперативністю – внаслідок скорочення часу оброблення й подання великих обсягів інформації;
3. обґрунтованістю прийнятих рішень – у результаті забезпечення можливості проведення багатоваріантного аналізу запропонованих змін до механізмів (правил) функціонування СОТС для досягнення поставлених цілей управління й оцінювання наслідків прийнятих рішень [98].

Природно припустити, що побудова системи, яка фактично призначена для реалізації базової функцій – багатоваріантного аналізу, інтерактивної адаптивної СППР, можлива лише за допомогою КСМ, що забезпечує можливість проєктування й застосування імітаційних комп'ютерних моделей процесів функціонування СОТС ціноутворення. Така система має містити:

- засоби формального математичного опису складних суб'єктів СОТС і процесів їх організаційної взаємодії між собою та із зовнішнім середовищем;
- єдиний інформаційний простір, що об'єднує засоби об'єктно орієнтованого концептуального та інформаційного моделювання процесів взаємодії складних суб'єктів СОТС між собою та із зовнішнім середовищем;
- уніфіковану систему класифікаторів і довідників, структуру зберігання даних, єдину систему протоколів і інтерфейсів;
- уніфіковані засоби застосування комп'ютерних моделей.

5.1.1. Організаційна модель інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень

В основі адаптивної організаційної схеми побудови об'єктно-орієнтованої СППР мають бути типові риси, за допомогою яких можна відрізнити один об'єкт даних від іншого. Доцільність такого аналізу й

виділення класів об'єктів предметної області (ПрО) під час розроблення моделей зовнішнього (що відображає інтерфейс програмного забезпечення системи) і концептуального (відображає уявлення даних функціональних задач програмного забезпечення системи) рівнів організаційної схеми обумовлена тим, що для різних функціональних задач програмного забезпечення часто використовуються однакові операції візуалізації і перетворення над інформаційними масивами даних. Крім того, функції та процеси оброблення даних під час поетапного впровадження підсистем інтегрованої системи швидко модифікуються, відтворюючи змінні вимоги користувачів до предметної області.

Усе це вимагає такої організації структури системи, за якої об'єкти ПрО та взаємозв'язки між ними були б визначені незалежно від реалізації конкретних функціональних завдань з оброблення даних у процедурах і інтерфейсах програмного забезпечення і складали єдину структуру. У результаті об'єктом проєктування й опису в організаційній моделі системи мають виступати не лише структури даних ПрО, а й самі процедури реалізації функціональних задач. Уведення додаткового проміжного логічного підрівня подання процедурної та інтерфейсної частин програмного забезпечення на стику рівнів концептуальної і зовнішньої моделі ПрО забезпечить необхідну незалежність, тобто адаптивність СППР до можливих змін та розширень зовнішньої і концептуальної моделі даних (рис. 5.1) [99].

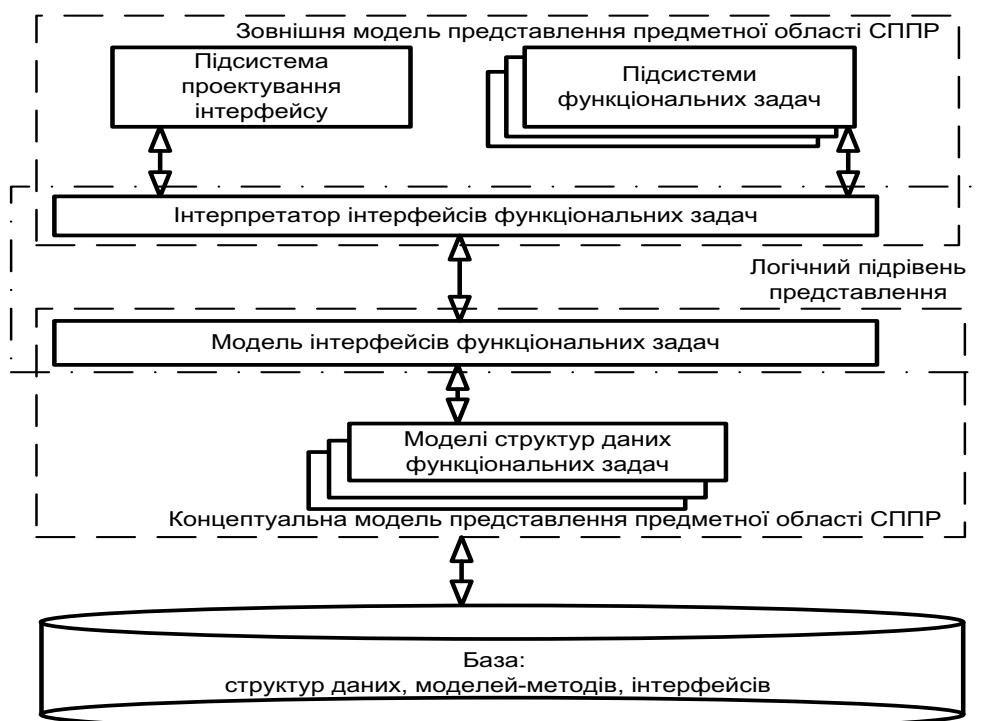


Рисунок 5.1. Схема організаційної моделі побудови СППР

Очевидно, що до функціональності сучасних інформаційних систем необхідно висувати вимоги, які передбачають відкритість структури системи, наявність гнучкого інтерфейсу (механізму) для введення нових об'єктів і алгоритмів вирішення прикладних завдань і можливості адаптації до змін, як у структурі, так і в значеннях параметрів об'єктів ПрО. Отже, інформаційна частина, тобто база даних, і технологічна частина, тобто програмне забезпечення, мають складатися з функціональної складової, яка відображає особливості і процеси ПрО, і інформаційної складової, яка відображає уніфіковані способи взаємодії з об'єктами ПрО.

5.1.2. Концептуальна модель інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень

Особливість пропонованого концептуального підходу до створення інформаційно-технологічного забезпечення побудови й реалізації функцій адаптивної СППР полягає в уніфікації і формалізації компонентів DDM-парадигми (Data-Dialog-Model) [100, 101] як проблемно-незалежних компонентів концептуальної моделі СППР в організаційному управлінні:

1. компонент Data - блок об'єктноорієнтованого моделювання суб'єктів, що беруть участь у структуроутворювальних зв'язках організаційного управління для визначення показників (параметрів) функціонування ПрО енергоринку;

2. компонент Dialog - адаптивна модель взаємодії (інтерфейсу) і представлення даних користувачеві, що репрезентує спосіб динамічного зв'язування, який організовується у вигляді власної моделі шляхом створення словника відображень структур і атрибутів даних функціональних завдань ПрО енергоринку на операції візуалізації даних;

3. компонент Model - засоби генерації моделей у СППР, які реалізують функції проблемного аналізу і представляються як уніфіковані методи – моделюючі алгоритми, що визначають правила утворення і зміни значень показників функціонування ПрО енергоринку, що реалізують основні етапи роботи з даними в СППР.

У роботах [99, 102] запропоноване вдосконалення DDM-парадигми, яке реалізоване через введення до структури СППР організаційного управління суб'єктами СОТС таких проблемно-незалежних компонентів подання процесів функціонування ПрО енергоринку (рис. 5.2):

- моделі суб'єктів, що беруть участь у структуроутворювальних зв'язках організаційного управління для визначення правила функціонування СОТС;
- моделі показників (параметрів) функціонування СОТС;
- моделюючі алгоритми (моделі різного призначення), що визначають правила утворення і зміни значень показників функціонування СОТС;
- модель інтерфейсів користувача для представлення даних процесів функціонування СОТС;
- менеджери даних, інтерфейсів, моделей.

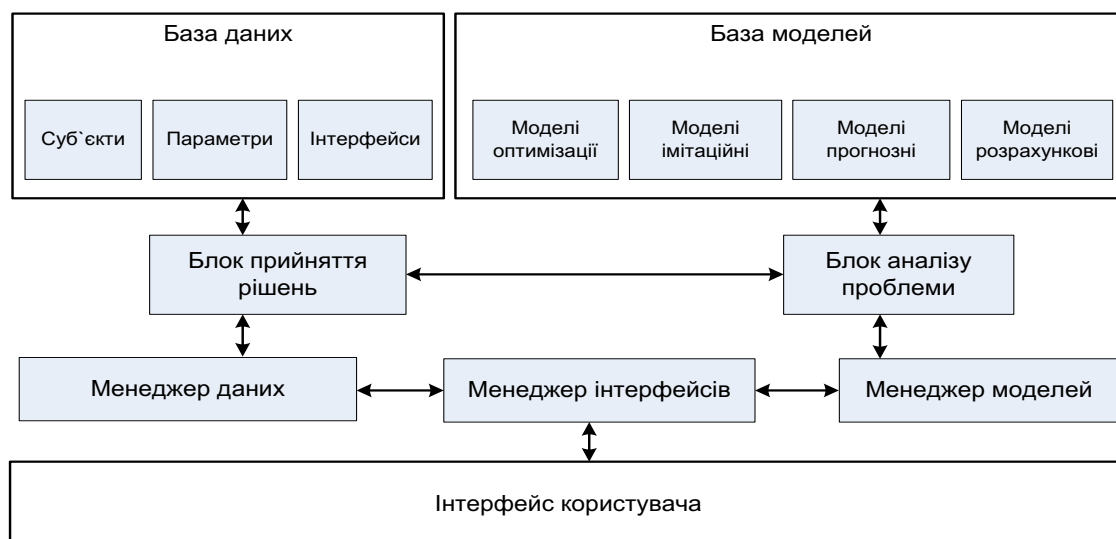


Рисунок 5.2. Концептуальна модель побудови СППР

Важливим компонентом концептуальної моделі СППР є менеджер даних, що забезпечує доступ інтерфейсу користувача до структур даних ПрО з можливістю подальшого моніторингу та оцінювання показників функціонування СОТС енергоринку. Тому під час використання об'єктно-орієнтованого підходу до створення адаптивної СППР передбачене проведення об'єктного аналізу ПрО, а потім, на його основі, реалізація етапу об'єктноорієнтованого моделювання ПрО СОТС. Суть такого аналізу полягає в ототожненні сутностей – суб'єктів і процесів ПрО СОТС у вигляді сукупності інформаційних об'єктів, що взаємодіють один з одним на основі принципів ООМ та розроблення на їхній основі єдиної специфікації ПрО функціонування СОТС.

5.2. Інформаційне забезпечення адаптивної системи підтримки прийняття рішень

5.2.1. Аналіз подання процесів функціонування складної організаційно-технічної системи

Однією з головних умов створення адаптивних інформаційних систем є уніфікація даних. Розроблення єдиної системи уніфікації – це складне і

трудомістке завдання, для розв'язання якого доцільно використовувати міжнародний досвід і стандарти. Основою для побудови єдиної системи класифікації і єдиного інформаційного простору даних має стати узагальнена інформаційна модель, яка відповідно до стандартів ІЕС [103, 104] описує всю множину типових фізичних суб'єктів СОТС на основі принципів ООМ.

Дотримуючись принципів ООМ, у такій узагальненій інформаційній моделі можемо підтримувати опис фізичних суб'єктів СОТС на всіх рівнях організаційного управління, що дає змогу одночасно представляти в інформаційному забезпеченні системи їхні властивості та зв'язки, створюючи можливість для застосовування єдиної системи класифікаторів, довідників та уніфікування системи доступу до даних.

Основними поняттями ООМ є інформаційні об'єкти, класи, властивості, події, методи, а принципами – інкапсуляція, успадкування й поліморфізм [105, 106]. Об'єктна модель передбачає опис структури об'єктів, що формують систему *Object* := <*Attributes, Condition, Behaviour*> з атрибутів *Attributes*, поточного стану *Condition*, операцій поведінки *Behaviour*. В об'єктній моделі мають бути відображені ті поняття й суб'єкти реального світу ПрО, які важливі для розроблюваної інформаційної системи. Створювані класи об'єктів упорядковуються в ієрархічну структуру, побудовану на відношеннях підпорядкування, які ґрунтуються на принципах інкапсуляції, успадкування й поліморфізму.

Суб'єкти організаційного управління в СОТС є об'єктами ПрО, що подаються засобами ООМ із усіма його принципами. У результаті інформаційна модель процесів функціонування СОТС має використовувати принципи подання метаданих як засобу відтворення понять ООМ, до яких віднесені об'єкти, атрибути, події, методи.

У результаті модель ПрО СОТС, що побудована за принципами ООМ із застосування метаданих, буде відповідати сучасним вимогам до функціональності інформаційних систем, які обумовлюють:

- відкритість структури системи;
- гнучкий інтерфейс для введення нових параметрів, суб'єктів і алгоритмів оброблення даних предметної області;
- можливість адаптації до змін як у структурі, так і в значеннях параметрів суб'єктів і алгоритмів предметної області.

Для створення адаптивної СППР на етапі аналізу даних про ПрО, тобто про суб'єкти СОТС, проводять виділення типових компонентів і функцій із визначенням їх у множині понять ООМ та розробленням на їх основі єдиної специфікації ПрО функціонування СОТС [98, 99].

Предметна область - це сукупність інформаційних елементів-сутностей, які характеризують діяльність суб'єктів організаційного управління в СОТС, їхній склад і структуру, і дають змогу описувати необхідні функціональні завдання, які вирішуються в системі для досягнення цілей управління. Предметна область SA визначається складом суб'єктів СОТС і сценаріїв їх функціонування:

$$SA = (S, f^S, SC),$$

де S - суб'єкти СОТС; f^S - структура суб'єктів; SC - сценарії функціонування суб'єктів.

Суб'єкт – це сутність, зокрема об'єкт або група (сукупність) об'єктів, що має важливе функціональне призначення в цій ПрО. До суб'єктів віднесені організаційні структури, що залучені до діяльності в межах ПрО. У загальному випадку суб'єкт може бути представлений ієрархічною структурою в складі територіально віддалених один від одного, функціонально підпорядкованих один одному або розділених залежно від функцій управління суб'єктів діяльності. Тому суб'єкт характеризується індивідуальністю, станом, структурою і певною поведінкою.

Індивідуальність - це властивість суб'єкта, що дає змогу відрізнити його від інших суб'єктів у ПрО. Індивідуальність зіставлена з певним переліком значень якісних характеристик – статичних у часі (технічних, фізичних) властивостей суб'єкта.

Стан суб'єкта визначається вектором поточних значень кількісних характеристик - детермінованих і недетермінованих параметрів його функціонування. Відповідно, кожен суб'єкт як організаційна структура однозначно характеризується сукупністю статичних властивостей і динамічних параметрів функціонування, змінюваних у часі:

$$S = (C, P), S \subseteq ST \times C, P \subseteq PT \times S,$$

де C - статична властивість, яка ідентифікує суб'єкт у його класі (типі суб'єкта) ST ; P - динамічний параметр, який належить до одного з установлених у ПрО класів (типів параметрів) PT і характеризує компонент вектора поточного стану суб'єкта S .

Суб'єкт для забезпечення своєї діяльності в межах ПрО пов'язаний з іншими суб'єктами різноманітними відношеннями, у результаті дії яких формується семантична мережа (структура) суб'єктів у певній області:

$$f^S : S \times S \rightarrow LT,$$

де LT - множина класів відношень (типів зв'язків), що встановлюються між суб'єктами в межах ПрО.

Зв'язок – це відношення, яке встановлюється між суб'єктами в ПрО, що має власну властивість. У результаті, семантична мережа суб'єктів у ПрО утворюється із сукупності підмереж суб'єктів, виділених за певними властивостями їхніх відносин і встановлених у ПрО. Наприклад, в електроенергетичній системі як різновиди СОТС будуть утворені групи ГК або енергетичних компаній постачальників ЕЕ з урахуванням наявності функціональних зв'язків між суб'єктами - генкомпаніями (теплової енергетики, гідроенергетики та ін.) або енергокомпаніями. Генкомпанію буде пов'язано структурними зв'язками із вхідними до її складу юридично

підпорядкованими електростанціями та їхніми блоками, а енергокомпанія - оптовий постачальник ЕЕ, природно, буде пов'язана територіальними зв'язками з підприємствами – оптовими споживачами й роздрібними постачальниками ЕЕ.

Поведінка суб'єкта – це змінна в часі послідовність векторів його власного стану за встановлений (розрахунковий) період діяльності. Діяльність у ПрО регламентується технологічними процесами, реалізованими суб'єктами в межах цієї області. Ці процеси ідентифікуються нормативними документами і представляються у вигляді алгоритмів, які формують значення параметрів функціонування суб'єктів для досягнення цілей управління СОТС загалом. Конкретний суб'єкт може брати участь у декількох незалежних процесах відповідно до його цільового спрямування, тобто може мати кілька алгоритмів-процедур розрахунку, результати яких можуть бути використані в алгоритмах розрахунку параметрів інших суб'єктів. Після завершення всіх регламентованих розрахунково-технологічних операцій відбувається зміна стану ПрО в цілому. Порядок зміни значень параметрів суб'єктів визначається сценарієм функціонування в ПрО.

Сценарій - це задана послідовність взаємопов'язаних розрахунково-технологічних операцій, які призводять до зміни наявних або утворення нових значень параметрів функціонування суб'єктів у ПрО на встановлений інтервал часу D :

$$SC = (O, f^O, V, M, f^V),$$

де O – розрахунково-технологічні операції, групи операцій; $f^O : O \times O \rightarrow \{0,1\}$ – схема проведення розрахунку операцій; $V \subseteq P \times D$ – показники обчислення параметрів суб'єкта; $M = (R_i | i = 1, n)$ – алгоритми (правила) реалізації розрахунково-технологічних операцій; $f^V : O \rightarrow V \times M$ – цільове призначення проведення розрахунково-технологічних операцій.

Показник обчислення - це сутність, що задає тип результату, отриманого внаслідок виконання операції відповідно до правил сценарію.

Тип результату показника обчислення $V = (D, PT, ST)$ задається встановленим інтервалом часу D , на якому визначається результат, типом параметра PT та типом суб'єкта ST . Кожне обчислення реалізується на основі правила продукції, яке призводить до утворення необхідного результату для заданого показника діяльності суб'єкта на встановлений інтервал часу за допомогою формул (методів) розрахунку. У підсумку результатом виконання сценарію буде розрахунок із чітко заданими вихідними значеннями параметрів і чітко визначеними типами результатів для заданого моменту або періоду часу для всієї сукупності суб'єктів у ПрО.

Правило - це набір (система) продукцій, що складається з тверджень, послідовно оброблюваних із метою обчислення значення показника і присвоєння результату заданому показником параметру. Фактично в інформаційній моделі поняття «правило» ототожнюється з алгоритмом обчислення параметра, визначеного в схемі розрахунку.

Твердження - це вираження продукції в такому вигляді:

$$R_i = \langle i; V; Q; A \Rightarrow B; Z \rangle,$$

де i – найменування (номер) твердження; V – характеристика застосування твердження (показник обчислення параметра); Q – умова застосування (установлений інтервал часу – дискретність параметра); $A \Rightarrow B$ – ядро продукції у вигляді конструкції «ЯКЩО A ТО B »; Z – результат продукції. Це означає, що якщо виконана умова Q і елемент A правильні, то виконується оператор B і для V встановлюється результат Z . Отже, твердження описується порядковим номером його входження в правило й оператором (алгоритмом) обчислення результату.

Операторами стають такі типи тверджень: логічні, присвоювання результату, перехід на наступне твердження. У твердженнях правила можуть бути використані такі види логічних операторів:

«ЯКЩО умова, ТО результат»,

«ЯКЩО умова, ТО результат₁, ІНАКШЕ результат₂»,

де під *результатом* розуміється оператор присвоювання параметра суб'єкта значення результату розрахунку або оператор переходу на задане за номером наступне твердження для обчислення результату, а під *умовою* використовуються оператори всіх типів порівняння операндів умови.

Якщо виконується умова логічного оператора, то реалізується перший результат, інакше здійснюється перехід на наступне правило або реалізується другий результат твердження.

Операндами в умові можуть бути показники обчислень, параметри суб'єктів і формули (методи) обчислення проміжних значень в умові перевірки, а також константи.

5.2.2. Інформаційна модель предметної області

Виділення такої сукупності інформаційних об'єктів, що володіють перерахованими характеристиками й мають певні налагоджені відносинами між собою, дає можливість побудувати об'єктну інформаційну модель певної ПрО і на цій основі в подальшому розробити уніфіковану систему класифікаторів і довідників, структуру зберігання даних, єдину систему протоколів і інтерфейсів, а також єдині засоби програмування для застосування комп'ютерних моделей функціонування технологічних процесів у СОТС [98, 99, 102]. Отже, специфікація ПрО адаптивної СППР може бути представлена у вигляді семантичної мережі класів інформаційної моделі (рис.5.3), що має декларативну і процедурну складові:

$$SP = (E, SN, f^{SN}),$$

де $E = E^{DECL} \cup E^{PROC} = \{e_i | e_i \in SA\}$, $E^{DECL} \cap E^{PROC} = \emptyset$ - множина сутностей ПрО, що визначають сукупність її інформаційних складових (класів); E^{DECL} - підмножина сутностей інформаційної частини моделі, яка визначає склад, зв'язки та атрибути об'єктів подання суб'єктів і параметрів процесів в ПрО; E^{PROC} - підмножина сутностей функціональної частини моделі, яка визначає структуру і взаємозв'язок об'єктів подання розрахунково-технологічних процесів функціонування суб'єктів в ПрО; $f^{SN} : E \times E \rightarrow SN$ - семантична мережа класів у специфікації ПрО, яка визначається на множині семантик (призначень)

$SN = \{"класифікація", "належність", "складання", "характеризування"\}$.



Рисунок 5.3. Семантична мережа класів специфікації ПрО

Об'єктний аналіз ПрО функціонування суб'єктів організаційного управління призводить до побудови компонентів словника цієї ПрО $E = \{e_i\}$ – класів інформаційних об'єктів: суб'єкт, властивість, стан, параметр,

показник обчислення, сценарій, правило, твердження, оператор, формула (метод), операнд, розрахунок, результат.

На підставі такої специфікації в семантичній мережі до суб'єктів відносять об'єкти організаційного управління, структуру і склад їхнього технологічного обладнання, юридичні особи та інші організаційні структури, над компонентами вектора стану яких проводяться розрахунково-технологічні операції (оптимізації, прогнозування). Кожен суб'єкт в описі має значення свого типу, перелік власних властивостей і перелік суб'єктів, з якими встановлені відносини. Функціональний стан суб'єкта визначається переліком параметрів - компонентів вектора стану, які відтворюють різні показники його діяльності. Кожен параметр в описі має значення свого типу, перелік власних властивостей і перелік суб'єктів, до яких він має відношення.

Моделюючі алгоритми розрахунково-технологічних операцій застосовуються для встановлення взаємозв'язків між різними параметрами суб'єктів. Алгоритми реалізуються за допомогою сценаріїв схем проведення розрахунків на підставі правил їх продукційного подання, показників обчислення значень параметрів суб'єктів, методів/функцій обчислення, продукційних тверджень, формул і їхніх операндів. Отже, інформаційна модель, формалізована у вигляді специфікації ПрО СППР, буде представлена як сукупність таких складових:

- моделі об'єктів, які беруть участь у структуроутворювальних зв'язках суб'єктів СОТС в ПрО;
- моделі параметрів, що визначають стан функціонування суб'єктів у ПрО;
- моделюючі алгоритми (алгоритми реалізації методів), що визначають правила утворення і зміни значень параметрів функціонування суб'єктів у ПрО;

- результати оптимізаційних, прогнозних розрахунків, які визначають перспективу діяльності суб'єктів у ПрО.

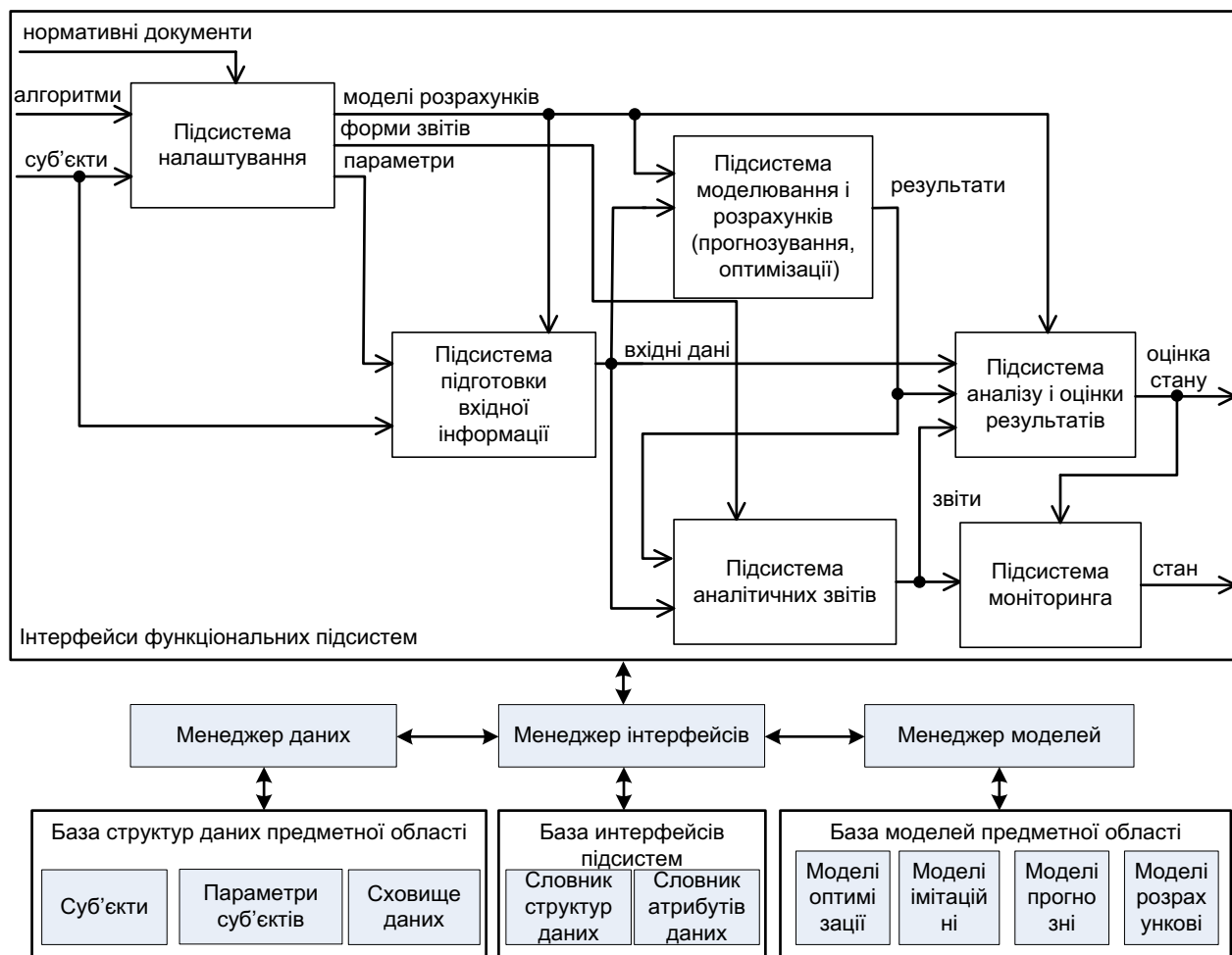
Отже, застосування ООМ до проєктування специфікації ПрО адаптивної СППР забезпечує низку переваг:

- опис системи у вигляді інформаційних об'єктів відповідає семантиці (змістовному змісту) суб'єктів у ПрО;
- поведінка суб'єктів у ПрО подається за допомогою об'єктів певного класу, що сприяє легкій зміні їхньої поведінки;
- об'єднання інформаційних об'єктів ПрО у мережу за допомогою визначених семантичних відношень дає змогу уніфікувати структуру зберігання даних і інтерфейси їхнього взаємозв'язку;
- забезпечення можливості паралельних обчислень станів суб'єктів, кожен із яких володіє власними властивостями й поведінкою.

5.2.3. Функціональна організація інформаційно-технологічного забезпечення

Функціональна організація – це структуроване подання функціональних завдань (функцій) СППР, потоків даних і сутностей інформаційної моделі, які пов'язують ці функції. Вона створюється методом декомпозиції від складних функцій до більш простих. Елементами кожного рівня декомпозиції є дії з перетворення інформаційних потоків із використанням заданих процесів функціонування ПрО СОТС під їхнім управлінням. Функціональну організацію утворюють підсистеми, які характеризуються вхідними та вихідними потоками даних, а також механізмами управління та реалізованими функціями оброблення даних [107].

Розглянемо функціональну організацію адаптивної об'єктноорієнтованої СППР (рис. 5.4).



Рисунк 5.4. Функціональна організація інформаційно-технологічного забезпечення

У цілому базовий програмний комплекс об'єктноорієнтованої СППР побудований на принципах декомпозиції і структурований із підсистем, що реалізують завдання, які відображають стадії з підготовки, аналізу й вироблення рішення у функціонуванні інформаційної моделі Про СОТС [107].

Отже, на верхньому рівні декомпозиції функцій СППР до її складу входять такі підсистеми: «налаштування», «підготовка вхідної інформації», «проведення розрахунків, оптимізації, прогнозування», «моніторинг», «формування звітів», «візуальний аналіз».

На наступних рівнях декомпозиції функціональні підсистеми деталізуються комплексом завдань, що розкривають функції СППР.

Підсистема «налаштування» забезпечує можливість адаптації й налаштування комп'ютерної моделі до змін механізмів функціонування СОТС, варіантів розрахунку параметрів технологічних процесів і компонентів управління.

У підсистемі розв'язуються такі завдання: ведення схем розрахунків; ведення показників обчислення параметрів розрахунків; формування алгоритмів правил обчислення параметрів; ведення формул обчислень.

Завдання «ведення схем розрахунків» призначене для створення структури процесу проведення розрахунків, опису її елементів, призначення алгоритмів і формул обчислення значень параметрів у розрахунках. Воно є основним у підсистемі під час внесення змін до алгоритмів проведення розрахунків усіх видів у СППР.

Завдання «ведення показників обчислення параметрів розрахунків» призначене для супроводу та контролю за створенням і використанням параметрів обчислень у схемах і правилах розрахунків.

Завдання «формування алгоритмів правил обчислення параметрів» призначене для супроводу та контролю за створенням правил обчислення параметрів схем розрахунків.

Завдання «ведення формул обчислень» призначене для супроводу та контролю за створенням формул обчислень, які використовуються у твердженнях правил розрахунків.

Підсистема «підготовка вхідної інформації» на основі нормативних документів і первинних даних здійснює формування інформаційних структур, необхідних для використання іншими підсистемами. Підсистема забезпечує внесення коригувань у поточні (оперативні) та ретроспективні вхідні дані, підготовку додаткових даних для їх подальшого використання в різних розрахунках.

У підсистемі розв'язуються такі завдання: ведення нормативних документів, формування нормативних параметрів, ведення технологічних параметрів системи, завантаження вхідних даних.

Ведення нормативних документів забезпечує супровід переліку джерел інформації, на підставі яких вносяться зміни до алгоритмів проведення розрахунків під час удосконалення механізмів функціонування СОТС та вводяться необхідні вхідні дані про суб'єкти системи.

Формування нормативних параметрів забезпечує виконання вимог до підготовки вихідних даних для виконання подальших розрахунків. Поточний стан нормативних параметрів забезпечується здійсненням дій, пов'язаних із веденням опису параметра та його нових значень.

Ведення технологічних параметрів системи забезпечує налаштування режимів її роботи до визначених вимог, які впливають на технологічні процеси проведення розрахунків.

Завантаження вхідних даних забезпечує виконання вимог щодо перевірки достатності, верифікації та підготовки в потрібній формі вхідних даних для проведення розрахунків. Виконання функцій завантаження здійснюється з джерел інформації, які можуть бути як внутрішніми, так і зовнішніми щодо структур даних СППР.

Підсистема «Проведення розрахунків, оптимізації, прогнозування» забезпечує можливість проведення розрахунків параметрів обчислень, що діють на розрахункову дату основних схем розрахунку, визначених у підсистемі «налаштування системи» та підготовлених для цього під час завантаження даних у підсистемі «підготовка вхідної інформації».

Технологічний процес проведення розрахунків здійснюється поетапно: підготовка до проведення розрахунку; формування та виконання плану проведення розрахунку; контроль за станом проведення розрахунку, аналіз змін масиву вхідних даних і результатів.

Кожна операція проведення розрахунку визначається такими атрибутами: дата проведення розрахунку; дата даних джерела інформації; версія розрахунку; варіант завантаження; час виконання; ознака про стан виконання; місце знаходження результатів.

Підготовка до проведення розрахунку передбачає реалізацію таких кроків: внесення необхідних коригувань у вхідні дані або виконання нового завантаження; аналіз стану виконання завантаження вхідних даних.

Надалі необхідно виконати вибір розрахункового завдання, провести сам розрахунок та остаточний аналіз як кінцевих результатів, так і стану завершення процесу розрахунку.

З метою визначення конкретного завдання та режиму проведення поточного варіанту розрахунку застосовується картка опису. У картці представлені атрибути варіанту розрахунку, версія, дата розрахунку та дата підготовки даних, повідомлення про результати та час виконання, ким була виконана сесія розрахунку, опис його варіанту, а також атрибути, які визначають план проведення та режими виконання розрахунку.

Ієрархічна структура схеми розрахунку дає змогу розподілити його на незалежні частини, які логічно відокремлені одна від одної. У зв'язку з цим, застосування поетапного режиму проведення розрахунку означає можливість проміжного контролю як поточних результатів розрахунків, так і даних про стан виконання окремих частин схеми реалізованого розрахунку.

Стан виконання розрахунку фіксується в спеціальному журналі, який має вигляд переліку повідомлень про ситуації, які виникають у процесі обчислення параметрів об'єктів.

У цьому журналі відтворюється така інформація: поточний номер повідомлення; час виникнення; параметр і об'єкт розрахунку; одиниця дискретності часу; текст повідомлення.

Підсистема «моніторинг» забезпечує за допомогою відповідних засобів підготовку основних інформативних показників оцінювання ефективності функціонування суб'єктів ПрО СОТС, формування рішень щодо оцінювання у вигляді зведених форм документів. Для цього в підсистемі передбачено розв'язання таких завдань: підготовка форм оцінювання інформативних показників; формування зведених форм документів.

Підсистема «формування звітів» призначена для формування в електронному та друкованому вигляді стандартних звітних форм документів про вхідні дані та результати розрахунків. Для реалізації цієї мети в підсистемі розв'язуються такі завдання: підготовка форм представлення інформації, формування вихідних звітних документів.

Технологічний процес підготовки форм документів здійснюється поетапно та передбачає: опис подання звітного документа; створення шаблону форми звітного документа; опис структури масиву даних документа; формування переліку полів (атрибутів) форми документа; формування переліку полів фільтра даних документа.

Підсистема «візуальний аналіз» передбачає проведення аналізу результатів розрахунків параметрів суб'єктів, що діють на розрахункову дату, основних схем розрахунків, які визначені в підсистемі «налаштування» і підготовлені під час завантаження даних у підсистемі «підготовка вхідної інформації».

Виходячи з аналізу особливостей механізмів організаційного управління енергоринком, констатуємо, що подальший розвиток підходу до побудови СППР стосовно стратегії поведінки учасників ринку на його сегментах та формування стратегії розвитку ринку ЕЕ в цілому має здійснюватися не тільки на основі переходу до об'єктноорієнтованої СППР, але й з урахуванням її ієрархічної структури та інтеграції складових до

єдиної інформаційної системи управління ціноутворенням для розв'язання проблемних ситуацій в організації управлінської діяльності суб'єктів ринку.

5.3. Організація інтерфейсу користувача

5.3.1. Класифікація операцій взаємодії з об'єктами предметної області

В організаційній структурі адаптивної об'єктноорієнтованої СППР програмне забезпечення утворюється з функціональних підсистем та програмного інтерпретатора інтерфейсів функціональних задач. А інформаційне забезпечення представляється у вигляді моделей концептуального уявлення суб'єктів ПрО і метаданих інтерфейсу взаємодії користувача з функціональними задачами [108, 109].

Організація технологічного процесу функціонування СППР забезпечує виконання функцій підготовки, проведення та оброблення даних результатів розрахунків складається з послідовного здійснення завдань для функціональних підсистем, призначення яких відповідає основним типовим операціям взаємодії кінцевого користувача з СППР. Такими типовими операціями є:

- внесення змін до алгоритми розрахунків;
- збір і підготовка вихідних даних;
- проведення обчислень показників функціонування організаційної системи; формування звітних даних із результатами розрахунків їх подання в наочній формі;
- проведення візуального аналізу даних і моніторингу результатів розрахунку.

Менеджер інтерфейсів, як сполучна ланка між менеджерами даних і моделей у концептуальній моделі побудови СППР, відіграє роль засобу уявлення та інтерпретації інформації, яка породжується з даних і моделей.

У результаті програмне забезпечення адаптивної об'єктноорієнтованої СППР має складатися з підсистем, орієнтованих на розв'язання функціональних задач у межах забезпечення інформаційних потреб користувача предметної області СОТС [108].

Кожна функціональна задача в цілому характеризується вхідними даними (потокотом даних), вихідними даними (потокотом результатів) і методами їх оброблення (інтерпретації та подання). Під методами оброблення варто розуміти інструментальні функції, які забезпечують різноманітні механізми маніпулювання вхідними даними функціональних завдань. До таких методів оброблення даних належать операції вибірки даних, фільтрації даних, внесення змін до елементів даних, видалення даних, агрегування даних для формування аналітичної звітної інформації або інших даних-результатів.

В основу адаптивної організаційної моделі менеджера інтерфейсів мають бути покладені типові риси, які дають змогу класифікувати й відображати відмінності об'єктів один від одного. Доцільність такого аналізу й виділення класів об'єктів ПрО під час розроблення інформаційної моделі обумовлена тим, що для різних функціональних задач часто використовуються однакові операції візуалізації і перетворення над інформаційними потоками даних. Крім того, функції та процеси оброблення даних під час поетапного впровадження СППР швидко модифікуються, відтворюючи змінні вимоги користувачів до ПрО. Усе це вимагає такої організації структури СППР, за якої об'єкти ПрО і взаємозв'язки між ними були б визначені незалежно від реалізації конкретних функціональних задач з оброблення даних у процедурах і інтерфейсах програмного забезпечення системи, і представляли собою єдину структуру.

Отже, можна говорити про таку концептуальну схему побудови СППР у вигляді трирівневої організаційної структури «функціональне середовище предметної області - функціональна задача - інструментальна функція

оброблення». У результаті прикладна частина системи буде структуруватися з підсистем, які виділяються не за проблемно орієнтованими ознаками, а за функціональними (об'єктними) ознаками, які орієнтовані на типові операції взаємодії з об'єктним предметним середовищем під час інтерпретації та подання даних.

5.3.2. Функціональні модулі інтерфейсів користувача

Застосування принципів вертикальної й горизонтальної декомпозиції дає змогу виділити під час побудови організаційної структури програмного забезпечення три рівні інтерфейсу взаємодії функціональних задач СППР[109]:

- рівень проблемноорієнтованого середовища користувача ПрО СOTS;
- рівень інструментальних засобів розв'язання функціональної задачі, обраної користувачем;
- рівень реалізації функції інструментального засобу функціональної задачі.

Перший рівень організовує роботу користувача під час розв'язання прикладної проблеми ПрО СOTS і пропонує обумовлені в концептуальній моделі сукупності функціональних задач. Цей рівень представлений у вигляді модуля «менеджер інтерфейсів», який відтворює доступну сукупність і послідовність застосування задач у вигляді ієрархічного меню або дерева підсистем.

Другий рівень відтворює процедуру реалізації визначеної на першому рівні функціональної задачі, тип якої встановлюється залежно від поданих у концептуальній моделі інформаційних зв'язків елементів структур даних ПрО в інтерфейсі реалізації функціональної задачі. Кожна функціональна задача може використовувати такі типові інформаційні зв'язки між значеннями елементів структур даних:

- прості відношення (списочного типу «один до одного»);
- структуровані відношення (ієрархічного типу «один до багатьох»);
- функціональні відношення (з'єднання декількох структур із утворенням нових елементів даних за допомогою агрегативних функцій).

Залежно від типу відношень між елементами структур даних, які утворюють у програмному забезпеченні системи функціональну задачу, використовуються такі модулі: для простих відношень модуль «Таблиця»; для структурованих відношень – модуль «Дерево»; для функціональних відношень – модулі «Звіт», «Картка».

Модуль «Таблиця» відтворює реляційні структури даних і передбачає інструментальні функції редагування, перевірки, підготовки, пошуку-фільтрування, видалення, друку даних. Модуль «Дерево» відтворює ієрархічні структури даних і передбачає виконання тих же функцій, що і модуль «Таблиця». Модуль «Звіт» спрямований на оброблення різних структур, які перебувають у простих або структурованих відношеннях між собою, із використанням агрегативних (аналітичних) функцій для формування нових узагальнених даних. До функцій цього модуля належать формування, перегляд та виведення даних.

Крім наведених модулів, які пов'язані з типами відношень між елементами структур даних, для забезпечення нормального функціонування інформаційної системи другий рівень також містить такі обслуговувальні модулі, до переліку яких віднесено модуль «Реєстрація» для ідентифікації користувача й визначення його права на доступ до функціональних задач і їхніх функцій.

Третій рівень забезпечує реалізацію типових функцій, які утворюють процедури оброблення елементів структур даних функціональної задачі.

У результаті, на основі представленої специфікації створено системну основу формування єдиного інформаційного і програмного середовища для побудови СППР у складі:

- єдиної системи класифікаторів і довідників;
- єдиної системи протоколів і інтерфейсів взаємодії користувача;
- уніфікованої структури зберігання даних,
- уніфікованої системи збирання даних реального часу і комерційного обліку виробничих показників суб'єктів ринку.

Розроблення й застосування такого програмного середовища надає єдиний програмний продукт розгортання і супроводу СППР, який знизить ризик, складність та витрати під час переходу до нових задач організаційного управління суб'єктами ринку ЕЕ.

5.4. База даних процесів ціноутворення ринку електричної енергії

5.4.1. Принципи побудови бази даних—процесів ціноутворення ринку

База даних процесів ціноутворення ринку ЕЕ [110] призначена для збору, накопичення та візуалізації інформації про процеси функціонування ринку ЕЕ. Застосовується для розв'язання комплексу розрахункових задач алгоритмічного моделювання функціонування учасників ринку ЕЕ, здійснення аналізу та прогнозування поведінки суб'єктів ринку та процесу ціноутворення на ньому.

Одним із найважливіших етапів роботи з проєктування й побудови бази даних є етап аналізу даних. Це пов'язане з тим, що під час реалізації інформаційних потреб особи, що приймає рішення, дані містять у собі інформацію про структуру предметного середовища й характер функціонування процесів, які підлягають автоматизації. У цьому випадку йдеться про автоматизацію процесів, пов'язаних із розв'язанням комплексу

розрахункових задач, які забезпечують у цілому розрахунки показників процесів функціонування ринку ЕЕ.

Виходячи з аналізу особливостей механізмів організаційного управління ринком ЕЕ, констатуємо, що подальший розвиток підходу до побудови КСМ процесів функціонування ринку має здійснюватися не тільки на основі переходу до об'єктноорієнтованої СППР, а й з урахуванням її ієрархічної структури та інтеграції складових до єдиної інформаційної системи управління для розв'язання проблемних ситуацій в організації управлінської діяльності суб'єктів СОТС ринку ЕЕ.

Отже, можна зробити висновок, що для автоматизації процесів організаційного управління на ринку ЕЕ варто розглядати СППР як об'єктно-орієнтовану ієрархічну інтегровану систему. У результаті істотну роль для розв'язання проблеми об'єктного моделювання даних Про організаційного управління набуває функціональне моделювання технологічних процесів оброблення даних із метою уніфікації програмного інтерфейсу єдиної інтегрованої системи через типізацію операцій взаємодії особи, що приймає рішення з об'єктами (структурами даних) Про СОТС.

Отже, як визначено у п.5.2, суб'єкти ринку ЕЕ стають об'єктами Про СОТС, що подаються засобами ООМ за усіма його принципами. У результаті суть такого підходу полягає в ототожненні сутностей – суб'єктів та процесів ринку ЕЕ як сукупності інформаційних об'єктів, що взаємодіють один з одним у Про СОТС, за принципами ООМ. У результаті база даних для відтворення такої моделі процесів функціонування ринку ЕЕ має використовувати принципи подання метаданих як засіб відтворення понять ООМ, до яких віднесені об'єкти, атрибути, події, методи.

У результаті БД предметної області СОТС, що побудована за принципами ООМ із застосування метаданих, буде відповідати сучасним вимогам до функціональності інформаційних систем, які обумовлять:

- відкритість структури системи;

- гнучкий інтерфейс для введення нових параметрів, об'єктів і алгоритмів оброблення прикладної області;
- можливість адаптації до змін як у структурі, так і в значеннях параметрів, об'єктів прикладної області.

5.4.2. Опис інформаційної логічної моделі бази даних

Однією з головних умов створення адаптивних інформаційних систем для застосування в різних СОТС, зокрема і в енергетиці, є уніфікація даних.

Основою для побудови єдиної системи класифікації та єдиного інформаційного простору даних є узагальнена інформаційна модель Міжнародної Електротехнічної Комісії (IEC) Common Information Model (CIM), яка однаковим способом описує всю множину типових фізичних суб'єктів електроенергетичної системи. Дотримуючись принципів ООМ, CIM підтримує опис фізичних суб'єктів на всіх рівнях організаційного управління, що дає змогу однаково описати елементи системи, їхні властивості та зв'язки, а також забезпечити можливості для створення єдиної системи класифікаторів, довідників і системи доступу.

Тому завданням побудови інформаційної логічної моделі (інфологічної моделі) бази даних Про СОТС є створення уніфікованого подання для відтворення об'єктів концептуальної моделі процесів функціонування ринку ЕЕ. У результаті всі вхідні та вихідні дані в інформаційній логічній моделі представляються у вигляді інформаційних блоків і поділяються на інформаційні сутності, пов'язані зв'язками-відношеннями функціональної взаємозалежності їхніх даних у середовищі Про СОТС процесів функціонування ринку ЕЕ.

База даних процесів функціонування ринку ЕЕ складається з таких інформаційних блоків сховищ даних [56]:

1) DATA – блок даних сховища оперативних, ретроспективних, статистичних, нормативних даних процесів функціонування ринку, що складається із даних про суб'єкти, параметри функціонування ринку;

2) ALG – блок даних сховища алгоритмів моделювання, прогнозування, оптимізації під час проведення обчислюваних розрахунків, що утворюють зміни у процесах функціонування ринку;

3) SIM – блок даних сховища результатів моделювання, прогнозування, оптимізації під час формування обчислюваних завдань щодо розрахунків змін у процесах функціонування ринку;

4) ADM – блок даних сховища описів інтерфейсів користувача для взаємодії із КСМ процесів функціонування ринку.

Поділ на блоки даних пов'язаний із складовими концептуального подання ПрО СОТС процесу функціонування ринку ЕЕ, тобто із призначенням даних до реалізації функціональних задач на ринку. Надалі всі сутності блоків даних фактично належать до двох типів – функціональних для подання елементів концептуальної моделі процесів функціонування ринку ЕЕ та обслуговуючих для класифікації цих елементів.

Блок даних сховища DATA призначений для опису станів суб'єктів, які є елементами (об'єктами) ПрО СОТС процесів функціонування ринку ЕЕ, відтворюваних у результатах проведення розрахунків.

Усі об'єкти логічно поділені на дві групи: об'єкти, призначені для опису станів суб'єктів технологічного процесу під час проведення розрахунків; об'єкти, призначені для опису параметрів, що відтворюють стани процесів у суб'єктах, які мають кількісне або якісне значення й можуть змінюватися у часі.

До об'єктів першої групи віднесено:

- суб'єкти ринку;
- джерела інформації;
- нормативні документи;
- устаткування, тощо.

До об'єктів другої групи віднесено:

- нормативні параметри;
- технологічні константи;
- розрахункові параметри процесів функціонування ринку тощо.

Блок даних сховища ALG призначений для опису будови розрахункових правил, за якими формуються значення параметрів суб'єктів у процесах функціонування ринку. Будова правил має таку ієрархію інформаційних об'єктів ПрО СОТС:

- схеми розрахунків;
- параметри обчислень у схемах;
- правила розрахунку параметрів обчислень;
- твердження правил (побудовані на реалізації умовного оператора);
- формули обчислень у твердженнях, складові (операнди) формул.

Блок даних сховища SIM призначений для опису дій, що виконує користувач за функціональними обов'язками під час проведення розрахункових операцій, а також для накопичення отриманих у результаті розрахунків даних для подальшого використання в процесі формування вихідних форм документів.

Блок даних сховища ADM призначений для зберігання метаданих про структуру й параметри інтерфейсів взаємодії користувача з базою даних під час проведення всіх операцій відповідно до функціонального призначення у КСМ.

Представлена у вигляді таблиці 5.1 базова інфологічна модель, її структура та склад елементів є вихідною інформацією для застосування під час створення структури бази даних та її формування, із подальшим розробленням моделюючих алгоритмів реалізації методик розрахунку показників та механізмів функціонування ринку ЕЕ.

Таблиця 5.1. Інфологічна модель бази даних процесів функціонування ринку ЕЕ

Блок даних	Сутність	Призначення	Тип сутності	Інформаційні зв'язки із сутностями
DATA	DATA_OBJECT	Суб'єкти ринку	функціональна	DATA_OBJECT
	DATA_LINK	Типи структур суб'єктів	класифікаційна	-
	DATA_OBJ_LINK	Структура суб'єктів	функціональна	DATA_OBJECT, DATA_LINK
	DATA_UNIT	Одиниці виміру даних	класифікаційна	-
	DATA_TIME	Одиниці дискрет часу	класифікаційна	-
	DATA_PARAMETER	Параметри даних	функціональна	DATA_PARAMETER, DATA_UNIT
	DATA_VALUE	Показники даних суб'єктів	функціональна	DATA_OBJECT, DATA_PARAMETER, DATA_UNIT, DATA_TIME
	DATA_STORE	Сховище оперативних, ретроспективних, статистичних, нормативних даних	функціональна	DATA_VALUE
ALG	ALG_CALC	Схеми алгоритмів розрахунків	функціональна	ALG_CALC, ALG_MODULE
	ALG_MODULE	Модулі методів розрахунку	функціональна	DATA_VALUE, ALG_FORMULA
	ALG_FORMULA	Розрахункові формули	функціональна	ALG_FORMULA, ALG_ACTION
	ALG_ACTION	Типи операндів	класифікаційна	-
SIM	SIM_VERSION	Версія результатів розрахунку	функціональна	ADM_USER
	SIM_RESULT	Показники результатів розрахунку	функціональна	SIM_VERSION, DATA_VALUE
	SIM_STORE	Сховище результатів	функціональна	SIM_RESULT
ADM	ADM_USER	Користувачі системи	функціональна	ADM_GROUP
	ADM_GROUP	Групи користувачів	класифікаційна	ADM_GROUP

Блок даних	Сутність	Призначення	Тип сутності	Інформаційні зв'язки із сутностями
	ADM_MODULE	Модулі інтерфейсу системи	класифікаційна	-
	ADM_ACCESS	Дозволи доступу	функціональна	ADM_GROUP, ADM_MODULE

Отже, використання методу OOM під час розроблення бази даних процесів ціноутворення ринку ЕЕ призвело до утворення:

- єдиної уніфікованої системи опису суб'єктів ринку ЕЕ, процесів прийняття рішень, єдиної системи класифікаторів та довідників даних про інформаційні об'єкти СОТС з уніфікованою структурою зберігання даних;

- уніфікованої системи збирання, перевірки достовірності, достатності, надмірності даних реального часу, що характеризують стан досліджуваного об'єкта, формування даних комерційного обліку параметрів функціонування ринку;

- процедури розроблення організаційної, концептуальної, інформаційної та функціональної складових частин комп'ютерних моделей, які забезпечують адекватне уявлення щодо процесів організаційного управління на основі реальних взаємин між суб'єктами ринку, аналізу, інтерпретації й візуалізації результатів моделювання.

У результаті створення й застосування бази даних можна забезпечити автоматизацію інформаційних процесів, пов'язаних із:

- організацією підготовки вхідних та формування вихідних даних про результати розрахунків із моделювання, прогнозування, оптимізації функціонування ринку ЕЕ;

- проведенням моделюючих розрахунків розрахунків для складових суб'єктів ринку;

- складанням звітності та організацією статистичного обліку;

- оперативним контролем за станом розвитку функціонування ринку на основі аналітичного оброблення даних.

5.5. Висновки до розділу 5

1. Визначено концептуальні засади побудови адаптивної СППР для вирішення завдань щодо планування розвитку генеруючих потужностей на ринку ЕЕ в складі бази даних, бази моделей, бази знань і модулів взаємодії з користувачем, яка може бути віднесена до класу інформаційних систем - спеціалізованих систем оперативного (короткострокового) прийняття рішень з управління.

2. Визначена уніфікована інформаційна модель предметної області СППР, яка визначає єдині підходи до подання суб'єктів ринку на всіх рівнях управління на основі виділення їхніх властивостей та зв'язків через створення єдиної системи класифікаторів, довідників для застосування в загальних моделях розрахунків параметрів заявок (цін, обсягів), алгоритмів оптимізації параметрів і їх прогнозування для вдосконалення концептуальної моделі технологічних процесів інформаційної взаємодії суб'єктів СОТС ціноутворення.

3. Запропоновано організаційну модель інформаційно-технологічного забезпечення КСМ як базового компонента СППР організаційного управління процесом ціноутворення на ринку ЕЕ, що забезпечує створення та функціонування всієї сукупності математичних моделей розрахунково-аналітичних завдань, логічно й інформаційно взаємопов'язаних між собою за цільовим призначенням, вхідними та вихідними даними.

4. Розроблено теоретичні засади створення сховища даних КСМ для функціонування ринку ЕЕ та процесів ціноутворення на ньому за принципами ООМ, яка забезпечує автоматизацію таких процесів, як-от: уніфіковане збирання, накопичення та візуалізація інформації про процеси функціонування ринку ЕЕ у зручній єдиній формі для різних його суб'єктів — виробників, постачальників, споживачів, підприємств системи передачі

ЕЕ та диспетчерського управління. Це надає можливість для здійснення порівняльного аналізу цін та тарифів; зберігання оперативних даних щодо широкого кола учасників ринку ЕЕ з урахуванням особливостей їхнього функціонування; актуалізації даних про процеси функціонування ринку ЕЕ та СОТС ціноутворення; проведення багатоваріантних моделюючих розрахунків на основі показників стану учасників ринку.

5. Розроблена базова інформаційна логічна модель ПрО СОТС процесів функціонування ринку ЕЕ, її структура та склад елементів, яка є вихідною інформацією при створенні бази даних та її формуванні з подальшою розробкою моделюючих алгоритмів реалізації методик розрахунку показників та механізмів ціноутворення на ринку ЕЕ. Особливістю розробленої інформаційної логічної моделі є застосування об'єктного підходу до моделювання сутностей ПрО об'єкта організаційного управління – СОТС ціноутворення, що дає змогу уніфікувати подання різних суб'єктів ринку ЕЕ, адаптувати до можливих змін у процесах його функціонування та уможливорює створення єдиних засобів взаємодії різних користувачів КСМ задля аналізу процесів лібералізованого ринку. Внаслідок такої особливості розроблювана СППР набуває рис не проблемно-орієнтованої, а функціонально-орієнтованої системи, що дозволяє застосовувати її при прийнятті організаційних управлінських рішень щодо функціонування ринку ЕЕ.

РОЗДІЛ 6

ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ

Для ефективної роботи на зазначених у попередніх розділах роботи сегментах ринку ЕЕ його активним учасникам – виробникам, постачальникам, споживачам – необхідний інструментарій у вигляді об'єктноорієнтованої КСМ, яку побудовано на базі сучасних програмно-апаратних та інформаційно-телекомунікаційних засобів, що забезпечують формування інформаційних ресурсів для розроблення та використання комп'ютерних моделей, призначених для розв'язання практичних завдань щодо підтримки прийняття рішень стосовно управління процесом ціноутворення. Застосування такої системи дасть можливість учасникам сегментів ринку здійснювати необхідні моделюючі розрахунки для аналізу динаміки зміни цін та обсягів, визначення ризиків та пошуку ефективних стратегій поведінки на цих сегментах.

У цьому розділі роботи розглянуто питання щодо побудови програмно-апаратного забезпечення КСМ процесу ціноутворення, що реалізована на платформі алгоритмічного моделювання для учасників ринку ЕЕ «**Equant Cloud**»[126], зокрема особливості її структурно-функціональної організації.

6.1 Передумови побудови комп'ютерної системи моделювання

Питання створення математичних моделей роботи існуючого ринку ЕЕ викликає широкий інтерес серед учасників ринку та в національного регулятора. Так, у наукових дослідженнях [84, 53, 113] описано моделі, які дають змогу не тільки визначати обсяги та ціни на відповідних сегментах ринку, але й враховувати особливості сполучення українського ринку з відповідними європейськими ринками. У науковій публікації [114] представлено моделі рівноважного стану електроенергетики в ринкових

умовах, що дає можливість враховувати не лише поведінку учасників ринку, але й технологічні й системні обмеження, у яких вони працюють. Відповідно, постає питання щодо створення відповідного програмного комп'ютерного інструментарію для застосування математичних моделей. Як визначено в роботі [66], практично всі відомі великі світові виробники програмних та програмно-апаратних платформ, зокрема SAP, ORACLE, IBM, Siemens [115-118] та інші, поставляють комплексні рішення та засоби для побудови комп'ютерних систем організаційного управління енергетичними ринками. Серед цих рішень найбільш відомими є NEMS, GEMS, GEMINI (США); PRIMES, PLEXOS, AURORA (ЄС); NEMSIM (Австралія) [119-121]. Розглянемо ці рішення.

Національна система моделювання енергетики (NEMS) – це економічна й енергетична модель енергетичних ринків США, створена Управлінням енергетичної інформації США (EIA). NEMS моделює виробництво, споживання, перетворення, імпорт, експорт і ціноутворення на енергію. Модель ґрунтується на припущеннях для економічних змінних, як-от: взаємодія на світовому енергетичному ринку, доступність ресурсів (яка впливає на витрати), технологічний вибір і характеристики, а також демографічні дані. Система складається з модулів, які взаємодіють у межах розрахунків рівноваги для довгострокових прогнозів. До складу NEMS входять модулі, які за функціональними ознаками та приналежністю до складових ринків можна поділити на такі групи:

- модулі постачання енергоресурсів (ринок нафти, ринок природного газу, ринок вугілля й поновлювані види палива);
- модулі виробництва енергії (ринок ЕЕ, ринок рідкого палива з нафтопереробних заводів);
- модулі споживання енергії (побутовий попит, комерційний попит, транспортний сектор і промисловий попит);
- модулі моделювання макроекономічної діяльності та міжнародної

енергетичної діяльності;

- інтеграційний модуль для забезпечення механізму досягнення загальної ринкової рівноваги між усіма модулями.

Розробники NEMS враховують особливості різноманітних джерел енергії, які використовуються для паливних цілей (генерації тепла та електроенергії) і добування сировини. Первинні джерела й носії енергії, узяті до уваги в NEMS, охоплюють сиру нафту й орендний конденсат, рідини для установок природного газу, сухий природний газ, вугілля, ядерну енергію (уран), звичайну гідроелектроенергію, біомасу, інші поновлювані джерела енергії та іншу первинну енергію. Енергоносії та сировина для кінцевого споживання, про які інформує NEMS, містять, з-поміж усього іншого, електрику, природний газ, вугілля, бензин, дизельне паливо, мазут, пропан, гас, зріджені нафтопереробні гази, реактивне паливо, поновлювані джерела енергії (передусім біомасу й вітер) і нафтохімічну сировину. Кожен із модулів NEMS передбачає використання своєї власної унікальної субнаціональної регіональної структури. Тому прогнози від NEMS стосуються як національного, так і регіонального рівня. Управління енергетичної інформації США EIA надає доступ до NEMS зовнішнім користувачам через свою програму архівування моделей. Архів містить вихідний код моделі і вхідні дані, які використовуються для отримання заданого варіанту прогнозу. Однак NEMS не використовується широко за межами EIA, оскільки для її розгортання потрібне додаткове комерційне програмне забезпечення, зокрема компілятори й пакети оптимізаційного моделювання, на додаток до вихідного коду та даних обраної моделі. Тому основним використанням NEMS є підготовка річного звіту Annual Energy Outlook, що публікується на вебсайті EIA. NEMS також використовується для спеціальних запитів, пов'язаних з аналізом сценаріїв та економічних й екологічних наслідків змін політики або структури в галузі енергетики. Отже, можна вважати, що NEMS побудовано за принципом створення

проблемно орієнтованої прикладної інформаційної системи.

PLEXOS Integrated Energy Model – це програмне забезпечення, розроблене для моделювання аналізу ринку енергії. Спочатку PLEXOS був розроблений як симулятор ринку ЕЕ. Потім його функціональність було розширено внаслідок об'єднання в останніх версіях ринків ЕЕ, газу, тепла й води.

PLEXOS – це високопродуктивна платформа моделювання, що оперативно використовується учасниками енергетичного ринку, проєктувальниками систем, інвесторами, регулювальними органами, консультантами та аналітиками по всьому світу. Моделювання PLEXOS ґрунтується на математичному програмуванні. Система підтримує різні горизонти планування від довгострокового до короткострокового, а також декілька різних часових кроків. Моделі PLEXOS можуть фіксувати особливості короткострокових експлуатаційних обмежень об'єктів моделювання.

PLEXOS використовує оптимізацію для відтворення властивостей і особливостей фізичної поведінки об'єктів енергосистеми за допомогою програмного середовища. Він перетворює вхідні дані на математичну задачу, яка дозволяє знайти кращий спосіб дій із низки доступних варіантів. За його допомогою можна виконувати довгострокове, середньострокове й короткострокове планування, при цьому кожна фаза автоматично пов'язана з іншими. Можна налаштовувати PLEXOS із необмеженим набором сценаріїв, індивідуальних обмежень, умовних змінних, фізичних елементів, горизонтів моделювання, тривалості періоду моделювання. Ця керована даними гнучкість створює механізм динамічного рішення, яке адаптується до даних користувача для забезпечення правильного балансу деталізації і продуктивності, а також дає максимальну масштабованість і точний контроль. Отже, можна вважати, що PLEXOS побудована за принципом створення процедурно орієнтованої прикладної інформаційної системи.

Програмне забезпечення прогнозування AURORA — це надійне, просте в освоєнні й орієнтоване на користувача програмне забезпечення для моделювання, прогнозування й аналізу ринку ЕЕ. AURORA забезпечує найвищий рівень інтеграції програмного забезпечення, управління моделями та простоту обміну даними. Це програмне забезпечення для моделювання ринку, яке забезпечує можливість складання прогнозів цін, аналізу вартості, аналізу невизначеностей і функціональних можливостей автоматизованих систем енергоринку. AURORA розроблена для моделювання динамічного й нестабільного ринку, зокрема моделювання вітру й сонця, інтеграції систем накопичення й довгострокового розширення сховищ, допоміжних послуг та ін.

Проте всі ці програмні комплекси орієнтовані переважно на моделювання енергетики в цілому та використовуються національними регулювальними органами для аналізу стратегій розвитку енергетичних комплексів. Але на сьогодні у зв'язку із розвитком і впровадженням в енергетичні системи генеруючих об'єктів і устаткування, що використовують ВДЕ, а також внаслідок утворення нових мікроринків і застосування технологій Smart Grid (розумна мережа) та Demand Response (управління попитом) у світі почали формуватися конкурентні ринки ЕЕ не лише з активною участю великих гравців, але й з постійно зростаючою кількістю учасників із невеликими обсягами виробництва ЕЕ та обмеженими можливостями щодо залучення інвестиційних коштів. У результаті, застосування «великих» кошовних багатофункціональних комп'ютерних систем для широкого загалу «маленьких» гравців з метою агрегування наявної інформації про процеси функціонування енергоринків, моделювання й відтворення стадій процесу вироблення і прийняття управлінських рішень, стосовно формування стратегії їхньої власної поведінки на різних сегментах ринків, може бути витратним і, внаслідок цього, недоцільним.

Особливостями динаміки поведінки ринку ЕЕ, про що свідчать результати дослідження, наведені в п.3.2.2, є нестаціонарність, неоднорідність стану, невизначеність зовнішніх факторів, що впливають на стан ринку з погляду на тарифо- та ціноутворення, які слугують важливим впливовим фактором на поведінку суб'єктів ринку на аукціонах купівлі-продажу ЕЕ. Крім того, світова практика дослідження ринків ЕЕ показує, що кожен ринок є унікальним, зі своєю історією створення енергосистеми, природними і кліматичними умовами функціонування, структурою виробництва й розподілу її як товару. Тому механічне перенесення кінцевих і апробованих рішень або технологій на нові ринки не приносить відчутних позитивних результатів без їх суттєвої адаптації до умов конкретного ринку.

Відповідно, постає потреба в розробленні та впровадженні зручної у використанні КСМ, призначеної для вирішення завдань щодо аналізу процесів ціноутворення на ринку ЕЕ як складової системи організаційного управління енергопідприємств. Тобто такого інформаційно-технологічного та модельного середовища, яке складається з інформаційних ресурсів, що містять масиви даних із актуальною й ретроспективною інформацією, та модельного інструментарію, що може інтегруватися з іншими централізованими організаційно-технічними системами суб'єктів ринку й стати базовим компонентом інформаційно-аналітичного забезпечення процесу підтримки прийняття рішень щодо ціноутворення.

6.2. Призначення комп'ютерної системи моделювання

Основним завданням упровадження комп'ютерних систем у галузі енергетики є забезпечення фахівців необхідними даними для правильного (якісного та обґрунтованого) ухвалення рішень, які ґрунтуються на використанні достовірної інформації про динаміку змін ключових показників функціонування ринку та забезпечують певною мірою мінімізацію (нівелювання) ризиків впливу зовнішніх факторів на

формування цін на ринку.

Правильне прийняття рішень на різних рівнях управління забезпечує надійне та економічне функціонування енергопідприємств, що є виробниками ЕЕ, активних споживачів та інших учасників ринку – постачальників енергії та допоміжних послуг, споживачів. Процес створення системи комп'ютерного моделювання вимагає критичного та аргументованого вибору програмних платформ і апаратних засобів з урахуванням перспектив удосконалення застосовуваних обчислювальних процедур під час проведення моделюючих та аналітичних розрахунків в умовах зростання обсягів даних, що використовуються, а також з урахуванням розвитку обчислювальних потужностей і засобів зберігання даних.

Як визначено в роботах [122, 123], суб'єкти електроенергетики за встановлених правил роботи ринку економічно зацікавлені в удосконаленні методів і засобів подання змін ключових параметрів функціонування ринку та моделювання процесів ціноутворення на ньому. Отже, з метою реалізації положень Закону «Про ринок електричної енергії України» [1] та створення ефективних умов функціонування енергопідприємств – учасників лібералізованого ринку ЕЕ – доцільне запровадження спеціалізованої об'єктноорієнтованої КСМ у систему організаційного управління учасниками ринку, яка надасть можливість здійснювати оперативний порівняльний аналіз їхньої поведінки з іншими гравцями на ринку ЕЕ у процесі ціноутворення. Це допоможе визначити ризики, які зумовлені впливом ринкових факторів конкурентного характеру та факторів зовнішнього середовища існування, з урахуванням яких необхідно формувати оптимальні стратегії учасників на різних сегментах ринку.

Використання такої спеціалізованої КСМ, яка в публікаціях отримала назву Еквант (Equant), надасть учасникам ринку можливість визначення оцінки діапазону мінімально та максимально можливих цін і тарифів на

основі аналізу результатів моделювання процесів ціноутворення на ринку ЕЕ.

Отже, основним призначенням КСМ є надання можливості учасникам – агентам ринку ЕЕ України – у режимі онлайн виконувати завдання щодо: інформаційного забезпечення математичного моделювання процесів у СОТС ціноутворення на окремих сегментах ринку; моніторингу об'ємних та цінових показників динаміки функціонування оптового й роздрібного ринків; прогнозування зміни цін та формування стратегії поведінки агентів з урахуванням їхніх інтересів та комерційних ризиків; виконання розрахунків поточних функціональних задач із планування виробництва ЕЕ та управління електроспоживанням; наукового досліджування різних сценаріїв еволюційного розвитку СОТС ціноутворення на оптовому й роздрібному ринках на основі різних припущень про вдосконалення регуляторних механізмів, інституційних норм, необхідність удосконалення яких обумовлена майбутніми суттєвими змінами як в структурі виробництва, так і в інформаційно комунікаційному забезпеченні процесів передачі та розподілу ЕЕ [111]

6.3. Принципи розроблення комп'ютерної системи моделювання, визначення загальносистемних вимог до її побудови

КСМ процесів ціноутворення є складовою в структурно-функціональній схемі побудови системи підтримки прийняття рішень щодо організаційного управління суб'єктами ринку [56, 99].

Об'єктом автоматизації КСМ є технологічні процеси підготовки та змістовного перероблення необхідної інформації для участі в роботі користувачів відповідних сегментів оптового ринку – РДД, РДН, ВДР та БР у тій частині, яка стосується функцій проведення моделюючих розрахунків з утворення цінових та тарифних показників діяльності.

КСМ забезпечує автоматизацію інформаційних процесів, пов'язаних

із:

- організацією підготовки вхідних та формуванням вихідних даних про результати розрахунків із моделювання процесів функціонування суб'єктів і сегментів ринку;

- проведенням моделюючих розрахунків для визначення складових системи показників результативності діяльності суб'єктів ринку й сегментів його в цілому;

- складанням звітності та організацією статистичного обліку оперативної й ретроспективної інформації;

- оперативним контролем за станом розвитку функціонування ринку на основі аналітичного оброблення даних.

КСМ слугує системою колективного користування та охоплює сукупність організаційних, інформаційних, програмних і технічних засобів, що дає змогу оперативно виконувати функції інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень у реальному масштабі часу.

Розроблення КСМ та її складових здійснено з дотриманням таких принципів:

- використання засобів обчислювальної техніки й устаткування передавання даних, які мають достатній горизонт використання та перспективу розвитку;

- використання промислової системи управління базою даних;

- компонентна архітектура програмного забезпечення;

- забезпечення захисту інформації від несанкціонованого доступу;

- уніфікація технологічних процесів оброблення даних та подання інформації;

- накопичення ретроспективних даних із необхідною глибиною зберігання.

Якщо ідентифікувати місце КСМ в складі комплексу систем інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень в

електроенергетиці, то доцільно зазначити, що вона є середовищем комп'ютерних моделей процесів функціонування енергетичних об'єктів ринкової структури, яке містить:

- засоби математичного формального опису досліджуваних складних об'єктів та процесів взаємодії їхніх структурних складових елементів між собою та із зовнішнім середовищем;

- єдиний інформаційний простір, що поєднує засоби концептуального та інформаційного моделювання процесів взаємодії структурних складових елементів між собою та із зовнішнім середовищем;

- уніфіковану систему класифікаторів і довідників, адаптивну структуру зберігання даних, єдину систему протоколів та інтерфейсів;

- сукупність програмно-технічних засобів, що забезпечують функціонування системи як єдиного комплексу та масштабованість її функціоналу на достатній період застосування.

У процесі побудови КСМ дотримано низку загальносистемних вимог, як-от:

- системність, яка відтворюється в раціональній декомпозиції системи, зокрема на складові компоненти, модулі та підсистеми, що надає можливість автономного розроблення та впровадження складових частин на основі єдиної технічної політики й забезпечує цілісність системи за її взаємодії зі змінним зовнішнім середовищем;

- відкритість, яка полягає у здатності системи до розширення складу наданих послуг з інформаційного забезпечення та збільшення кількості джерел інформації і користувачів без порушення її внутрішнього функціонування та погіршення експлуатаційних характеристик;

- стандартизація, яка полягає в раціональному застосуванні міжнародних стандартів в електроенергетиці, а також типових, уніфікованих проєктних рішень та технологій, внутрішніх і зовнішніх інтерфейсів і протоколів, що закладає фундамент для блокової, модульної

побудови компонентів і підсистем системи в цілому;

- узгодженість, яка сприяє відтворенню взаємозалежності між процесами проектування та поетапної модернізації структурних складових системи, що забезпечують взаємопов'язаність її складових та постійну адаптацію до мінливих вимог користувачів і зовнішнього середовища.

Крім перелічених загальносистемних вимог, враховувалися ще й спеціальні вимоги до інформаційної складової КСМ, які визначають її функціональність, а саме: повнота інформації; ієрархічність (підпорядкованість) інформації; семантична єдність; переносимість системи; комплексна інформаційна безпека.

6.4. Функції комп'ютерної системи моделювання

Із врахуванням наведених вимог сформовано такий склад компонентів та модулів КСМ, які мають певні особливості у функціональності, а саме:

1) компонент єдиного сховища даних, що призначений для накопичення з різних джерел та зберігання інформації, необхідної для розв'язання завдань щодо моніторингу і прогнозування ключових параметрів функціонування суб'єктів і сегментів ринку;

2) модулі збору та завантаження у сховище даних, що забезпечують можливість автоматизованого та ручного введення даних із різних джерел;

3) модуль аналізу динаміки попиту на електроенергію на ціноутворюючих сегментах оптового ринку на основі даних оперативної та ретроспективної інформації про параметри функціонування суб'єктів ринку;

4) модуль прогнозування, що призначений для побудови сценарних прогнозів поведінки суб'єктів ринку на основі даних оперативної та ретроспективної інформації;

5) засоби подання, візуалізації даних та результатів розрахунків у табличному, графічному та картографічному вигляді й публікації їх у

мережі Інтернет;

б) модуль адміністрування, що забезпечує виконання операцій ведення баз даних (БД), управління обліковими записами користувачів та розмежування прав доступу до ресурсів системи.

Прикладне програмне забезпечення КСМ подане як комплекс програм, який реалізовує функції системи за інформаційною технологією “клієнт-сервер” і спирається в роботі на інструментальні засоби оброблення запитів і даних, що надходять до системи із зовнішнього стосовно структуроутворювальних компонентів Internet-середовища, де перебувають клієнти-користувачі КСМ. У результаті до архітектури КСМ увійшли такі інструментальні компоненти: проксі-сервер оброблення запитів, вебсервер відтворення інформації, сервер оброблення даних, сервер БД.

Варто відзначити певну особливість структури БД для створення єдиного інформаційного середовища КСМ. Вона передбачає наявність множини таблиць, які, окрім зберігання даних про енергетичні об’єкти та результатів моделювання, забезпечують роботу механізмів авторизації та автентифікації користувачів, збереження сесійних даних тощо. Задля забезпечення семантичної єдності цих структур застосовують підхід подання показників функціонування суб’єктів ринку, безпосередньо пов’язаних із обробленням даних, що забезпечує адаптованість структури бази до можливих змін у структурі суб’єктів ринку й особливостей їхнього функціонування в майбутньому. Цей підхід побудований на механізмі опису метаданих через створення класифікаторів показників, їхніх зв’язків та сховища даних. Повну структуру БД КСМ наведено в роботі [124]. Прикладом реалізації КСМ на визначених принципах і встановлених вимогах є інтерфейс системи Equant, опису якої присвячено роботу [125].

6.5. Архітектура програмного, технічного і інформаційного забезпечення комп'ютерної системи моделювання

Програмне забезпечення КСМ поділяється на системне, інструментальне та прикладне. Системне забезпечення призначене для організації роботи апаратно-технічних засобів КСМ і складає:

- операційні системи серверів, сервісів і комунікаційних засобів;
- операційні системи обчислювальної техніки робочих місць користувачів.

До складу інструментальних засобів КСМ мають входити засоби оброблення запитів і даних, що надходять до системи із зовнішнього стосовно структуроутворюючих систему компонентів Internet-середовища, де перебувають клієнти-користувачі КСМ. Основними такими засобами є:

- система управління БД;
- вебсервер управління запитами;
- сервер застосувань з оброблення даних.

Прикладним забезпеченням КСМ є комплекс програм, який реалізовує функції системи за інформаційною технологією “клієнт-сервер” і спирається під час роботи на інструментальні засоби.

У результаті до архітектури КСМ увійшли такі компоненти:

- проксі-сервер оброблення запитів Nginx;
- вебсервер відтворення інформації Apache2;
- сервер оброблення даних Django;
- сервер бази даних MSSQL Server.

Схему варіантів функціонування компонентів КСМ подано на рис. 6.1.

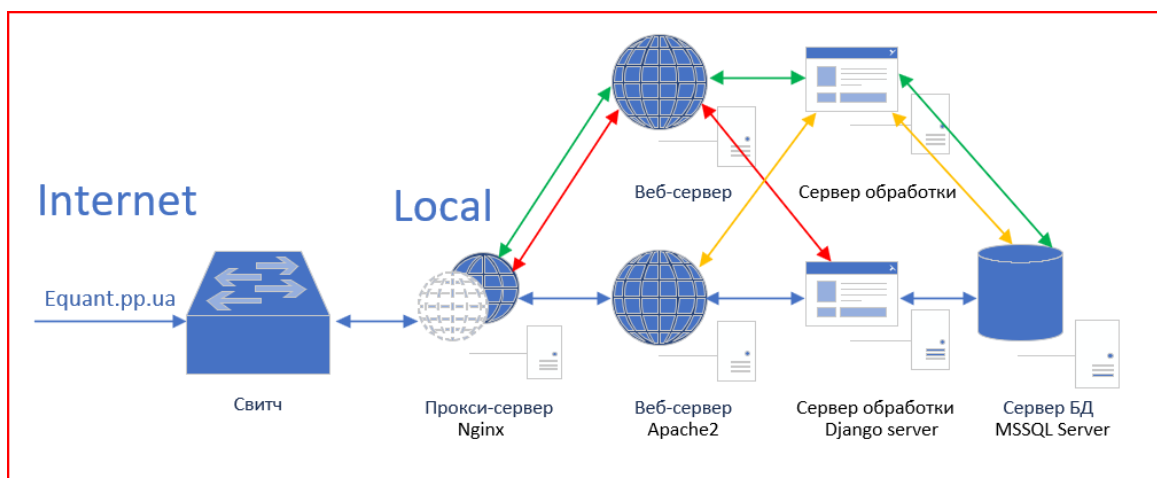


Рисунок 6.1. Схема функціонування основних компонентів КСМ:

- ↔ - виведення в резерв вебсервера й сервера оброблення,
- ↔ - виведення в резерв тільки сервера оброблення,
- ↔ - виведення в резерв тільки вебсервера.

Процедура функціонування компонентів КСМ полягає у прийнятті запитів з Internet-середовища на комунікаційному засобі-маршрутизаторі за програмними портами 443 або 80 і перенаправленні їх на проксі-сервер Nginx для ідентифікації пакетів та попереднього їх оброблення. Якщо запит надходить на порт 80, що відповідає комунікаційному протоколу HTTP, то проксі-сервер автоматично перетворює запит за комунікаційним протоколом HTTPS на порту 443. Якщо запит надходить на порт 443, то він транслюється для наступного оброблення на вебсервері відтворення інформації Apache2. До складу вебсервера входить вебчастина комплексу програм КСМ, яка подається у вигляді сайту в Internet-середовищі. Це так звана front-end частина, що орієнтована на користувача КСМ для відтворення інформації. Для оброблення даних вебсервер направляє запит до сервера оброблення Django, що фактично є так званою back-end частиною комплексу програм КСМ. Маніпулюванням даними та їх накопиченням займається сервер бази даних, який керується системою управління БД MSSQL Server і на запит від сервера оброблення видобуває необхідні для

оброблення дані і надсилає у зворотному напрямку їх йому. У результаті сервер оброблення, отримавши дані, формує відповідь на запит і передає його вебсерверу і далі через проксі-сервер до користувачів КСМ.

У наведеній основній схемі можлива варіативність у застосуванні серверів, що дає змогу гнучко дублювати кожен ланку та дзеркувати кожен сервер для створення так званого «гарячого» резерву.

Системне програмне забезпечення серверів КСМ здійснюється за допомогою операційної системи Linux Debian 11, вибір якої обумовлено такими міркуваннями:

1) жорстка політика стосовно програмних пакетів, репозитарій із величезною їх кількістю, а також висока якість версій;

2) можливість віртуалізації KVM (Kernel-based Virtual Machine) на основі ОС;

3) за визначенням Linux Debian є вільним програмним забезпеченням (Open Source). Тому Debian GNU/Linux є однією з найбільш вільних із найпопулярніших операційних систем.

4) враховуючи, що для розроблення та роботи БД потрібна ліцензія на ОС Windows Server для MSSQL Server, то вибір зроблено у бік віртуалізації KVM на основі ОС Linux Debian.

Орієнтований перелік засобів апаратного забезпечення наведений у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Перелік засобів апаратного забезпечення КСМ

№	Тип елемента	Назва
1	Шасі (основа, база)	HP ProLiant DL360e Gen8 Server (4xLFF)
2	Процесор	2xIntel Xeon CPU E5-2430 v2 @ 2.50GHz (6 cores; 12 threads)
3	ОЗП	24 GB (DIMM DDR3 1333 MHz 12x4Gb)

4	Контролер дискової підсистеми	Smart Array P420 Controller (Cache Module Memory - 1Gb)
5	Диски (HDD)	4xHP 533871-001 300Gb 15K 6G SAS 3.5 (EF0300FATFD)

Під час вибору елементів враховувалися такі фактори:

- ціна;
- співвідношення продуктивності у виконуваних завданнях;
- набір дисків та обсягу для поточних умов та завдань;
- споживання потужності у виборі процесорів та блоків живлення для нього.

Отже, основними інструментальними компонентами – фреймворками у складі програмного забезпечення, які уможливлюють роботу КСМ, є клієнтоорієнтоване середовище AngularJS для відтворення інформації, сервісоорієнтоване середовище Django Framework для оброблення даних та система управління базою даних Microsoft SQL Server (рис. 6.2).

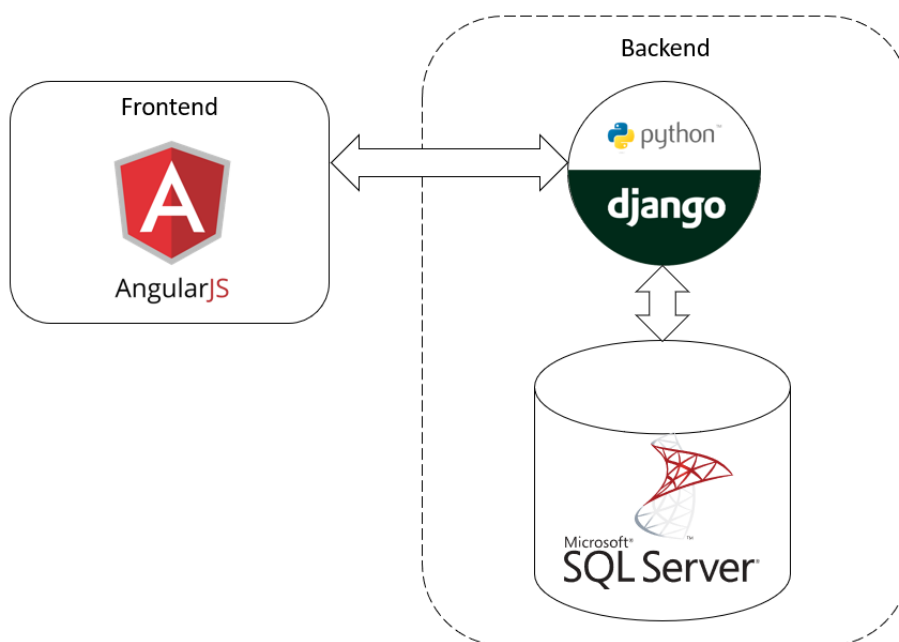


Рисунок 6.2. Основні програмні компоненти КСМ

Переваги використання вищезазначених компонентів полягають у тому, що:

- модульна архітектура забезпечує високу швидкість розроблення;
- масштабованість та просте розширення функціоналу системи;
- чітка структурованість системи та наявність вбудованих засобів для ефективного тестування та налагодження;
- висока швидкість оброблення даних;
- забезпечення цілісності даних;
- мінімізація вихідного коду за рахунок підтримання вбудованих технологій обміну даними із використанням REST API;
- підтримка вбудованого функціоналу для валідації вхідних даних та захисту від типових загроз, зокрема SQL-ін'єкцій (XSS), підміни міжсайтових запитів (CSRF) тощо.

Розглянемо шляхи надходження та механізми оброблення даних у КСМ.

Створення єдиного інформаційного середовища КСМ щодо даних функціонування енергетичного ринку України та ринків суміжних країн може здійснюватися шляхом використання таких механізмів оброблення даних (рис. 6.3):

- ручне завантаження даних шляхом автоматизованого оброблення вхідних файлів заздалегідь визначеного формату та структури;
- автоматичне завантаження даних шляхом розбору відповідних вебсторінок енергетичних компаній, учасників оптового ринку ЕЕ, операторів ринку ЕЕ України та ринків суміжних країн тощо.
- автоматичне завантаження даних із використанням загальнодоступних API сервісів.

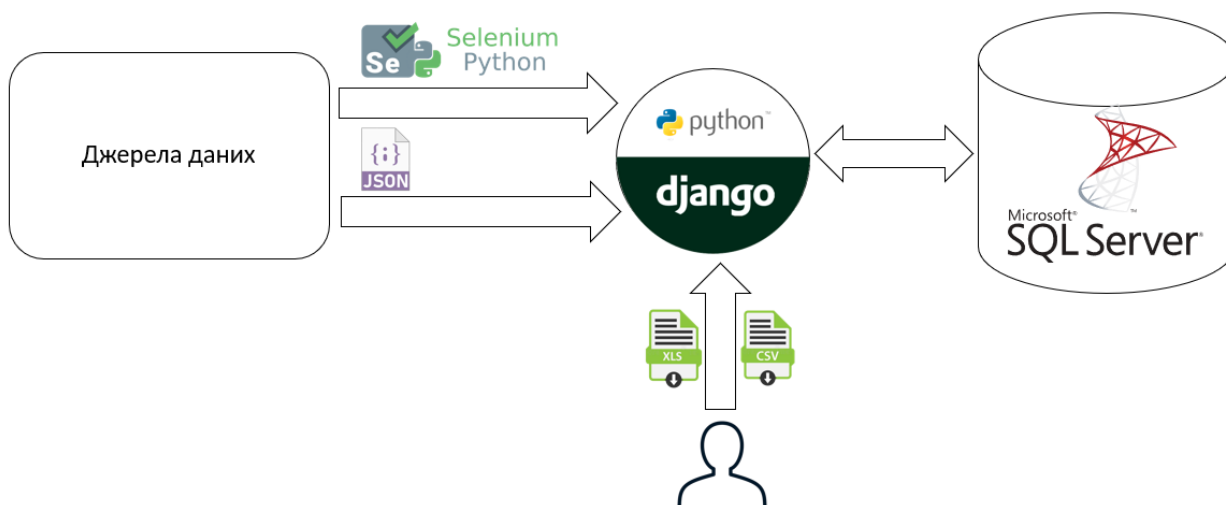


Рисунок 6.3. Механізми оброблення і шляхи надходження даних

Використання вищезазначених механізмів та технологій їх реалізації дає змогу охопити практично будь-які способи отримання даних та забезпечує високу гнучкість під час розроблення відповідних сервісів, що, своєю чергою, забезпечує процес оперативного наповнення інформацією єдиної БД КСМ та використання зазначених даних для подальших моделюючих розрахунків.

Під час ручного процесу завантаження даних можуть використовуватися файли, типу XLS або CSV, із заздалегідь визначеним форматом, за рахунок чого відбуватиметься попередня автоматизована перевірка таких файлів системою, що дає змогу мінімізувати вплив людського фактору та підвищити стабільність оброблення великих за обсягом вхідних масивів даних.

Водночас, основний потік вхідних даних може оброблятися автоматизованими сервісами, що забезпечує низку переваг, зокрема:

- автоматичний запуск, за рахунок вбудованих технологій операційної системи, процесу імпорту даних, контролю за надходженням даних та, за необхідності, повторного завантаження;
- контроль повноти та коректності даних;

- відсутність помилок, які можуть виникнути під час ручного імпорту даних;
- висока стабільність та відмовостійкість.

Варто наголосити на певній особливості у структурі БД потоку вхідних даних під час створення єдиного інформаційного середовища КСМ: ця частина БД передбачає наявність множини таблиць, які, окрім зберігання даних про енергетичні об'єкти та результатів моделювання, забезпечують роботу механізмів надходження даних, збереження сесійних даних тощо. Задля забезпечення семантичної єдності цих структур застосовується підхід, що передбачає подання показників функціонування суб'єктів ринку, безпосередньо пов'язаних із обробленням потоку вхідних даних, що забезпечує адаптованість структури бази до можливих змін у структурі суб'єктів ринку, джерел надходження інформації та особливостей їхнього функціонування в майбутньому. Цей підхід побудований на механізмі опису даних через створення класифікаторів показників, їхніх зв'язків та сховища потоків вхідних даних (рис. 6.4).

Повна структура сховища даних КСМ наведена в роботі [125].

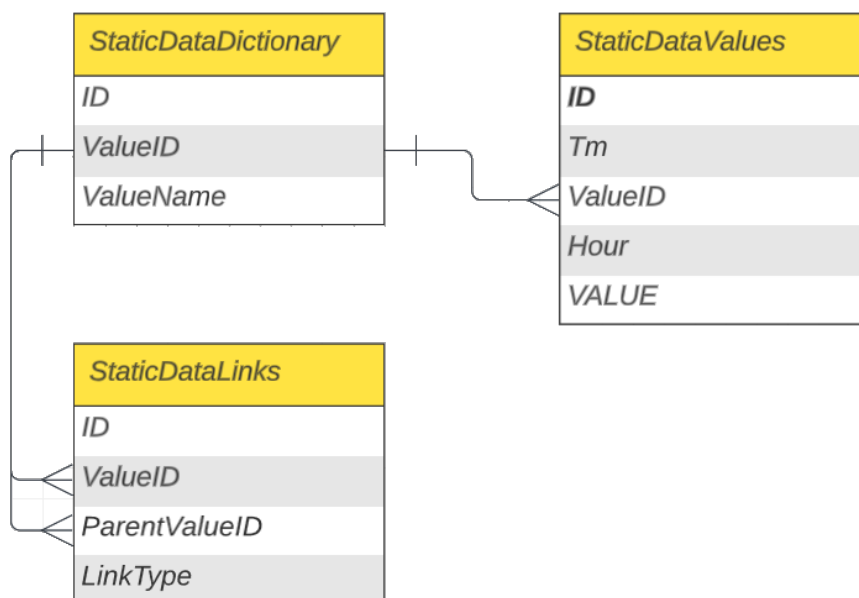


Рисунок 6.4. Принцип подання показників у сховищі потоків вхідних даних

Поля, зазначені на рис. 6.4, мають значення, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Структура таблиць механізму опису потоків вхідних даних

Назва таблиці	Назва поля	Опис
StaticDataValues	ID	Первинний ключ таблиці
	Tm	Часова мітка даних (дата та час)
	Hour	Година (для погодинних даних)
	ValueID	Ідентифікатор типу даних
	VALUE	Значення (обсяг е/е, ціна, тощо)
StaticDataDictionary	ID	Первинний ключ таблиці
	ValueID	Унікальний ідентифікатор типу даних
	ValueName	Опис даних (ціна РДН ОЕС, обсяг ДД, тощо)
StaticDataLinks	ID	Первинний ключ таблиці
	ValueID	Ідентифікатор типу даних
	ParentValueID	Ідентифікатор батьківського типу даних
	LinkType	Тип наслідування

Використання вищезазначеного підходу до подання і збереження вхідних даних має низку переваг, зокрема:

- простота та гнучкість роботи з даними;
- мінімізація часу для розроблення SQL запитів;
- просте масштабування у випадку необхідності зберігання додаткових даних;

- наявність ієрархічних зв'язків для збереження структурованих даних.

Для доступу до об'єктів та параметрів використовують стандартну мову запитів SQL. Тому як сховище даних, окрім MS SQL Server, можуть застосовувати всі інші основні типи СУБД із SQL-доступом ORACLE, Interbase тощо.

6.6. Класифікація операцій взаємодії користувача комп'ютерної системи з об'єктами предметної області СОТС

В організаційній структурі комп'ютерної системи програмне забезпечення утворюється з функціональних підсистем та програмного інтерпретатора інтерфейсів функціональних завдань. А інформаційне забезпечення представлено у вигляді моделей концептуального уявлення суб'єктів предметної області й метаданих інтерфейсу взаємодії користувача (агента) з функціональними задачами. Організація технологічного процесу функціонування КСМ забезпечує виконання функцій підготовки, проведення й оброблення даних із результатів розрахунків та складається з послідовного виконання завдань функціональних підсистем, призначення яких відповідає основним типовим операціям взаємодії кінцевого користувача з системою. Такими типовими операціями є:

- внесення змін до алгоритмів розрахунків;
- збір і підготовка вихідних даних;
- проведення обчислень показників функціонування організаційної системи; формування звітних даних із результатами розрахунків їх подання в наочній формі;
- здійснення візуального аналізу даних і моніторингу результатів розрахунку.

Менеджер інтерфейсів, як компонент концептуальної моделі комп'ютерної системи [107], виступає сполучною ланкою між менеджерами

даних і моделями, що відіграє роль засобу уявлення та інтерпретації інформації, яка породжується з даних і моделей. У результаті програмне забезпечення КСМ складається з підсистем, орієнтованих на розв'язання функціональних задач у межах забезпечення інформаційних потреб користувача предметної області.

Кожна функціональна задача загалом характеризується вхідними даними (потокотом даних), вихідними даними (потокотом результатів) і методами їх оброблення (інтерпретації та подання). Під методами оброблення треба розуміти інструментальні функції, які забезпечують різноманітні механізми маніпулювання вхідними даними функціональних задач. До таких методів оброблення даних належать операції вибірки даних, фільтрації даних, внесення змін до елементів даних, видалення даних, агрегування даних для формування аналітичної звітної інформації або інших даних-результатів.

6.7. Інтерфейс користувача - агента ринку

КСМ призначена для комп'ютеризованого формування всієї необхідної для розрахунків суб'єктів ринку вхідної інформації, виконання відповідно до правил ринку та інших нормативних документів розрахунків, аналізу отриманих проміжних та кінцевих результатів для оперативного контролю стану функціонування ринку, їх збереження в базі даних, формування вихідних форм для надання інформації користувачеві.

Крім того, надає можливість враховувати ціни й обсяги діючого ринку, моделювати процес ціно- та тарифоутворення, зокрема на таких сегментах, як РДН, ВДР.

До складу бази даних увійшли сегменти та суб'єкти сегментів ринку ЕЕ, а саме:

- виробники;
- енергопостачальники;

- оператори системи передачі;
- оператори системи розподілу;
- сегмент - ринок «на добу наперед»;
- сегмент - внутрішньодобовий ринок;
- сегмент - балансуючий ринок;
- сегмент - роздрібний ринок.

КСМ здійснює збір первинних даних від суб'єктів ринку з метою формування інформаційних структур даних, необхідних для проведення первинного візуального аналізу та контролю стану функціонування ринку, а саме:

- опис суб'єктів;
- опис параметрів, що відтворюють кількісні характеристики виробничих процесів суб'єктів ринку (виробіток, відпуск, перетік, споживання, отримання та інше);
- значення параметрів, що відтворюють погодинні обсяги виробництва, відпуску, передачі і споживання електроенергії, обсяги перетікання електроенергії, втрати ЕЕ;
- інші дані.

Нормативні параметри проведення розрахунків складаються з таких даних, визначених у документах НКРЕКП:

- тарифні зони;
- тарифи для суб'єктів;
- тариф на передачу та розподіл ЕЕ.

Комплекс задач, що реалізуються розрахунковою моделлю, розв'язується такими функціональними модулями (підсистемами):

- панель управління;
- виробники;
- система передачі;
- система розподілу;

- енергопостачальники;
- ринок «на добу наперед»;
- внутрішньодобовий ринок;
- балансуючий ринок;
- аналіз і прогноз.

Серед розроблених інтерфейсів, що забезпечують взаємодію користувача з комп'ютерною системою, наведемо такі:

- інтерфейс виробників ЕЕ;
 - інтерфейс блоків станцій виробника ЕЕ;
 - інтерфейс розрахунків ринку двосторонніх договорів;
 - інтерфейс розрахунків ринку «на добу наперед»;
 - інтерфейс розрахунків внутрішньодобового ринку;
 - інтерфейс розрахунку складових ціни ЕЕ для постачальників та споживачів ЕЕ;
 - інтерфейс виробників із відновлювальних джерел енергії;
 - інтерфейс прогнозування цін та обсягів;
- та інші.

Приклад вікна інтерфейсу визначення ціни сегментів ринку у КСМ наведено на рис. 6.5, а орієнтовний склад інтерфейсів КСМ у Додатку С.

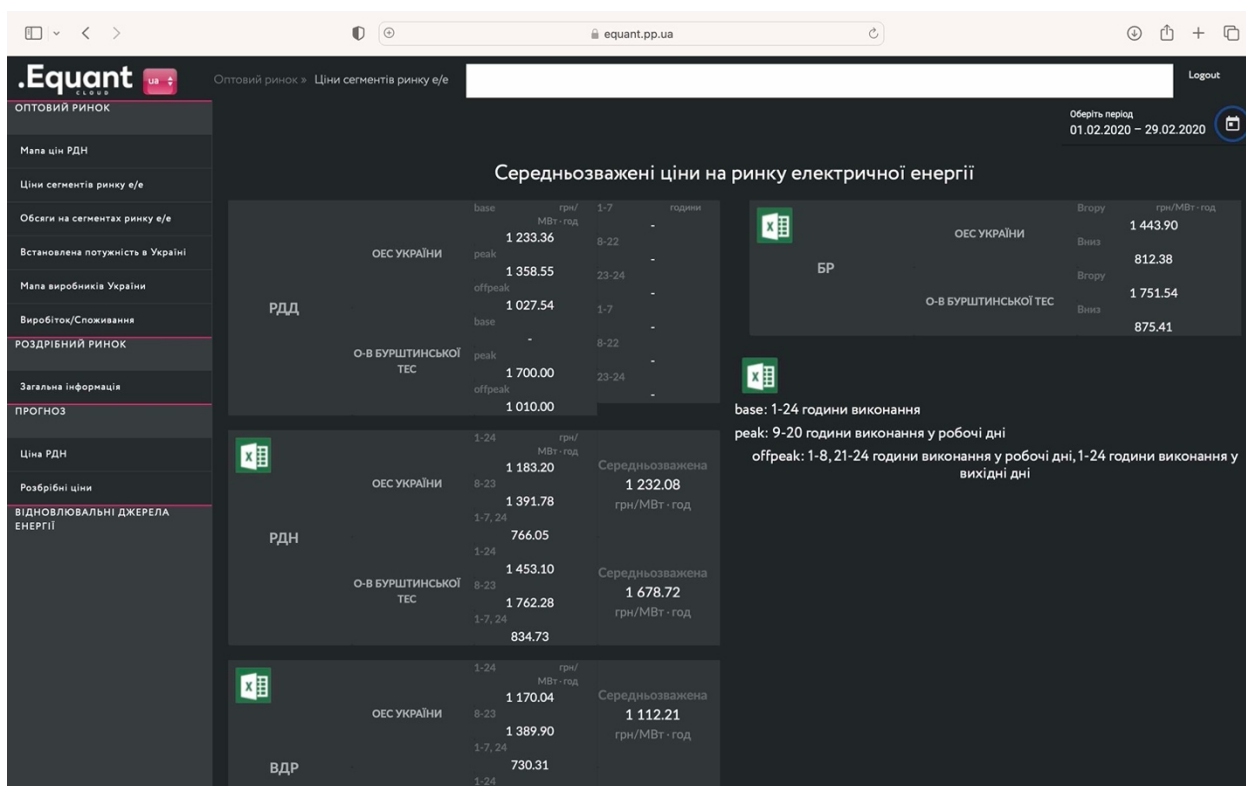


Рисунок 6.5. Інтерфейс ціни сегментів ринку

6.8 Висновки до розділу 6

1. Запропоновано програмно-апаратне забезпечення КСМ процесу ціноутворення, яке базується і орієнтоване на утворенні в складі системи структурних підсистем-програмних модулів з інформаційно-моделюючої та інформаційно-розрахункової підсистем. Комплексна взаємопов'язана взаємодія цих підсистем забезпечується єдиним інформаційним простором, утвореним інформаційно-довідковими модулями різного призначення. Програмно-апаратне середовище такої КСМ утворює єдиний програмний продукт організації і розгортання інтерфейсів в режимі онлайн засобами Internet-середовища для супроводу діючих та створення нових функціональних задач організаційного управління процесів ціноутворення на ринку ЕЕ.

2. Обрана структура програмних засобів КСМ процесу ціноутворення забезпечує створення об'єктно-орієнтованого сховища даних та подальшу інтеграцію існуючих та розроблюваних програмних модулів на єдиній

основі. База даних, яка інтегрована з комплексом програм адміністрування та обслуговування, надає інформаційну підтримку для вирішення виробничих, економічних та інших завдань організаційного управління. В цілому КСМ дозволить підвищити ефективність інформаційної взаємодії суб'єктів під час реалізації завдань функціонування аукціонів ринку, оперативність і якість управлінських рішень при реалізації заходів з проведення аукціонів, формування стратегій поведінки суб'єктів ринку та його адміністрування.

3. Розроблено систему інтерфейсів КСМ на платформі алгоритмічного моделювання для учасників ринку ЕЕ «Equant Cloud», задля представлення її можливостей для організації роботи користувачів (агентів) з програмними модулями, моделями, моделюючими алгоритмами і актуальною базою даних. Підхід, який закладено в основу розробки функціональних програмних модулів інтерфейсів користувача, забезпечує створення мультиагентного середовища для організації інформаційної взаємодії моделей учасників ринку (агентів) між собою і зовнішнім середовищем - реально діючою інформаційно-технологічною інфраструктурою сегментів ринку, у вигляді єдиного інформаційного і програмного середовища для побудови агентами власних робочих місць з формування заявок на різні сегменти оптового ринку ЕЕ.

РОЗДІЛ 7

ПРИКЛАДИ СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗВ'ЯЗАННЯ ОКРЕМИХ ЗАДАЧ У ПРОЦЕСІ ЦІНОУТВОРЕННЯ

У цьому розділі на основі використання результатів робіт [128-131] розглядається постановка та способи вирішення проблеми управління попитом на ринку ЕЕ для забезпечення задач оперативного планування електроспоживанням (попитом) з метою підвищення енергоефективності процесів виробництва, передачі та використання ЕЕ у зв'язку з необхідністю підвищення темпів впровадження концепцій Smart Grid та Demand Response у системах електропостачання із джерелами розподіленої, розосередженої генерації та активними споживачами в електроенергетичних системах. Під "управлінням попиту" визначається зміна обсягів споживання ЕЕ кінцевими споживачами ринку відносно їх нормального (базового) прогнозованого на визначений період часу навантаження у відповідь на зниження ціни на ЕЕ з часом, або на стимулюючі платежі, що спрямовані на скорочення електроспоживання у періоди високих цін на ЕЕ на ОРЕ або внаслідок виникнення позаштатних, викликаних непередбаченими різкими змінами погодних умов чи аварійних ситуацій, коли надійність системи перебуває під загрозою.

Проаналізовано наявні методи управління попитом для зниження рівня електроспоживання в пікові години навантаження із визначенням необхідності управління попитом у реальному або близькому до реального часі. Це зумовлює необхідність розроблення та застосування моделей оперативного прогнозування електроспоживання. На основі проведеного аналізу методів та засобів побудови моделей короткострокового прогнозування запропоновано методику дослідження часових рядів та побудови моделі оперативного прогнозування показників стану ринку ЕЕ (цін, обсягів) в режимі, близькому до реального часу. Застосування

методики дасть змогу автоматизувати, визначити формальні ознаки і спростити процеси утворення системи моделей прогнозування показника, адекватного до поточного стану функціонування ринку із прийнятною оцінкою точності результату прогнозування, що буде сприяти створенню передбачуваних передумов для прийняття рішень щодо участі учасників в аукціоні на сегментах OPE.

У розділі наведено також приклади побудови комп'ютерних моделей та засобів інформаційно-методичного забезпечення КСМ для розв'язання прикладних задач з аналізу та прогнозу попиту на ЕЕ у процесі ціноутворення.

7.1. Аналіз реалізації задачі прогнозування попиту на електроенергію

7.1.1. Інформаційно-методичне забезпечення прогнозування попиту на електроенергію

Протягом багатьох років практично у всіх енергосистемах світу, в умовах суттєвої нерівномірності добових графіків навантаження, викликаних природно добовою нерівномірністю електроспоживання на ЕЕ, застосовувалися різні підходи до вирішення задачі планування управління попитом та для пошуку регуляторних механізмів, що забезпечують вирівнювання добового графіка електричного навантаження. Метою практичного застосування таких механізмів було зниження витрат генеруючими компаніями на одиницю продукції, що випускається, не порушуючи при цьому основні принципи існування самої енергосистеми, які пов'язані із виконанням жорстких вимог до забезпечення стійкості режимів її функціонування та надійності постачання ЕЕ споживачам необхідної якості, визначеної відповідними стандартами.

Ускладненість процесів інформаційного забезпечення під час розв'язання задач щодо управління попитом характеризується одночасним

впливом на зазначені процеси безперервно зростаючої кількості в регіональних енергосистемах об'єктів генерації ЕЕ різної потужності для власних потреб у домогосподарствах, що використовують для отримання ЕЕ ВДЕ - воду, сонце, вітер (надалі об'єкти малої генерації).

Серед них чималу частку складають активні споживачі, що є учасниками ринку ЕЕ, одночасно споживачами та виробниками енергії, які зацікавлені в тому, щоб продавати надлишки виробленої ними енергії на ринку. Задля цього вони активно, у режимі реального часу, відповідно до Правил ринку, взаємодіють з автоматизованими системами його організаційного, оперативно-технологічного управління та комерційного обліку ЕЕ. Більшість із них, за експертними оцінками, близько 70%, приєднуються до розподільних мереж регіональних енергосистем. На цьому рівні, безумовно, істотно ускладнюються процеси не тільки технічної, а й фінансово-економічної та інформаційної взаємодії об'єктів малої генерації з регіональними елементами структур ОСР, ОСП та ОР.

Очевидно, що ускладнення зазначених процесів у межах взаємодії викликане низкою обставин, серед яких можна назвати необхідність розвитку та модернізації розподільних мереж, відсутність в активних споживачів технологічного обладнання, що забезпечує зовнішнє управління режимами генерації та власного електроспоживання, відсутність стандартів для смарт-обліку та інтеграції нових вимірювальних технологій із наявними автоматизованими системами комерційного обліку ЕЕ, відсутність механізмів торгової взаємодії – правил поведінки та проведення взаєморозрахунків активних споживачів між собою та із управлінськими структурами сегментів ринку ЕЕ. Неабиякою мірою ускладненість процесів у межах зазначених взаємодій зумовлена й суттєвою нерівномірністю графіка добового виробництва і споживання ЕЕ та, як наслідок, практичною неможливістю його прогнозування з необхідною якістю.

Саме на цьому рівні під час організації взаємодії активного споживача з регіональною енергосистемою і виникає науково-технічна проблема, пов'язана з виробленням сучасних підходів для комплексного розв'язання задач з управління процесами оптимізації споживання ЕЕ від централізованої енергосистеми та власної генерації в межах загальноприйнятих концепцій розвитку електроенергетичної галузі – Smart Grid, мультиагентного управління попитом на ЕЕ – Demand Response, математичного моделювання процесів здійснення торгових операцій купівлі-продажу ЕЕ активними споживачами на сегментах централізованого ринку та проведення торгових операцій активних споживачів між собою із застосуванням технології блокчейн Microgrid. Коротко суть проблеми описана в монографії [63, с. 101]: «Важливим моментом оптимізації енергетичних процесів у сучасних системах електропостачання із розосередженою генерацією та активними споживачами є розроблення нормативно-методичного й алгоритмічного забезпечення для ефективної сумісної роботи генераторів електричної енергії (як централізованої генерації, так і джерел розосередженої генерації, нетрадиційних та відновлюваних джерел електроенергії) і споживача, який має власні генеруючі потужності й інші системи, що дають змогу споживачеві реалізовувати свій потенціал, взаємодію споживачів між собою, взаємодію активних споживачів і систем електропостачання». Це стає ще більш актуальним на сьогодні, у період неконтрольованих із боку відповідних органів дій активних споживачів із приєднання генераторів, систем накопичення ЕЕ та систем їх управління, пов'язаних із руйнуванням об'єктів критичної інфраструктури та вимушеними відключеннями електропостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Очевидно, що основою для прийняття рішень щодо застосування тих чи інших регуляторних механізмів залишалася не менш жорстка вимога щодо безперервного дотримання

фізичного балансу виробництва і споживання енергії в енергосистемі в межах допустимих відхилень та економічного (фінансового) балансу купівлі-продажу ЕЕ. Узагальнено можна виділити три науково-практичних напрями, розвитку та застосуванню яких приділялася основна увага. Перший був пов'язаний із розробленням та застосуванням методів прогнозування активного навантаження й електроспоживання з підвищеними показниками щодо якості прогнозу, прогнозування обсягів відпуску ЕЕ і зміни цін на неї. Другий напрям досліджень було присвячено розробленню та впровадженню диференційованих у часі доби тарифів на ЕЕ як стимулювального регуляторного механізму управління електроспоживанням для споживачів. Третій напрям визначався необхідністю розв'язання завдань щодо енергозбереження та енергоефективності в межах упровадження глобальних програм із забезпечення сталого розвитку суспільства, зниження шкідливих викидів до атмосфери (декарбонізація) та забезпечення енергетичної безпеки.

Але з часом системи організаційного управління в багатьох енергосистемах засвідчили, що під час практичного використання результатів, отриманих у межах перерахованих напрямів, тільки цих підходів в умовах зростання цін на енергоресурси, упровадження більш жорстких обмежень на викиди шкідливих речовин до навколишнього середовища, розвитку екологічно чистої розподіленої генерації було вичерпано ресурс істотного впливу на процеси ціноутворення в сенсі стримування зростання цін для кінцевих споживачів на роздрібному ринку ЕЕ. Іншими словами, у розвитку енергосистем намітився якісно новий етап. Його виникнення було зумовлене проявом кількох факторів, зокрема: обмеженням доступу до дешевих енергоносіїв; значним збільшенням в енергосистемах об'єктів розподіленої генерації; слабо контрольованим зростанням кількості споживачів із певною часткою власної генерації з

використанням ВДЕ у загальному обсязі споживання ЕЕ з можливістю продажу її надлишків на ринку (активні споживачі) і т.ін.

Тоді й почався пошук нових системних рішень у контексті удосконалення механізмів формування фізичного балансу виробництва і споживання ЕЕ, економічного балансу пропозиції і попиту ЕЕ за рахунок збільшення ролі споживачів у процесі регулювання режимів енергосистем, управління електроспоживанням шляхом стимулювання більш енергоефективного використання споживачами ЕЕ та підвищення їхньої зацікавленості в участі безпосередньо в регулюванні процесів виробництва й розподілу ЕЕ між усіма виробниками, який у науковій літературі отримав загальноприйняту назву «управління попитом» («Demand Response»). У деяких джерелах використовується близька за змістом назва "цінозалежне споживання".

Необхідно відзначити, що, незважаючи на численне застосування цього поняття і майже однаково потлумачений смисловий зміст у різних публікаціях, у науковій літературі і на сьогодні немає його чіткого визначення. У цій роботі під "управлінням попиту" на ЕЕ будемо розуміти зміну обсягів споживання ЕЕ кінцевими споживачами роздрібного ринку відносно їхнього нормального (базового) прогнозованого на визначений період часу навантаження у відповідь на зниження ціни на ЕЕ з часом, або на стимулювальні платежі, що спрямовані на скорочення електроспоживання в періоди високих цін на ЕЕ на оптовому ринку, або внаслідок виникнення позаштатних, викликаних непередбаченими різкими змінами погодних умов чи аварійних ситуацій, коли надійність енергосистеми перебуває під загрозою.

Як відомо, питаннями управління попитом у енергосистемах багатьох країн світу займаються вже дуже давно, виходячи з необхідності врахування впливу на процес ціноутворення різних зовнішніх та внутрішніх факторів. У деяких країнах цей процес почався з того часу, коли питання будівництва

нових регулювальних маневрених генеруючих потужностей стало неможливим, у зв'язку із відсутністю коштів та часу на їх будівництво. В інших він активізувався у зв'язку з неконтрольованим розвитком генерації на ВДЕ, появою великої кількості споживачів нового типу – «активних споживачів», які поряд із споживаючим ЕЕ обладнанням мали генеруючі потужності, що використовували різні види ВДЕ. І, як наслідок, протягом певного часу могли поставляти надлишки власної генерації на ринок ЕЕ. Це все вплинуло на впровадження нових принципів регулювання балансу ЕЕ в енергосистемі через механізм управління попитом, який і отримав назву «Demand Respose».

Водночас, у різних країнах світу цей процес проходить по-різному. Але основними його елементами є обов'язковість визначення економічних стимулів для проведення механізму управління попитом та наявність приладів обліку, які будуть підтверджувати відповідні дії споживача на команди операторів мереж, відповідальних за вирівнювання балансу між потужностями виробництва і споживанням енергії в електричній мережі. Окрім цього, нові тенденції в електроенергетиці, зокрема зростання застосування ВДЕ, поява цифрових інтервальних лічильників ЕЕ, розвиток інформаційно-комунікаційних технологій для побудови інтелектуальних мереж (Smart Grid), визначили можливість оптимізації енергоспоживання й активного використання електротехнічного обладнання споживачів, за наявності технічних можливостей організації гнучкого попиту на ЕЕ.

Провівши огляд міжнародної профільної наукової літератури за останні 5 років, констатуємо, що процес управління попитом у світі став одним із значущих елементів створення окремих сегментів надання на оптовому ринку відповідних системних послуг, пов'язаних із динамічною зміною електроспоживання відповідно до вимог системного оператора ринку. Було створено багато нових пілотних проєктів із запровадження реальних систем організаційно-технологічного управління попитом

державного рівня на великомасштабних ринках ЕЕ (США, Австралія, Японія, країни Європейського Союзу та ін.). Найбільш успішними серед них є, наприклад, системи PJM, NYISO, CAISO, New England ISO, Interruptibility Service, тому що використання ними зручного для користувачів методичного та інструментального забезпечення й економічних умов стимулювання участі в різноманітних програмах управління попитом сприяло зростанню в них частки сторони споживачів. Багато досліджень у науковій літературі присвячено питанням розроблення різних способів щодо створення економічних стимулів із залучення споживачів до процесу управління попитом, починаючи із простих принципів – встановлення диференційованих тарифів для споживачів на постачання ЕЕ в період часу, необхідного для регулювання його споживання (збільшення/зменшення), до складних – регулювання власного споживання в режимі реального часу та/або за командою операторів мереж.

Як правило, прості принципи управління попитом реалізуються на рівні роздрібного ринку ЕЕ і мають на меті лише «здвинути графік споживання споживача» із максимальних «зон визначення цін та обсягів». При цьому зазначені споживачі не беруть участі на ринку системних послуг та не створюють «додаткового блага» для роботи всієї енергетичної системи. Це більше нагадує елементи енергозбереження та енергоефективності. Що стосується складних систем управління попитом, то це питання щодо створення окремого сегмента ринку з надання системних послуг для операторів мереж, де, як правило, механізм здійснення купівлі таких послуг проходить через ОРЕ. При цьому для надання таких послуг встановлюються з боку операторів мереж окремі технічні та організаційні критерії роботи споживачів на ринку системних послуг. Більш детальну інформацію щодо досвіду розроблення та впровадження пілотних проєктів з управління попитом на прикладі національних ринків Данії та Іспанії можна знайти в роботі [132].

Для розв'язання завдань з організації інформаційно-технологічної та комерційної взаємодії в межах реалізації участі споживачів у різних програмах управління попитом було розроблено чимало програм, найвідомішою серед яких є програма Demand Side Management (DSM). В її основу покладено комплекс взаємопов'язаних механізмів – інструментів для зниження рівня електроспоживання в пікові години навантаження. Ця програма поєднує комплекс необхідних інструментальних засобів, які націлені на управління електроспоживанням за допомогою стимулювальних цін на ЕЕ та стимулювання участі споживачів у наданні системних послуг.

У роботі [133] проаналізовано наявні методи управління попитом за допомогою споживачів-регуляторів, виконано аналіз вимог національних програм щодо управління попитом та надання послуг у лібералізованому ринку ЕЕ України. Дуже важливо, що авторами роботи обґрунтовано й доведено необхідність управління попитом у реальному часі (або в режимі, близькому до реального часу) з метою забезпечення економічних режимів функціонування ОЕС в умовах масового інтегрування до електричної мережі розосереджених некерованих ГУ на базі використання ВДЕ. Саме ця обставина й зумовлює необхідність розроблення та застосування моделей оперативного прогнозування електроспоживанням задля розв'язання задач щодо управління попитом споживачів на роздрібному ринку ЕЕ. Разом із динамічним ціноутворенням і запровадженням тарифів реального часу це сприятиме забезпеченню економічних режимів функціонування ОЕС та якісного електропостачання споживачів.

На основі проведеного аналізу особливостей розроблення та застосування методів і засобів побудови моделей короткострокового прогнозування у наступному підрозділі (пункті) пропонується методика дослідження часових рядів і побудови моделі оперативного прогнозування

показників стану ринку ЕЕ (цін, обсягів) в режимі, близькому до реального часу.

7.1.2. Методика побудови моделей прогнозування

Основним призначенням пропонованої методики дослідження і проєктування моделі є формування обґрунтованого інформаційного забезпечення розрахунково-технологічного процесу оперативного планування електропостачання на оптовому ринку ЕЕ за рахунок комплексного аналізу задач щодо короткострокового прогнозування цін і обсягів купівлі-продажу ЕЕ із використання інформаційних технологій і штучного інтелекту.

Беручи до уваги дослідження різних авторів, процес проєктування прогностичних моделей та прогнозування цін і обсягів на ринку ЕЕ рекомендуємо проводити за такими етапами:

1) Визначення мети прогнозування ринкових параметрів - цін і обсягів.

Різні суб'єкти господарювання можуть використовувати прогнози щодо ринкової ціни й обсягу на ЕЕ, досягаючи своїх власних, але різних цілей. Проте для поточної діяльності учасників ринку, незалежно від їхніх функцій, необхідним для забезпечення діяльності горизонтом прогнозування є короткотерміновий період на добу наперед, середньотерміновий для тижня, місяця, а довготерміновий період для року. Короткотерміновий прогноз визначає значення погодинних цін і обсягів, середньотерміновий – середньодобові значення, довготерміновий – місячні значення. Отже, змінними величинами прогнозування виступають ціна й обсяг, а показник горизонту прогнозування буде залежати від особливостей об'єкта прогнозування – купівлі, продажу, споживання, відпуску, навантаження ЕЕ.

2) Аналіз особливостей ринкової ціни та обсягів на ЕЕ.

Метою аналізу статистичних властивостей часового ряду цін і обсягів на ЕЕ є визначення класу його приналежності, що дасть змогу вибрати адекватний математичний апарат для моделювання часового ряду. Комплексний аналіз динаміки цін і обсягів на ринку ЕЕ має охопити такі їхні особливості – мінливість, шипи і стрибки, повернення до середнього значення, сезонність та інші періодичності. Показники, які можна застосувати для розкриття мінливості динаміки на ринку ЕЕ, представлені в табл. 7.1 [134].

Таблиця 7.1. Показники визначення особливостей мінливості динаміки цін і обсягів

Показник	Формула	Оцінка значення показника
Дисперсія	$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i$	Чим вище значення, тим більше нестабільна ціна/обсяг на ЕЕ
Стандартне відхилення	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	
Стандартна мінливість	$\tilde{\sigma} = \sigma \times \sqrt{365}$	
Квадрат різниці двох сусідніх значень	$SD = (x_t - x_{t-1})^2$	
Коефіцієнт коливання	$K_R = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\bar{x}} \times 100\%$	
Коефіцієнт варіації	$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%$	до 10% - варіація низька; 10%-20% варіація середня; 20%-30% варіація висока; 30% і більше варіацій – дуже висока варіація

Добовий показник швидкості, розрахований для середньої ціни ЕЕ протягом дня	$DVDA_i = \frac{1}{M} \times \frac{\sum_{j=1}^{M-1} P_{ij+1} - P_{ij} + P_{i-1M} - P_{i1} }{\frac{1}{M} \times \sum_{j=1}^M P_{ij}}$	Чим вище значення, тим більше нестабільна ціна/обсяг на ЕЕ
Добовий показник швидкості, розрахований для середньої ціни ЕЕ за певний період часу	$DVPA_i = \frac{1}{M} \times \frac{\sum_{j=1}^{M-1} P_{ij+1} - P_{ij} + P_{i-1M} - P_{i1} }{\frac{1}{M \cdot N} \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij}}$	

У показниках використані такі позначення: σ^2 - дисперсія, n - кількість спостережень, $\bar{x}$ - середнє значення часового ряду, x_t - значення спостереження в момент t , $x_{\max}$ - максимальне значення змінної, $x_{\min}$ - мінімальне значення змінної, N - кількість інтервалів (днів) протягом певного періоду часу, i - індекс дня ($i = \overline{1, N}$), M - кількість моментів часу у інтервалі на день (для погодинних моментів $M=24$), j - індекс часового моменту ($j = \overline{1, M}$), P_{ij} - ціна ЕЕ в момент часу j доби i .

Для виявлення критичних значень стрибків цін поріг має бути розрахований за показниками, наведеними у табл.7.2 [134]. Вважається, що всі ціни на ЕЕ нижче або вище критичного значення можна розглядати як стрибки ціни на ЕЕ.

Таблиця 7.2. Показники для виявлення стрибків цін

Показник	Формула	Оцінка значення показника
Критичне значення ціни	$P_K = \bar{x} \pm 2 \cdot \sigma$	Якщо $P > P_K$ або $P < P_K$, то P відповідає визначення стрибку цін. Критичне значення ціни може бути встановлене за допомогою правила $3 \cdot \sigma$ і $4 \cdot \sigma$ (стандартного відхилення)
Негативна ціна	$P < 0$	Усі негативні ціни представляють ціну шипа (стрибка)
Коефіцієнт асиметрії	$A = \frac{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$	Це міра «скошеності» значень часового ряду або міра симетричності щодо середнього значення. Якщо $A > 0$, то ціна набуває надзвичайно високого значення частіше, ніж надзвичайно низькі.
Коефіцієнт ексцесу	$E = \frac{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$	Це міра гостровершинності або плосковершинності значень часового ряду. Якщо $E > 3$, то ціна частіше набуває надзвичайно високого значення.

Беручи до уваги результати кореляції рядів, можемо дійти висновку про сезонність (періодичність) величини ціни/обсягу ЕЕ, а дослідження в контексті повернення до середнього значення ринкової ціни на ЕЕ можливе за допомогою R/S-аналізу зміни діапазону та DFA-аналізу коливання без тренду [135].

В аналізі часових рядів важливим є вибір адекватного математичного апарату, який переважно залежить від загальних тенденцій у часовому ряді і класі його приналежності. Часовий ряд процесу, що розвивається в часі відповідно до законів теорії ймовірностей, є стохастичним часовим рядом. Залежно від зміни імовірнісних характеристик процесу часові ряди поділяються на стаціонарні та нестаціонарні.

Однак для прогнозування іншим важливим фактором класифікації часових рядів є ознака наявності довгострокової пам'яті. Залежно від

наявності довгострокової пам'яті часові ряди поділяються на персистентні, хаотичні, антиперсистентні. У персистентних часових рядах спостерігається довгострокова пам'ять, у хаотичних - невизначеність, в антиперсистентних – відсутність довгострокової пам'яті. Часові ряди з довготривалою пам'яттю в науковій літературі називаються як «часові ряди з довготривалими кореляціями» [136].

Ідентифікаційними властивостями для цієї класифікації часових рядів є:

- 1) підпорядкування розподілу нормального закону;
- 2) стаціонарність;
- 3) фрактальна розмірність часового ряду.

Для виявлення першої властивості достатньо обчислити такі характеристики розподілу часового ряду: коефіцієнт варіації; коефіцієнт асиметрії; коефіцієнт ексцесу. У нормальному законі розподілу обчислені ідентифікаційні характеристики мають такі значення: $V=3$, $A=0$, $E=3$. Допустима межа зміни цих характеристик 5%.

Другу властивість обумовлює обчислення основних статистичних характеристик ряду: математичного очікування або середнього значення; дисперсії або ступеня розсіювання значень ряду відносно математичного очікування.

Для визначення стаціонарності ряду зміна математичного очікування і дисперсії обчислюється за формулами:

$$\Delta \bar{x}(t) = \frac{|\bar{x}(t) - \bar{x}(t-1)|}{\bar{x}(t-1)} \times 100\%$$

$$\Delta \sigma(t) = \frac{|\sigma(t) - \sigma(t-1)|}{\sigma(t-1)} \times 100\%$$

де t – порядковий номер інтервалу розбиття часового ряду; умова стаціонарності - межа зміни цих характеристик у 5%.

Для виявлення третьої властивості потрібно визначити розмірність часового ряду за формулою:

$$R = 2 - H, H = \frac{\log(R(\tau)/S(\tau))}{\log(\tau/2)},$$

де H – показник Херста, який вираховується за допомогою алгоритму R/S -аналізу.

Фрактальна розмірність часового ряду приймає значення в інтервалі $R \in (1, 2)$

У табл. 7.3 наведені відомі найменування класів часових рядів і відповідні їм умови ідентифікації та класи моделей.

Таблиця 7.3. Класифікація часових рядів і моделей застосування

Клас часового ряду	Ідентифікаційні властивості	Клас моделей
Персистентні (наявність довгострокової пам'яті)	1. Ненормальний закон розподілу 2. Нестационарність 3. $R \in (1, 1.4)$	моделі нелінійної динаміки (штучні нейронні сітки, нечіткі системи, еволюційні алгоритми моделювання, фрактальний, фазовий аналіз)
Хаотичні (відсутність пам'яті)	1. Нормальний закон розподілу 2. Стационарність 3. $R \in [1.4, 1.6)$	статистичні, регресійні моделі
Антиперсистентні (наявність короткочасної пам'яті)	1. Ненормальний закон розподілу 2. Нестационарність 3. $R \in [1.6, 2)$	моделі нелінійної динаміки, статистичні, регресійні моделі

Практично всі досліджувані ряди цін на ЕЕ (як часових, так і середньодобових) мають розподіл, відмінний від нормального з наявністю піків (коефіцієнтами ексцесу) і «важкими хвостами» (асиметрією).

На довгостроковому горизонті ціни на ЕЕ показують властивість повернення до середнього значення, апроксимуючи середній рівень (іноді він змінюється в часі).

Висока і змінювана в часі волатильність, а також кластеризація волатильності характерні для всіх оптових ринків ЕЕ. Спостережувані різкі короткострокові стрибки цін можуть бути викликані погодними умовами, позаплановими зупинками генеруючого обладнання або аваріями в системі передачі ЕЕ.

3) Визначення сукупності факторів, що формують ринкову ціну й обсяг на ЕЕ та впливають на їхні зміни.

Зазвичай ринкову ціну й обсяг на ЕЕ прогнозують, уводячи до моделі прогнозування такі показники: історичні дані ціни й обсягу на ринку ЕЕ, обсяг споживання ЕЕ, ціни на паливо (нафту, природний газ, уран та вугілля), що використовуються для виробництва ЕЕ, температуру повітря, тривалість світлового дня, водяні ресурси, курси валют. Також факторами впливу можуть бути визначені ознаки приналежності поточного дня до вихідного, святкового, робочого дня, галузеві екзогенні фактори - графік завантаження ТЕЦ, ремонтні компанії, водність ГЕС, стратегії постачальників (див. Розділ 1).

4) Визначення найважливіших факторів.

Аналіз чутливості [137] та кореляційний аналіз [138] є одними з методів, які можуть бути використані для виявлення найбільш значущих факторів ціни, обсягу на ринку ЕЕ.

5) Збір статистичної інформації та її первинне оброблення.

Необхідно зібрати достатню кількісну та якісну інформацію про ринкові фактори, виконати первинне коригування їхніх рядів (фільтрування, нормалізацію) і врахувати періодичності (сезонності) у вигляді екзогенних змінних.

У зв'язку зі складними характеристиками часових рядів цін і обсягів на ЕЕ перед побудовою моделі прогнозу застосовують первинне коригування значень рядів у вигляді логарифмування, взяття різниці вихідного ряду, а в деяких випадках - видалення викидів (ексцесу) в ряді.

Для зручності подальшого аналізу здійснюється центрування вихідного ряду.

Для обліку періодичності в цінах і обсягах на ЕЕ використовують:

- включення фіктивних змінних, що враховують годину доби, дні тижня, святкові, вихідні дні, робочі дні, а також кліматичну сезонність пори року або місяця;
- розщеплення (кластеризацію) вихідного ряду на окремі компоненти, в тому числі і на компоненти сезонності, з наступною побудовою прогнозів для окремих отриманих рядів;
- включення в модель ретроспективних даних з часовими лагами різної глибини;
- комбінування перерахованих способів.

Включення лагів в модель дозволить вловити добову, тижневу, а також більш довгострокову періодичність. У дослідженнях моделей прогнозування використовуються часові лаги в діапазоні від 24 до 504 значення.

На динаміку попиту на ЕЕ суттєво впливають економічна й господарська активність, а також погодні умови. Ці ключові фактори пояснюють високу частоту коливань цін на ЕЕ, помічену для всіх оптових ринків. Розрізняють добову, тижневу й сезонну періодичність. Але зустрічається врахування коливання цін у святкові дні - календарні ефекти. У переважній більшості досліджень часовий горизонт прогнозу становить 1 добу (у часовому або добовому розрізі). Однак зустрічаються моделі, у яких прогнозуються ціни на 1-3, 1-7 або 1-30 днів наперед.

б) Вибір методу прогнозування.

Метод прогнозування обирають з урахуванням таких вимог: метод має бути адаптивним та гнучким; фактори-причини та фактори-результати мають бути чітко відокремлені в методі прогнозування, тобто метод

прогнозування не може бути суперечливим; метод має бути конструктивним.

На сьогодні розроблено велику кількість моделей прогнозування часових рядів. Без обмеження спільності з точки зору як тривалості горизонту планування, так і застосовуваної методології в значенні вихідного пункту варто розглядати роботи [135, 139] із комбінуванням класів моделей у такій структурі їх класифікації.

1) Мультиагентні методи (багатоагентне моделювання рівноваги, теорія ігор), що моделюють роботу системи різноманітних агентів (генеруючих суб'єктів, компаній), які шляхом взаємодії один з одним формалізують ціновий процес завдяки зіставленню попиту і пропозиції.

2) Фундаментальні (структурні) методи, що описують цінову динаміку шляхом моделювання впливу важливих фізичних і економічних чинників, що впливають на ціну ЕЕ.

3) Зведені моделі скороченої форми (кількісні, стохастичні), які характеризують статистичні властивості ціни на ЕЕ з плином часу, з подальшим оцінюванням похідних фінансових інструментів та управління ризиками.

4) Статистичні методи (економетричні, технічний аналіз), які передбачають або пряме їх статистичне застосування для прогнозування навантаження, або реалізацію економетричних моделей ринку ЕЕ.

5) Методи обчислювального інтелекту (на основі штучного інтелекту, непараметричні, нелінійні моделі), які поєднують елементи навчання, еволюції та нечіткості створюваного підходу, здатні адаптуватися до складних динамічних систем.

Нарешті, виділяють підхід до моделювання і прогнозування на базі гібридних рішень, що поєднують методи з різних класів, перерахованих вище. Це так званий процес змішування або ансамблювання (Ensemble), який отримав назву блендінг (Blending). Блендінг може бути організовано

як доволі просте комбінування моделей із фіксованими коефіцієнтами врахування впливу на остаточний результат, так і шляхом оптимізаційного пошуку під час обчислення коефіцієнтів.

Отже на сьогодні, у сучасних практиках підвищення якості в контексті моделей прогнозування починають переважати інтелектуальні методи та гібридний підхід до застосування моделей, тобто створення комбінованих за принципом дії моделей прогнозування.

На вибір методу прогнозування мають також впливати, зокрема, його часові параметри (глибина використаних даних, горизонт прогнозу) та наявність екзогенних змінних, які детерміновані на достатню глибину перспективи збирання даних. Часові параметри історичних даних треба розглядати з годинним лагом з 1, 24, 48, 168, враховуючи їхню кластеризацію за сезоном, місяцем, добою.

7) Оцінка точності прогнозів.

Для оцінки точності прогнозу використовуються показники MAPE, MAE, RMSE та інші (табл. 7.4). Ціни на ринку ЕЕ швидко змінюються і формують 24 або 48 значень ціни на ЕЕ за добу. Тому для обчислення похибки достатньо взяти дані за один тиждень. Це відповідає 168 спостереженням. Якщо буде проаналізовано дані за тиждень ($M=168$), тоді до позначення показника точності може додаватися літера “W”, (наприклад, WMAPE).

Таблиця 7.4. Показники точності прогнозу

Показник точності	Формула показника	Оцінювання значення показника
Середня абсолютна відносна помилка	$MAPE = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M \left \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right \cdot 100\%$	Прогноз буде дуже точним, якщо MAPE не перевищують 10%. Недостатня точність прогнозу, якщо MAPE перевищує 50%.
Скоригована середня абсолютна відносна помилка	$MAPE = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M \left \frac{x_i - \hat{x}_i}{\bar{x}} \right \cdot 100\%$	

Середня абсолютна помилка	$MAE = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M x_i - \hat{x}_i $	Чим нижче, тим краще
Середнє квадратична помилка	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M (x_i - \hat{x}_i)^2}$	Чим нижче, тим краще

У показниках використані такі позначення: x_i - фактичні значення, $\hat{x}_i$ - прогнознi значення для моменту часу i , M – розрахунковий період спостереження.

7.2. Модель визначення цін у контрактах постачальників роздрібного ринку електричної енергії

Для постачальників ЕЕ (далі – постачальник) за нерегульованим тарифом, які забезпечують від 65% до 70% споживачів роздрібного ринку, єдиний умовний індикативний рівень ціни під час укладання договорів зі споживачами, на відміну від ПУП, це роздрібний тариф для промислових споживачів, приєднаних до електричних мереж першого та другого класів напруги, який визначається та встановлюється НКРЕКП. Процес ціноутворення на роздрібному ринку зумовлює необхідність забезпечення в конкурентних умовах рентабельність ціни для постачальників та її привабливість для споживачів.

Процес ціноутворення на роздрібному ринку – це процес встановлення ціни на продукт чи послугу кінцевому споживачеві. У існуючої моделі ОРЕ ЕЕ, як відомо, застосовуються дві основні системи ціноутворення: ринкове ціноутворення на основі взаємодії попиту та пропозиції (аукціон, біржа) та централізоване державне на основі призначення цін (тарифів) державними органами. Складність розв’язання завдання визначення ціни постачання ЕЕ полягає в тому, що постачальник змушений формувати портфель продукту та допоміжних послуг, перебуваючи одночасно у двох системах ціноутворення – динамічного ринкового та регуляторного тарифоутворення.

Крім того, складним питанням залишається створення конкурентного прозорого процесу ціноутворення між постачальниками та споживачами з урахуванням інтересів обох сторін для визначення цін на постачання ЕЕ. Очевидно, що основою забезпечення прозорості взаємодії постачальників і споживачів у процесі ціноутворення може бути використання загального інформаційно-методичного забезпечення під час прийняття рішень.

Розглянута в попередньому розділі КСМ має у своєму розпорядженні необхідні актуалізовані дані про зміни цін на всіх сегментах оптового ринку й контрактованих обсягів постачальників.

У цьому підрозділі пропонується модель формування прогнозованої ціни контракту для постачальників, характерна риса якої в тому, що дозволяється враховувати вплив чинників ризику в процесі формування ціни контрактації, як із купівлі ЕЕ, так і під час продажу її кінцевому споживачеві на основі використання інформаційного-методичного ресурсу КСМ задля підвищення інформативності постачальників і споживачів. Споживач повинен мати можливість самостійного оцінювання справедливості та прозорості індивідуального ціноутворення на спожитий їм продукт – електричну енергію [140].

Модель ціноутворення. Постачальник є посередником взаємовідносин споживача з продавцем (виробником) ЕЕ на оптовому ринку під час формування ціни на ЕЕ. У процесі виконання посередницьких функцій постачальник стикається з проблемою, коли споживач бажає та має єдину ціну – тариф, затверджений регулятором ринку на довгостроковий період (місяці), а оптовий ринок пропонує ЕЕ за ціною, яка змінюється погодинно протягом доби і кожен день, маючи широкий діапазон коливань, що досить складно прогнозувати. Крім того, складно прогнозувати графік активного електричного навантаження споживачів. Помилки постачальника в прогнозуванні електроспоживання, а отже, і в заявлених обсягах купівлі ЕЕ, своєю чергою, призводять до збільшення його фінансових витрат на

балансуючому ринку [55]. Таке становище вимагає від постачальника під час формування ціни постачання більш уважно ставиться до ідентифікації та оцінювання факторів, що впливають на процес ціноутворення (див. підрозділ 2.1), враховувати їх задля розв'язання складного завдання щодо підтримання своєї фінансової платоспроможності в конкурентних умовах.

Відомо, що моделі ціноутворення допомагають врахувати різні чинники під час вибору ціни продукту чи послуги. Це потрібно, щоб не продешевити, протистояти конкурентам та отримувати прибуток, на який постачальник розраховує.

Очевидно, що постачальник має враховувати під час формування кінцевої ціни постачання якомога більшу кількість таких факторів і транслювати їх на споживача через договірну ціну постачання. На рис. 7.1 наведений добовий графік ціни, який пропонує споживач електропостачальнику та сукупний графік ринкової середньозваженої ціни, яка склалася на відповідних сегментах ринку ЕЕ.

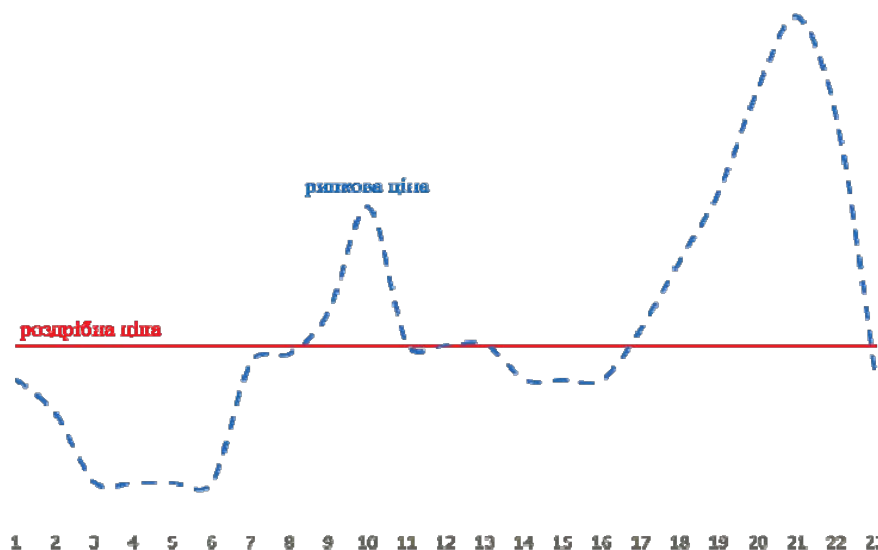


Рисунок 7.1. Добовий графік ціни споживача - роздрібна ціна та сукупний графік середньозважених цін на сегментах ринку електричної енергії

Отже, очевидно, що постачальник є фактично вузловою точкою трансформації ціни (рис.7.2) та повинен мати у своєму розпорядженні математичний апарат (модель трансформації ціни) для розрахунку

фіксованої ціни для споживача на роздрібному ринку, а також можливість розрахунку договірних цін за двосторонніми договорами для купівлі ЕЕ у виробників або на сегментах оптового ринку для постачання споживачеві за ціною, яку цей споживач бажає отримати.

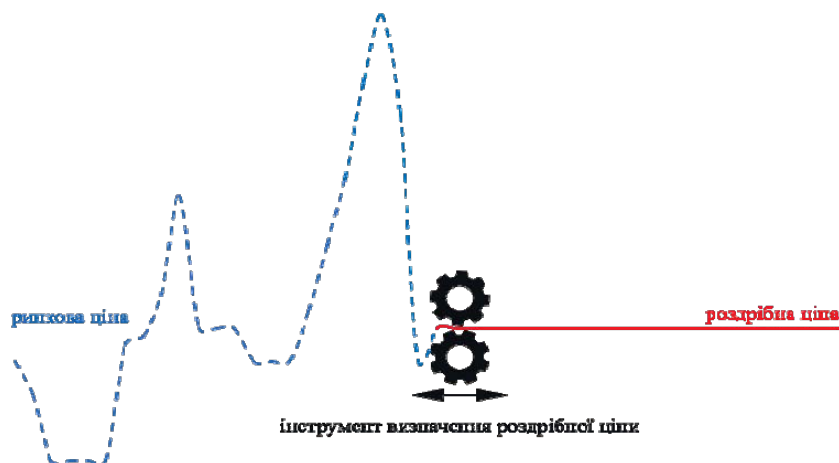


Рисунок 7.2. Вузлова точка трансформації ціни постачальника на електричну енергію для кінцевого споживача

Модель ціноутворення допомагає врахувати різні чинники під час вибору товару на сегментах оптового ринку чи послуги. Це потрібно, щоб протистояти конкурентам та отримувати прибуток, на який розраховує споживач. Під час розрахунку ціни контрактації він враховує прогнозні ціни на відповідних сегментах ринку, динаміку змін цін на ЕЕ за попередні періоди часу, витрати постачальника від купівлі-продажу небалансів на балансуючому ринку, ціни та тарифи на послуги з передачі та розподілу ЕЕ, прибуток постачальника та інші складові ціни, за якою планується здійснення постачання ЕЕ споживачеві.

Визначення ціни контрактації для споживачів на розрахунковий період пропонуємо здійснювати за такою формулою:

$$Ц^K = (T_{ОСП} + T_{ОСР}) + Ц_{ЕП}^П + Ц_{ЕЕ}$$

де $Ц^K$ - ціна контрактації, грн./МВт год;

T_{OCP} – прогнозний або встановлений Регулятором тариф оператора системи передачі на розрахунковий період, грн./МВт год;

T_{OSP} – прогнозний або встановлений Регулятором тариф оператора системи розподілу на розрахунковий період, грн./МВт год;

Π_{EP} – ціна послуги постачальника, грн./МВт год;

Π_{EE} – середньозважена ціна ЕЕ, яка купується постачальником на всіх відповідних сегментах ринку ЕЕ, зокрема за двосторонніми договорами, грн./МВт год.

Ціна послуги постачальника розраховується за такою формулою (грн./МВт год):

$$\Pi_{EP} = \Pi_{EP}^e \times K_{EP}^p,$$

де Π_{EP}^e - ціна витрат постачальника на здійснення діяльності з постачання ЕЕ, грн./МВт год;

K_{EP}^p - коефіцієнт ризику, який збільшує ціну послуг електропостачальника з метою врахування відповідних ризиків (див. підрозділ 2.1) від здійснення постачання ЕЕ відповідному споживачу, у.о. ≥ 1 .

Попит на ЕЕ постачальники здебільшого визначають на підставі графіків даних про активне навантаження споживачів у попередній період часу. На оптовому ринку постачальник купує на відповідних сегментах та за двосторонніми договорами необхідний обсяг ЕЕ для всіх своїх споживачів. При цьому купівля або продаж обсягів ЕЕ за двосторонніми договорами на сегментах ринку РДН та ВДР здійснюється на підставі прогнозних погодинних обсягів споживання, а купівля або продаж ЕЕ на балансуєчому ринку здійснюється на підставі різниці фактичного споживання згідно з даними приладів обліку всіх споживачів електропостачальника та договірних обсягів ЕЕ, придбаних на ринку.

На рис. 7.3 представлено приклад портфелю договорів на купівлю ЕЕ, які укладає постачальник для покриття сукупного погодинного графіку постачання ЕЕ споживачам.

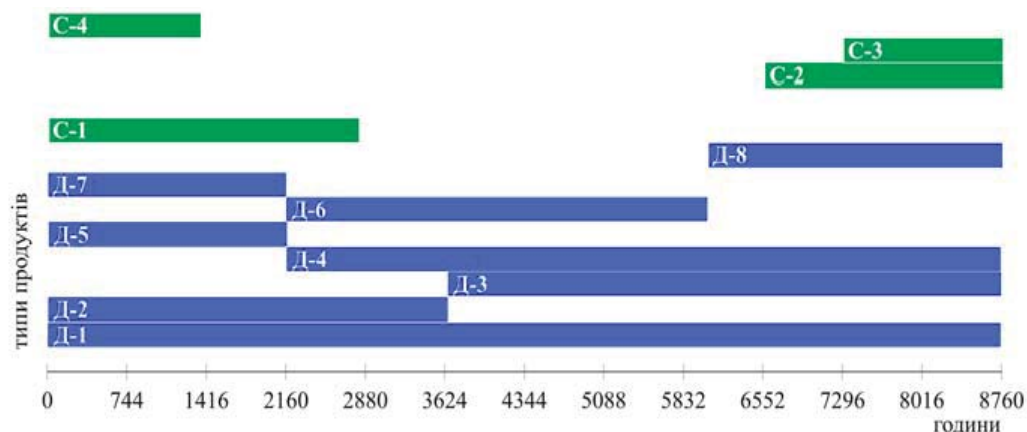


Рисунок 7.3. Приклад терміну дії довгострокових, середньострокових та короткострокових договорів у розрахунковий період

На цьому рисунку показано приклад того, як постачальник укладає двосторонні довгострокові договори на ЕЕ Д-1 – Д-8, та середньострокові договори С-1 – С-4. Непокритий обсяг планового споживання постачальник купуватиме на ринках із короткостроковими договорами К купівлі ЕЕ на РДН та ВДР.

На рис. 7.4 представлено погодинний графік обсягу споживання ЕЕ та сумарний графік прогнозних погодинних необхідних обсягів купівлі постачальником ЕЕ на ринку. Якщо побудувати графік покриття погодинних обсягів постачання ЕЕ, то ми побачимо зони, непокриті контрактними обсягами ЕЕ. Покриття цих зон постачальник планує на сегментах ринку РДН та ВДР у режимі корегування прогнозного графіку щодо фактичного. Такий підхід дає змогу мати “буфер” у графіку постачання для можливого корегування контрактної позиції в терміни, найбільш близькі до реального часу постачання. Такий підхід дає змогу нівелювати фінансові ризики постачальника від купівлі або продажу ЕЕ на балансуючому ринку за невідгідною для нього ціною.

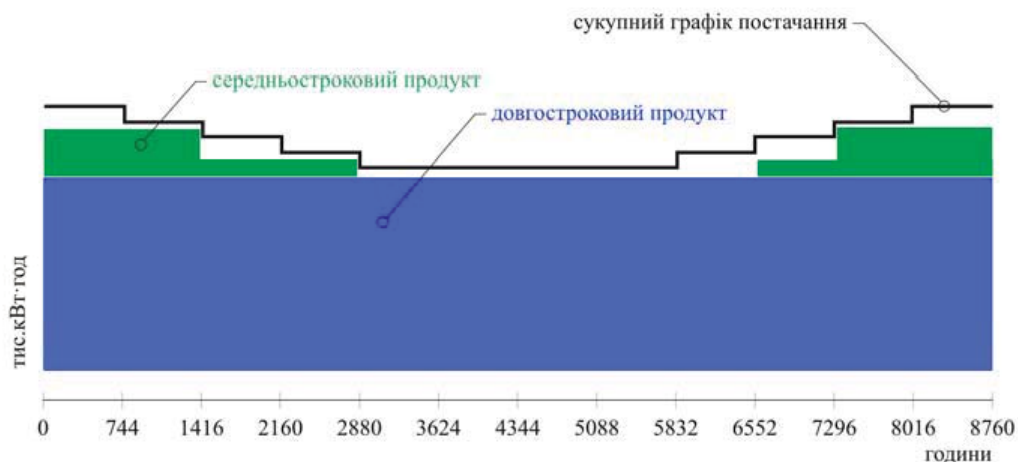


Рисунок 7.4. Погодинні графіки обсягів постачання та обсягів купівлі постачальником ЕЕ за договорами на РДД

На рис. 7.5 відображені графіки постачання та його покриття за сумарним графіком ЕЕ, придбаної за довгостроковими та середньостроковими договорами. Як бачимо на рисунку, довгострокові договори покривають графік постачання в базовому графіку, а короткострокові частково заповнюють прогалини в графіку постачання для максимізації законтрагованих обсягів ЕЕ на ринкових засадах.

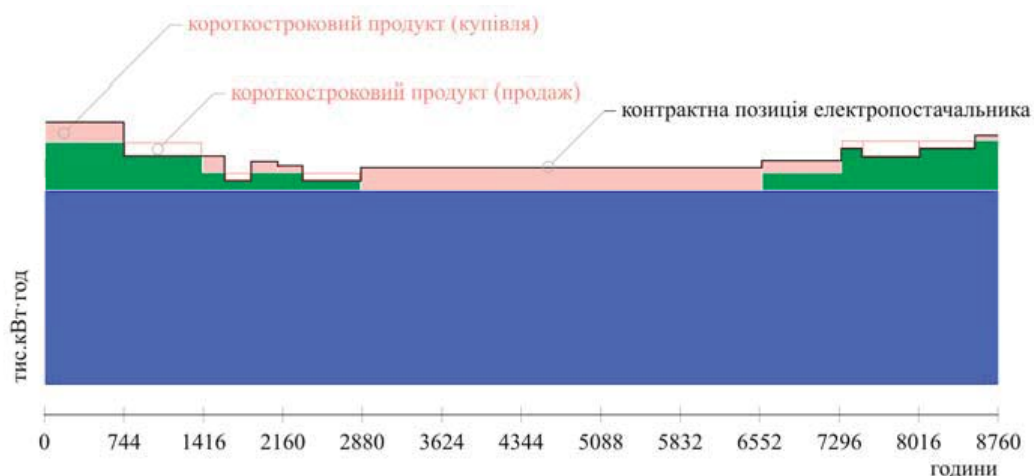


Рисунок 7.5. Погодинні графіки купівлі-продажу ЕЕ за короткостроковими договорами

На рис. 7.6 наведено приклад відхилення фактично спожитого обсягу ЕЕ від сукупного законтрагованого обсягу цим постачальником

(небалансів купівлі-продажу). Варто зазначити, що будь-які операції з купівлі або продажу ЕЕ постачальником на балансуєчому ринку є економічно необґрунтовані та призводять до збитків постачальника. Водночас механізм залучення ресурсів балансуєчого ринку для покриття відсутніх обсягів прийнято вважати стимулювальним. Такий механізм фінансового стимулювання примушує постачальника до взаємодії зі споживачем щодо створення необхідних умов для вирішення завдань з управління попитом. Результатом такої взаємодії може стати узгодженість графіку постачання ЕЕ споживачам та графіку покриття сумарними обсягами ЕЕ, законтракованих на ОРЕ.

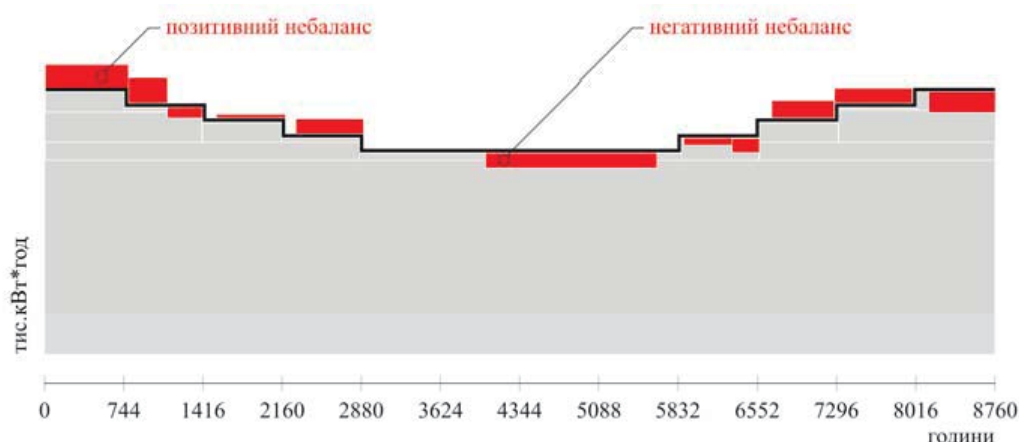


Рисунок 7.6. Погодинний графік обсягів небалансів купівлі продажу ЕЕ на балансуєчому ринку

Середньозважена ціна ЕЕ за розрахунковий період, яку постачальник може придбати на всіх сегментах ОРЕ, зокрема і за двосторонніми договорами, визначається за такою формулою (грн./МВт·год):

$$C_{EE} = \frac{B_{EE}}{O_{EE}},$$

де B_{EE} - ціна ЕЕ, яку постачальник може придбати на всіх сегментах ринку ЕЕ, зокрема й за двосторонніми договорами;

O_{EE} - обсяг ЕЕ, яку постачальник може придбати на всіх сегментах ринку ЕЕ, зокрема і за двосторонніми договорами, МВт·год.

Зазначені ціна та обсяг визначаються за такими формулами відповідно:

$$B_{EE} = \sum_1^n \left(\sum_G^P \left((C_G^D \times O_G^D) + (C_G^C \times O_G^C) + (C_G^K \times O_G^K) + (C_G^{\bar{p}} \times O_G^{\bar{p}}) \right) \right),$$

$$O_{EE} = \sum_1^n \left(\sum_r^P (O_G^D + O_G^C + O_G^K + O_G^{\bar{p}}) \right),$$

де n – кількість договорів, од.;

P – кількість годин у періоді постачання;

G – розрахункова година, год.;

C_G^D - ціна ЕЕ у відповідній годині “ G ” за договором “ D ”, який підпадає під критерій довгострокового, грн./МВт год;

O_G^D - обсяг ЕЕ у відповідній годині “ G ” за договором “ D ”, який підпадає під критерій довгострокового, тис.кВт год;

C_G^C - ціна ЕЕ у відповідній годині “ G ” за договором “ C ”, який підпадає під критерій середньострокового, грн./МВт год;

O_G^C - обсяг ЕЕ у відповідній годині “ G ” за договором “ C ”, який підпадає під критерій середньострокового, тис.кВт год;

C_G^K - ціна ЕЕ у відповідній годині “ G ” за договором “ K ”, який підпадає під критерій короткострокового, грн./МВт год;

O_G^K - обсяг ЕЕ у відповідній годині “ G ” за договором “ K ”, який підпадає під критерій короткострокового, тис.кВт год;

$C_G^{\bar{p}}$ - ціна у відповідній годині “ G ” на БР, грн./МВт год;

$O_G^{\bar{p}}$ - обсяг ЕЕ у відповідній годині “ G ” на БР з урахуванням напрямку купівлі-продажу небалансу (+/-), тис.кВт год.

Методичні рекомендації щодо застосування моделі. Вищенаведена формула з визначення прогнозної середньозваженої ціни ЕЕ дає змогу оцінити ціну, як за укладеними договорами, так і за договорами, які необхідно укласти для покриття сукупного графіку постачання.

Постачальник отримує пропозицію від споживача щодо бажаної ціни та погодинних обсягів споживання й розраховує свої заявки на OPE з урахуванням сукупного графіку постачання. За відсутності у споживача погодинного графіку споживання, він надає постачальнику тижневі, місячні та річні обсяги споживання, на підставі яких постачальник самостійно формує погодинний графік споживання.

Наступним кроком постачальника є розрахунок обсягів покриття графіку постачання, які купуються на OPE. Постачальник, крім тих контрактів на постачання, які були укладені раніше, отримує пропозиції від інших споживачів і повинен мати уявлення про рівень прогнозованої ціни купівлі EE на OPE, для вигідного для нього укладання нового договору на постачання. На рис. 7.7 наведено приклад врахування додаткових обсягів постачання EE новому споживачу постачальником у загальному обсязі постачання всіх його споживачів. При цьому варто розуміти, що ці додаткові обсяги постачання можуть впливати на середньозважену ціну і, як наслідок, збільшувати або зменшувати маржинальний прибуток постачальника. На рис. 7.7 наведено приклад пропозиції графіку споживання потенційного споживача, який потребує аналізу для визначення економічної доцільності постачання EE цьому споживачеві. На цьому рисунку, як приклад, враховуються раніше укладені двосторонні довгострокові та середньострокові договори.

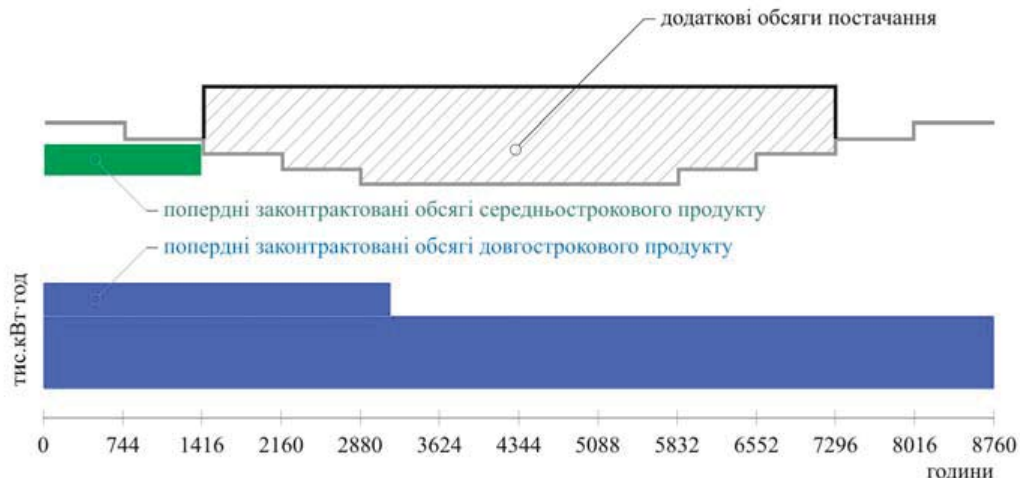


Рисунок 7.7. Додаткові прогностні обсяги постачання під час формування ціни контрактації для потенційного споживача

Прогнозування цін на відповідних сегментах ринку ЕЕ та у двосторонніх договорах є окремою проблемою, що має декілька варіантів вирішення. Прогнозування цін здійснюється або для кожної години розрахункового періоду за допомогою відповідної моделі, яка реалізує алгоритмічне моделювання процесів ціно- та тарифоутворення на сегментах ОРЕ [141, 142], або з використанням алгоритмів апроксимації ретроспективних даних результату роботи сегментів ОРЕ. Це питання розглянемо у наступному підрозділі на прикладі прогнозування попиту на сегменті РДН.

7.3. Модель оперативного прогнозування попиту на сегменті ринку «на добу наперед»

Формулювання задачі. Як відомо, торги на РДН відбуваються за принципом маржинального ціноутворення (дивись підрозділ 4.1). Продавці товару подають заявки за мінімальною ціною, за якою вони готові продати, покупці - за максимальною ціною, за якою вони готові купити. За результатами аукціону на РДН продавці продають його за ціною не

дешевше, ніж їхня пропозиція, а покупці купують за ціною не вищою, ніж їхня пропозиція.

Погодинний попит на РДН - це погодинний обсяг ЕЕ, який споживачі-постачальники та інші покупці заявляють і хочуть купити на РДН за відповідними погодинними цінами. Цей обсяг безпосередньо впливає на маржинальну ціну, яка буде утворена за результатами аукціону.

Практично на всіх зарубіжних ринках ЕЕ побудові та вдосконаленню моделей прогнозування погодинного попиту на ЕЕ приділяється велика увага. Це, по-перше, пов'язано з досить успішним поширенням і розвитком концепції управління попитом у взаємодії постачальників і кожного із споживачів. По-друге, важливе значення має і та обставина, що наявність у енергокомпаній-постачальників моделі прогнозування, що забезпечує кращу якість прогнозу, дає таким компаніям і певну конкурентну перевагу за рахунок підвищення енергоефективності використання енергії.

Аналіз графіків часових рядів погодинного електроспоживання в Україні в умовах аварійних відключень споживачів і безперервного зростання кількості активних побутових та непобутових споживачів з ГУ досить широкого діапазону потужності за період спостереження дає підстави для висновку про їхню нестационарність. Її прояв убачаємо в тому, що практично неможливим стає визначення трендової, сезонної та циклічної складових часового ряду.

Ця обставина стала підставою для розроблення нової моделі прогнозування, що відрізняється адаптивністю до непередбачуваної динаміки попиту на ЕЕ в умовах дефіциту її виробництва та є такою, що забезпечує необхідну якість прогнозу.

Засади побудови алгоритмічної моделі. Для розроблення моделі прогнозування погодинних обсягів споживання ЕЕ використано комбінований метод побудови моделей часових рядів - математичні моделі прогнозування, які характеризуються залежністю значення обсягів

споживання ЕЕ на добу наперед – день торгів (позначимо через D) від попереднього в середині самого процесу і в цій залежності обчислити прогноз – значення функції кількох $(24-x)$ змінних погодинного споживання (позначимо як O_D^h), кожна з яких є часовим рядом. Цей метод згідно з класифікацією, наведеною в п.7.1.2, можна віднести до методів побудови зведених моделей скороченої форми (кількісні, стохастичні), які характеризують статистичні властивості обсягів попиту на ЕЕ з плином часу, у цьому випадку, зокрема, й упродовж доби.

Він базується на основі використання комбінації двох методів. Одним із них є метод експоненційного згладжування, що відрізняється відомою властивістю адаптивності. Його суть зводиться до заміни фактичних значень часового ряду розрахунковими, отриманими після видалення коливань значень ряду, які не спостерігалися раніше і яких далі називатимемо «нетиповими». Згладжування часового ряду в такому випадку часто називають фільтруванням, а перетворення ряду (оператор), за допомогою якого здійснюється фільтрування - фільтром. А в значенні фільтру в комбінації методів задля формування вибірки з наявних фактичних погодинних даних споживання за попередні дні для екстраполяції функції O_D^h на день проведення торгів - D застосовується другий метод, відомий у науковій літературі під назвою «вибірка максимальної подоби».

Для розрахунку прогнозного погодинного попиту на РДН в день D необхідно розрахувати певне значення зміни цього попиту між відповідними днями за попередні періоди, а потім додати його до фактичного значення погодинного попиту на РДН в день $D-1$. Але виникає запитання: за яким алгоритмом розрахувати це значення зміни попиту. Для відповіді на це запитання необхідно розуміти, по-перше, природу виникнення зміни, а по-друге, як врахувати або збалансувати ці значення за попередні періоди. Як уже згадувалося, зміна попиту між днями тижня може

відбуватися через природну зміну споживання для відповідного дня тижня. Але це не єдиний фактор. Можемо ще додати такі фактори.

1) Обсяги укладених контрактів на ринку двосторонніх договорів.
2) Відключення ЕЕ через руйнування критично важливих об'єктів енергетичної інфраструктури.

3) День тижня.

4) Зміна споживання кінцевого споживача через незалежні умови.

5) Маніпулятивна поведінка покупців на РДН.

6) Інші фактори (більш повний перелік факторів наведено в п 2.1).

Зрозуміло, що деякі з цих факторів неможливо передбачити і вони можуть спотворити кінцевий результат розрахунку величин екстраполяційної функції O_D^h , погіршивши точність прогнозу. Але має бути передбачений певний фільтр у вигляді алгоритму, який би дав змогу або зменшити вплив цих факторів, або відкинути ці величини часового ряду як нетипові. Цей фільтр-оператор застосовується для визначення та врахування величини зміни погодинного попиту в попередні розрахункові дні для розрахунку погодинних прогнозних значень у день D . Власне, відповідь на це запитання може дати алгоритмічна модель прогнозування, яка і призначена для розуміння того, як буде здійснюватися розрахунок значень функції O_D^h .

Розглянемо змістовні описи можливих варіантів побудови алгоритмічної моделі від простих, що не вимагають застосування складних обчислювальних процедур, до більш складних із застосуванням вище названих комбінацій методу експоненційного згладжування та процедур вибірки максимальної подоби.

Варіант 1. Величина зміни погодинного попиту визначається як середнє арифметичне значення зміни попиту.

Варіант 2. Величина зміни погодинного попиту визначається як середньозважене значення суми додатної та від'ємної зміни попиту, зважене

на кількість днів із додатною зміною попиту та від'ємною зміною попиту, віддаючи перевагу тим дням, яких більше (шляхом збільшення їхньої ваги) і які ближче до дня Д. Суть алгоритма полягає в таких основних аспектах:

(a) визначається кількість днів із додатними та від'ємними змінами попиту;

(b) якщо всі дні мають або додатну або від'ємну зміну, то обчислюється середнє арифметичне – зважування не потрібне;

(c) якщо днів певного типу більше, то вага цього типу збільшується (одиниця плюс відношення кількості таких днів до загальної кількості днів), а вага іншого типу зменшується (одиниця мінус відношення кількості таких днів до загальної кількості днів);

(d) якщо кількість днів обох типів однакова, то розраховується середнє арифметичне перших двох днів, помножене на 0.5, плюс середнє арифметичне останніх двох днів, помножене на 1.5.

Варіант 3. Величина зміни погодинного попиту визначається як середньозважене значення суми додатних та від'ємних змін попиту, зважене на кількість днів із додатною зміною попиту та від'ємною зміною попиту. Надання переваги тим типам днів, яких більше (шляхом збільшення їхньої ваги). Суть алгоритму можна схарактеризувати так:

(a) визначається кількість днів із додатними та від'ємними змінами попиту;

(b) якщо всі дні мають або додатну, або від'ємну зміну, то обчислюється середнє арифметичне – зважування не потрібне;

(c) якщо днів певного типу більше, то вага цього типу збільшується (одиниця плюс відношення кількості таких днів до загальної кількості днів), а вага іншого типу зменшується (одиниця мінус відношення кількості таких днів до загальної кількості днів).

Варіант 4. Величина зміни погодинного попиту визначається як середньозважене значення для додатних та від'ємних змін попиту з

урахуванням відхилення від середнього арифметичного абсолютних значень змін попиту для визначення нетипових днів для видалення із сформованої вибірки для екстраполяції на досліджуваний день. Алгоритм формування вибірки наступний:

(а) підраховується сума та кількість додатних та від'ємних днів, визначається середнє арифметичне абсолютних значень серед змін попиту;

(б) організація ітераційного процесу відкидання нетипових днів для зменшення їх впливу, як не репрезентативних значень, на кінцеве значення прогнозованих величин. Для цього розраховується так звана "вага відхилення" шляхом обчислення оберненої величини відносного відхилення для кожного значення зміни погодинного попиту від розрахованого середнього арифметичного для цієї години. Якщо розраховане значення менше 0, такий показник зміни попиту відкидається і проводиться перерахунок, починаючи з першого етапу, але вже без цього показника. Після завершення ітераційного процесу розраховується середнє значення "ваги відхилення" окремо для додатних змін попиту, окремо для від'ємних змін попиту;

(с) коригування ваги додатних значень зміни попиту (або від'ємних значень - для додатних значень значення коригування буде оберненим - суттєвої різниці немає). Вагові значення для додатних змін попиту коригуються на цей коефіцієнт. Після цього розраховується середньозважене прогнозне значення зміни попиту на досліджуваний день, де вага – це скориговані значення "вагових коефіцієнтів відхилення".

Варто зазначити, що на практиці найточніші результати погодинного прогнозування дають аналогічні години попереднього робочого чи вихідного дня. Цей принцип лежить в основі використання попереднього дня (D-1) як основи для додавання певної величини зміни попиту між відповідними днями за попередні періоди.

Дослідження варіантів моделей. Для проведення розрахунково-експериментальних досліджень застосування описаних вище варіантів моделей та порівняння отриманих прогнозних розрахункових значень із реальними даними використовуються фактичні дані погодинного попиту за результатами аукціонів на РДН у період з 30 липня 2022 року по 31 серпня 2022 року. Глибина аналізу динаміки зміни попиту становить 4 попередні тижні, тому для аналізу в розрахунках використовувалися фактичні дані погодинного попиту за результатами торгів на РДН з 1 липня 2022 року.

Результати розрахунків представлені у вигляді порівняльної таблиці 7.5, де наведено приклад результатів прогнозного розрахунку та реальних фактичних даних за результатами аукціону РДН.

Таблиця 7.5. Результати розрахунків досліджуваних алгоритмів, порівняно з фактичними даними

Day	Hour	Forecast 1	Forecast 2	Forecast 3	Forecast 4	Real data
30.07.2022	1	1 496,300	1 626,500	1 626,500	1 501,200	1 243,000
30.07.2022	2	1 214,600	1 214,600	1 214,600	1 207,100	1 163,300
30.07.2022	3	1 108,200	1 108,200	1 108,200	1 090,300	1 010,100
30.07.2022	4	978,600	1 053,800	1 053,800	923,600	884,600
30.07.2022	5	929,200	929,200	929,200	943,800	841,000
30.07.2022	6	1 060,300	1 118,200	1 118,200	1 077,800	923,700
30.07.2022	7	1 039,800	1 039,800	1 039,800	1 039,400	1 129,900
30.07.2022	8	831,300	751,100	751,100	696,100	1 225,500
30.07.2022	9	866,600	748,700	748,700	786,000	1 493,700
30.07.2022	10	750,300	533,500	533,500	666,500	1 543,900
30.07.2022	11	569,100	327,200	327,200	456,400	1 556,000
30.07.2022	12	530,000	278,200	278,200	461,300	1 510,000
30.07.2022	13	624,500	638,700	624,500	647,500	1 448,400
30.07.2022	14	657,100	672,700	657,100	661,500	1 429,600
30.07.2022	15	520,500	274,000	274,000	413,300	1 509,100
30.07.2022	16	488,900	243,300	243,300	403,400	1 526,100
30.07.2022	17	601,300	394,500	394,500	500,400	1 633,200
30.07.2022	18	774,800	642,100	642,100	667,400	1 506,900
30.07.2022	19	1 044,000	1 044,000	1 044,000	1 015,800	1 316,400

У таблиці 7.6 наведено порівняння результатів розрахунків за всіма чотирма алгоритмами. Наведено дані про суму абсолютних значень абсолютного відхилення та про те, скільки разів такі алгоритми виявилися точнішими за інші. Слід звернути увагу на два моменти:

1. Якщо за одну годину більш ніж один тип алгоритму виявився найточнішим (однаковий результат розрахунку прогнозу), то всі такі алгоритми вважаються найточнішими для відповідної години. Чим більше значення, тим більшу кількість разів алгоритм виявився точнішим.

2. Щодо суми абсолютних значень відхилень - ця величина є винятково інформативною для порівняння всіх алгоритмів та визначення того, який із них був ближчим до реальних даних за результатами аукціонів на РДН. Чим менше значення, тим точніший алгоритм.

Як видно з таблиці 7.6, алгоритм 4 показав якнайменше відхилення від реальних даних, так і найбільшу кількість разів, коли він був більш точним.

Таблиця 7.6. Порівняння результатів розрахунку алгоритмів, агрегованих даних про відхилення та кількість більш точних розрахунків.

Варіант	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3	Алгоритм 4
Сума модулів відхилень	224 284.7	249 400.7	249 763.7	219 057.9
Кількість більш точних розрахунків	322	201	196	360

Водночас застосування алгоритму 4 дає змогу як відкидати нетипові дні (що неможливо під час застосування алгоритма 1), так і відслідковувати нетипову поведінку учасників ринку в процесі подання заявок на РДН.

Алгоритмічна модель прогнозування погодинного попиту на сегменті РДН. Алгоритм розрахунку погодинного попиту на РДН (всі розрахунки виконуються для кожної години H) виконується згідно з такою процедурою:

1. Розраховується зміна акцепту на РДН за попередні 4 тижні w для днів $d - D-6$ і $D-7$, $D-13$ і $D-14$, $D-20$ і $D-21$, $D-27$ і $D-28$:

$$\Delta O_w^h = O_{d+1}^h - O_d^h$$

2. Розраховується сума окремо позитивних і негативних O_w^h :

$$O_{w, \text{поз}}^h = \sum \Delta O_w^h \text{ для } \Delta O_w^h > 0$$

$$O_{w,нег}^h = \sum \Delta O_w^h \text{ для } \Delta O_w^h < 0$$

3. Розраховується кількість окремо позитивних $K_{поз}^h$ для $\Delta O_w^h > 0$ і негативних $K_{нег}^h$ для $\Delta O_w^h < 0$.

4. Розраховується середньоарифметична сума абсолютних значень ΔO_w^h за формулою:

$$O_{срз,абс}^h = \frac{\sum |\Delta O_w^h|}{K_{поз}^h + K_{нег}^h}$$

5. Розраховується перша ітерація оберненого по модулю відносного відхилення $|\Delta O_w^h|$ від $O_{срз,абс}^h$ для всіх ΔO_w^h (так звана «вага відхилення») за формулою:

$$B_{w,вага,I}^h = 1 - \left| \frac{|\Delta O_w^h| - O_{срз,абс}^h}{O_{срз,абс}^h} \right|$$

Якщо значення $B_{w,вага,I}^h < 0$, це означає, що ΔO_w^h значно відхилюється, порівняно з іншими показниками, тому його необхідно відкинути, обнулити, зробити перерахунок (II ітерація) та розрахувати $K_{поз,ітер-ост}^h$, $K_{нег,ітер-ост}^h$ та $B_{w,вага,ітер-ост}^h$. Такі перерахунки (ітерації) робляться, поки не зникнуть значні відхилення. Максимальна кількість ітерацій може бути 4 (дорівнює кількості аналізованих ΔO_w^h).

6. Після останньої ітерації здійснюється розрахунок середнього значення суми $B_{срз,вага,ітер-ост}^h$ окремо для позитивних та негативних O_w^h , якщо кількість таких значень відмінна від 0:

$$B_{срз,вага,ітер-ост,поз}^h = \frac{\sum B_{w,вага,ітер-ост}^h}{K_{поз,ітер-ост}^h} \text{ для } \Delta O_w^h > 0, K_{поз,ітер-ост}^h < > 0$$

$$B_{срз,вага,ітер-ост,нег}^h = \frac{\sum B_{w,вага,ітер-ост}^h}{K_{нег,ітер-ост}^h} \text{ для } \Delta O_w^h < 0, K_{нег,ітер-ост}^h < > 0$$

7. Розраховується значення коригованого значення ваги для позитивних відхилень за такою формулою:

Якщо $K_{поз,ітес-ост}^h = 0$ або $K_{нег,ітес-ост}^h = 0$ або

$$K_{поз,ітес-ост}^h = K_{нег,ітес-ост}^h,$$

$$\text{то } B_{кориг}^h = 1,$$

$$\text{інакше: } B_{кориг}^h = \frac{K_{поз,ітес-ост}^h}{K_{нег,ітес-ост}^h} \cdot \frac{B_{сер,вага,ітер-ост,поз}^h}{B_{сер,вага,ітер-ост,нег}^h}$$

8. Розраховується кориговане значення $B_{w,вага,кориг}^h$ для позитивних ΔO_w^h за формулою:

$$B_{w,вага,кориг}^h = B_{w,вага,ітер-ост}^h * B_{кориг}^h \text{ для } \Delta O_w^h > 0$$

$$B_{w,вага,кориг}^h = B_{w,вага,ітер-ост}^h \text{ для } \Delta O_w^h < 0$$

9. Здійснюється розрахунок середньозваженого значення зміни попиту $\Delta O_{срзв}^h$ на РДН за формулою:

$$\Delta O_{срзв}^h = \frac{\sum (\Delta O_w^h * B_{w,вага,кориг}^h)}{\sum B_{w,вага,кориг}^h}$$

10. Прогнозне значення попиту на РДН розраховується за формулою:

$$O_D^h = O_{D-1}^h + \Delta O_{срзв}^h$$

Запропоновану алгоритмічну модель прогнозування погодинного попиту на РДН, яку можна застосувати для виконання щоденних практичних розрахунків, а також задля розв'язання завдань дослідження щодо аналізу тенденцій ціноутворення на РДН та ВДР, рівноважного стану ринку ЕЕ та відслідковування нетипової поведінки учасників ринку. На підставі зазначених розрахунків у сукупності з використанням математичної моделі рівноваги на РДН алгоритмічна модель прогнозування надає можливість здійснювати аналіз тенденцій ціноутворення на РДН разом із аналізом змін рівноважних цін на ринку ЕЕ. Також у випадку виникнення суттєвих розбіжностей між прогнозними та фактичними значення погодинного попиту на РДН є можливість виявити потенційну нетипову поведінку учасників ринку, яка потребує додаткової уваги та дослідження.

7.4. Модель збирання даних динаміки розвитку альтернативної електроенергетики

У цьому підрозділі на основі результатів роботи [143] розглянуто приклад розвитку КСМ щодо розширення можливостей інформаційного забезпечення вирішення завдань з управління процесом ціноутворення в умовах стрімкого розвитку застосування ГУ малої потужності в ОЕС України шляхом формування необхідного інформаційного ресурсу. Зокрема висвітлено питання щодо проектування інформаційної системи моніторингу стану та динаміки розвитку малих або малопотужних генеруючих об'єктів регіональних енергосистем, у складі яких постійно зростає кількість електростанцій на ВДЕ. Розроблено нову систему опису зазначених електростанцій за допомогою розширення переліку показників їх функціонування. На відміну від опису показників об'єктів виробників ЕЕ централізованої енергосистеми, додано їхню деталізацію на рівні регіональних енергосистем щодо видів енергетичних ресурсів, які використовуються для вироблення ЕЕ, а також характеристика їх приєднання до (високовольтних або розподільних) мереж передавання ЕЕ.

Формулювання задачі. Протягом останніх років в Україні і світі спостерігається стійкий розвиток малих або малопотужних електричних станцій, які використовують ВДЕ, та поступове заміщення ними традиційних способів генерації. Україна має значний потенціал відновлюваної енергетики, який може бути використаний для створення нових робочих місць, стимулювання економічної діяльності регіонів, зменшення залежності від імпорту енергоносіїв, оновлення застарілих основних виробничих фондів в електроенергетиці [144].

За даними Державного агентства з енергоефективності загальна частка енергії, виробленої з відновлюваних джерел, у валовому кінцевому енергоспоживанні зросла від 4% у 2014 році до 9,2% у 2020 році [145]. Наразі електроенергетика, що використовує ВДЕ та інші альтернативні

джерела енергії, в Україні нараховує вже понад 950 компаній, потужність електростанцій яких складає близько 8115 МВт (станом на липень 2022 року) [146].

У новому Національному плані дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року [147] визначено індикативну ціль споживання енергії, виробленої об'єктами відновлюваної енергетики, у 2030 році на рівні 27% (зокрема в секторах електроенергетики — 25%, опалення та охолодження — 35%, транспорту — 14%).

Проте такий стрімкий розвиток створює певні загрози для централізованої енергетичної системи, зокрема технічні проблеми резервування потужності в ЕС через складність інтеграції об'єктів відновлюваної енергетики в ЕС (сонячної та вітрової генерації) у зв'язку із важкістю прогнозування виробництва ЕЕ на таких об'єктах [13]. Крім того, підтримка ВДЕ викликає зростання фінансового навантаження на бюджет України, що обумовлене значним перевищенням середнього розміру «зеленого» тарифу (спеціальний тариф на купівлю ЕЕ у електростанцій на ВДЕ) над середньою ціною реалізації цієї ЕЕ на організованих сегментах ринку ЕЕ України [148].

Через військову агресію Росії на території України було знищено або пошкоджено значну частину об'єктів електроенергетики в цілому і об'єктів відновлюваної енергетики зокрема, особливо на півдні та сході держави. Після закінчення війни ефективний розвиток електроенергетичної галузі потребуватиме суттєвого відновлення. Зокрема будуть необхідні сучасні інформаційні системи моніторингу для збирання, зберігання, змістовного оброблення даних, які характеризують стан об'єктів альтернативної енергетики та динаміку їхнього розвитку, зокрема й об'єктів електроенергетики на ВДЕ та інших джерелах. Тому актуальним є створення інформаційної системи моніторингу динаміки стану розвитку альтернативної електроенергетики як складової загальної системи

інформаційно-аналітичного забезпечення КСМ задля вирішення завдань щодо підтримки прийняття рішень стосовно розвитку електроенергетичної галузі.

Аналіз сучасного стану інформаційного забезпечення. Аналіз перспектив розвитку відновлюваної енергетики відображено в роботах [149-153]. Сучасні засоби збирання й оброблення даних досліджено в публікації [154, 155] та в роботах інших авторів. Водночас необхідність використання нових інструментів для сценарного аналізу даних про розвиток електроенергетичної галузі і їх застосування для розроблення регуляторних механізмів стимулювання та підтримки розвитку об'єктів альтернативної електроенергетики потребують подальшого розвитку інформаційних систем як засобів інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень, зокрема формування нових структур даних про реальні зміни в електроенергетичному виробництві в умовах швидкого розвитку ВДЕ. Тому що саме наявність необхідного масиву кількісних та якісних вихідних даних та їхня достовірність значною мірою визначають результати розв'язання задач щодо сценарного аналізу вибору найбільш перспективного напрямку розвитку галузі.

Наразі з наявних альтернативних джерел інформації щодо виробників ЕЕ доступними є реєстри виробників за «зеленим» тарифом на державних електронних ресурсах, зокрема на сайтах ДП «Гарантований покупець» [146]. Ці реєстри містять дані про найменування та розташування об'єктів альтернативної енергетики, інформацію про суб'єктів господарювання, що мають у користуванні об'єкти альтернативної електроенергетики, дані щодо джерела енергії, що використовує об'єкт для генерації ЕЕ, дату встановлення та розмір «зеленого» тарифу. Реєстри доступні у PDF-форматі, з часом інформація доповнюється й оновлюється.

Проте обсяг даних, що міститься в реєстрах, є недостатнім для розв'язання окреслених задач (зокрема відсутня інформація про тип мережі

приєднання до ОЕС, до якої приєднаний об'єкт, у якому регіоні він розташований, актуальний статус об'єкта, тощо). Також на ресурсі ДП «Гарантований покупець» міститься погодинна інформація щодо фактичного відпуску ЕЕ виробниками з альтернативних джерел, з якими співпрацює компанія.

Додатково існує сервіс Energy Map [156], який акумулює офіційні бази даних про всі сектори енергетики України, перетворює їх у зручний для аналізу формат та дає змогу відстежувати і вчасно реагувати на зміни галузі. Сервіс містить інформацію про назву та місце розташування об'єктів ВДЕ, вид альтернативного джерела енергії, назву та код Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України (ЄДРПОУ) компанії-власника об'єкта ВДЕ, розмір «зеленого» тарифу та дату його встановлення. Проте інформація потребує уточнення та доповнення (відсутні дані про тип мережі приєднання до ОЕС, актуальна інформація про стан діяльності об'єкта).

Детальна інформація про об'єкти відновлюваної енергетики міститься також на ресурсі ENERGO.UA [157], зокрема такі дані про об'єкти з ВДЕ, як назва та місце розташування, вид альтернативного джерела, встановлені потужності, місячний фактичний відпуск ЕЕ. Проте інформація, що є у вільному доступі, потребує попереднього збору та верифікації. Також відсутні дані щодо типу мереж, до яких підключені електростанції.

Отже, наразі немає єдиного інформаційного ресурсу, що містить інтегровані дані про об'єкти альтернативної електроенергетики, яку можна використати для моніторингу та аналізу стану розвитку відновлюваної електроенергетики, вивчення можливостей щодо розроблення регуляторних механізмів стимулювання її розвитку відновлюваної енергетики на рівні регіональних енергосистем ОЕС України. Тому розроблення інформаційної системи моніторингу, що містить інтегровані дані про об'єкти альтернативної енергетики як складової КСМ процесів ціноутворення є актуальною і важливою.

Постановка задачі і призначення інформаційного ресурсу. За Законом України про альтернативні джерела енергії [158] альтернативна енергетика — це сфера енергетики, що забезпечує вироблення електричної, теплової та механічної енергії з альтернативних джерел енергії (енергія сонячна, вітрова, геотермальна, гідротермальна, аеротермальна, енергія хвиль та припливів, гідроенергія, енергія біомаси, газу з органічних відходів, газу каналізаційно-очисних станцій, біогазів та вторинні енергетичні ресурси, до яких належать доменний та коксівний газ, газ метан дегазації вугільних родовищ, перетворення скидного енергопотенціалу технологічних процесів). До ВДЕ належать відновлювані невикопні джерела енергії, а саме енергія сонячна, вітрова, аеротермальна, геотермальна, гідротермальна, енергія хвиль та припливів, гідроенергія, енергія біомаси, газу з органічних відходів, газу каналізаційно-очисних станцій, біогазів.

Варто зазначити, що Україна уже має багаторічний досвід розвитку альтернативної генерації [149-153], який можна проаналізувати, визначити його переваги й недоліки, а також використати, зокрема, у дослідженні та вивченні таких задач, як-от:

- аналіз й візуалізація стану розвитку, виявлення динаміки та інтенсивності розвитку відновлюваної енергетики в державі та регіонах;
- виявлення регіонів зі значним домінуванням сонячних та вітряних станцій, зокрема, з метою передбачення можливих проблем із резервування потужності ОЕС та пропонування шляхів їх розв'язання;
- встановлення залежності зміни структури споживання ЕЕ від зміни структури виробництва ЕЕ виробниками з використанням альтернативних джерел енергії;
- визначення потенційних шляхів розвитку об'єктів ВДЕ та розроблення регуляторних механізмів стимулювання розвитку об'єктів відновлюваної електроенергетики залежно від регіону розміщення;

- формування та обробка ретроспективних даних для розроблення нових методів прогнозування відпуску ЕЕ об'єктами альтернативної енергетики;

- вивчення можливості й перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем із метою запровадження Smart-договорів (контрактів) для локальних децентралізованих мікроринків ЕЕ;

- виявлення перспектив розвитку об'єктів ВДЕ в межах приєднання України до ЕС континентальної Європи ENTSO-E;

- оцінювання наслідків військового вторгнення Росії в Україну для відновлюваної енергетики та визначення шляхів їх подолання.

Для розв'язання цих задач як складових системних інформаційно-аналітичних досліджень у контексті відстеження та коригування динаміки процесу ціноутворення в складних умовах інтеграції установок альтернативної генерації в централізовану ОЕС потрібно зібрати та обробити вихідні масиви даних відповідно до принципів об'єктноорієнтованого моделювання під час створення інформаційно-аналітичних та інформаційно-моделюючих систем [56, 105-108], а саме інформацію про такі аспекти.

1. Об'єкти альтернативної електроенергетики (назва, регіон розташування (область України), адреса фізичного розташування, вид джерела енергії, встановлена потужність, тип мережі, до якої підключений об'єкт (магістральна або розподільна), дата й розмір встановлення зеленого тарифу для об'єкта, статус (об'єкт у розробленні, активний, припинив діяльність, немає інформації (для об'єктів на тимчасово окупованих територіях)).

2. Суб'єкти альтернативної електроенергетики, яким належать об'єкти (назва, код ЄДРПОУ, юридична адреса, дата рішення про видачу ліцензії (дата набуття ліцензії суб'єктом на виробництво ЕЕ), статус

(працює, не працює, немає інформації (для об'єктів на тимчасово окупованих територіях)).

3. Дані про діяльність об'єктів (фактичний відпуск ЕЕ).

4. Інша аналітична та (або) статистична інформація про об'єкт дослідження у зв'язку з конкретним дослідницьким завданням.

Крім того відбудова та розвиток альтернативної електроенергетики України потребує вивчення та оцінювання стану її об'єктів, створення інформаційної системи моніторингу з розвинутими засобами обробки даних, зокрема зі створенням інформаційно-технологічної карти показників розвитку її об'єктів за регіонами за такими показниками:

1) за видами: сонячні електростанції (СЕС); вітрові електростанції (ВЕС); гідроелектростанції (ГЕС); електростанції, що використовують енергію біомаси (Біомаса), газу з органічних відходів, газу каналізаційно-очисних станцій: біогазів (Біогаз) та ін.;

2) за приєднанням до мереж: розподільні або магістральні мережі;

3) за обсягами приєднання: малі, середні, великі;

4) з урахуванням виду діяльності: виробництво, активне споживання, виробництво-споживання.

Створена інформаційно-моніторингова система в КСМ дає змогу здійснювати збір і систематизацію актуальної інформації про об'єкти, що використовують альтернативні джерела енергії, з необхідною дискретністю в часі, та розширює можливості для її подальшого використання в розв'язанні наукових і практичних задач. Предметна область — об'єкти відновлюваної генерації. Потенційні користувачі — виробники з альтернативних джерел (для визначення та аналізу ринку й розв'язання інших задач у своїй діяльності), оператори системи розподілу й передачі (наприклад, для виявлення та попередження проблем із резервуванням потужності), інші (зокрема, учасники ринку ЕЕ для використання даних у своїй бізнес-діяльності та прийнятті рішень у процесі ціноутворення).

В інформаційній системі передбачена можливість підготовки та формування узагальнених даних за регіонами, суб'єктами, видом генерації за різні періоди, залежно від вимог до вихідних конкретних завдань дослідження. Інформаційний масив та тип даних містить такі основні атрибути структури:

1) Ключ об'єкта — унікальний запис, який однозначно визначає об'єкт у масиві (тип даних — ціле число).

2) Назва об'єкта — інформація, що описує об'єкт (тип даних — текст).
Регіон розташування — відповідна область України, де фізично розташований об'єкт (тип даних — текст).

3) Адреса розташування — повна адреса фізичного розташування об'єкта (тип даних — текст).

4) Вид генерації — дані про джерело альтернативної енергії — СЕС, ВЕС, ГЕС, Біомаса, Біогаз (тип даних — текст).

5) Встановлена потужність об'єкта альтернативної електроенергетики (тип даних — дійсне число).

6) Тип мережі, до якої підключений об'єкт, — розподільна або високовольтна (тип даних — текст).

7) Дата встановлення «зеленого» тарифу для об'єкта (тип даних — дата) та розмір «зеленого» тарифу, встановлений для об'єкта (тип даних — дійсне число).

8) Статус об'єкта — об'єкт у розробці, активний, припинив діяльність, немає інформації (для об'єктів на тимчасово окупованих територіях) (тип даних — текст).

9) Дата припинення діяльності об'єкта — заповнюється, якщо об'єкт більше не працює (тип даних — дата)

10) Код ЄДРПОУ компанії, якій належить об'єкт, (тип даних — текст), назва компанії, якій належить об'єкт (тип даних — текст), юридична адреса компанії, якій належить об'єкт (тип даних — текст), дата рішення

про видачу ліцензії виробнику ЕЕ за «зеленим» тарифом (тип даних — дата).

11) Статус суб'єкта — працює, не працює, немає інформації (для об'єктів на тимчасово окупованих територіях) (тип даних — текст).

Уся необхідна інформація про об'єкти й суб'єкти альтернативної електроенергетики сформовано з різних відкритих джерел, проте проведено роботу щодо її збирання, уточнення та верифікації. Водночас передбачена можливість актуалізації даних, а також їх поповнення новими об'єктами відновлюваної електроенергетики.

Сформовано й реалізовано в Ехсел описаний вище інформаційний ресурс, частина якого зображена на рис. 7.8., масив даних за період з 01.07.2019 р. по 31.12.2021 р. (погодинні дані). Частину інформаційного ресурсу, сформованого за допомогою Ехсел, наведено на рис. 7.9.

Ключ об'єкта	Назва	Регіон розташування	Адреса розташування	Вид генерации	Встановлена потужність, МВт*год	Тип мережі присідання	Дата встановлення "зеленого" тарифу	Розмір "зеленого" тарифу, коп/кВт*год	Статус об'єкта	Дата припинення діяльності об'єкта	Код ЄДРПОУ	Назва суб'єкта	Юридична адреса суб'єкта	Дата рішення про видачу ліцензії	Статус суб'єкта
14	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	АР КРИМ	СИМСЕС	-	-	-	01.01.2012	-	Н/І	-	37171765	ТОВ "ГАММА СО	АВТОНОМНА І	28.12.2011	Н/І
15	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ОДЕСЬКА ОБЛ.	СЕС	-	21,1816	розподіль	01.07.2012	774,59	активний	-	37058077	ТОВ "ФРАНКО С	ОДЕСЬКА ОБЛ.	21.06.2012	активний
16	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	АР КРИМ	САКСЕС	-	-	-	01.05.2012	-	Н/І	-	36905408	ПрАТ "ОУЛ СОЛ	АР КРИМ, М. С	19.04.2012	Н/І
17	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ОДЕСЬКА ОБЛ.	СЕС	-	21,769044	розподіль	05.07.2012	774,59	активний	-	37058103	ТОВ "ФРАНКО П	ОДЕСЬКА ОБЛ.	05.07.2012	активний
18	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ВІННИЦЬКА	ОЕСЕС	-	0,035	розподіль	01.01.2011	774,59	активний	-	37058475	ТОВ "ВІННИЦЬ-Е	М. ВІННИЦЬ, В	09.12.2010	активний
19	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ВІННИЦЬКА	ОЕСЕС	-	0,99985	розподіль	01.01.2011	774,59	активний	-	37058475	ТОВ "ВІННИЦЬ-Е	М. ВІННИЦЬ, В	09.12.2010	активний
20	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ЗАКАРПАТСЬК	СЕС	-	5,40702	розподіль	16.08.2012	774,59	активний	-	37784089	ТОВ "СОНЯЧНА	І ЗАКАРПАТСЬК	19.07.2012	активний
21	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ЗАКАРПАТСЬК	СЕС	-	9,9936	розподіль	16.08.2012	774,59	активний	-	37784089	ТОВ "СОНЯЧНА	І ЗАКАРПАТСЬК	19.07.2012	активний
22	Сонячна електро	Запорізька	Запорізька обл	СЕС	6	розподіль	15.12.2016	425,36	не працює	19.05.2020	37581105	ТОВ "ТОКМАК С	ЗАПОРІЗЬКА О	20.09.2012	не працює
23	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Запорізька	ЗАПОРІЗЬКА О	СЕС	4,01798	розподіль	15.12.2016	774,59	активний	-	40973044	ТОВ "САНТАЛЕКІ	М. ЗАПОРІЖЖ	08.12.2016	активний
24	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ОДЕСЬКА ОБЛ.	СЕС	-	21,51644	розподіль	04.10.2012	774,59	активний	-	36965561	ТОВ "ДУНАЙСЬК	ОДЕСЬКА ОБЛ.	24.09.2012	активний
25	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	ОДЕСЬКА ОБЛ.	СЕС	-	21,6183	розподіль	22.10.2012	774,59	активний	-	36965598	ТОВ "ДУНАЙСЬК	ОДЕСЬКА ОБЛ.	22.10.2012	активний
26	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Черкаська	ЧЕРКАСЬКА ОБ	СЕС	31,92	розподіль	29.11.2012	402,84	активний	-	36783152	ТОВ "ЧИСТА ЕН	Е ЧЕРКАСЬКА О	25.10.2012	активний
27	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Одеська	ОДЕСЬКА ОБЛ.	СЕС	21,3851	розподіль	06.12.2012	774,59	активний	-	36881398	ТОВ "ЛИМАНСЬ	ОДЕСЬКА ОБЛ.	29.11.2012	активний
28	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Одеська	ОДЕСЬКА ОБЛ.	СЕС	21,98339	розподіль	06.12.2012	774,59	активний	-	36881382	ТОВ "ЛИМАНСЬ	ОДЕСЬКА ОБЛ.	06.12.2012	активний
29	САМБІРСЬКА СО	Львівська	Львівська ОБ	СЕС	3,11672	розподіль	20.12.2012	774,59	активний	-	36808350	ТОВ "САМБІРСЬ	Львівська ОБ	13.12.2012	активний
30	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Вінницька	ВІННИЦЬКА О	СЕС	0,997845	розподіль	24.12.2012	774,59	активний	-	38135211	ТОВ "ЕКОСОЛА	Р М. ВІННИЦЬ, В	24.12.2012	активний
31	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Вінницька	ВІННИЦЬКА О	СЕС	0,99987	розподіль	27.12.2012	774,59	активний	-	38135183	ТОВ "ЄВРОСОЛА	М. ВІННИЦЬ, В	24.12.2012	активний
32	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Харківська	М. ХАРКІВ, ВУ	СЕС	0,106	розподіль	26.12.2012	774,59	активний	-	34952770	ТОВ "ФРУНЗЕ СО	М. ХАРКІВ, ВУ	14.02.2013	активний
33	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Миколаївська	МИКОЛАЇВСЬК	СЕС	29,30664	розподіль	07.03.2013	774,59	активний	-	37326260	ПрАТ "НЕПТУН	С МИКОЛАЇВСЬ	25.02.2013	активний
34	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Івано-Фран	ІВАНО-ФРАНКІ	СЕС	2,8028	розподіль	25.04.2013	774,59	активний	-	38370298	ТОВ "СОНЯЧНА	І ІВАНО-ФРАНКІ	18.04.2013	активний
35	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Вінницька	ВІННИЦЬКА О	СЕС	0,30276	розподіль	25.04.2013	774,59	активний	-	37908677	ТОВ "ВІНСОЛА	Р" ВІННИЦЬКА О	05.04.2013	активний
36	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Вінницька	ВІННИЦЬКА О	СЕС	1,27699	розподіль	10.10.2013	774,59	активний	-	37908677	ТОВ "ВІНСОЛА	Р" ВІННИЦЬКА О	05.04.2013	активний
37	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Вінницька	ВІННИЦЬКА О	СЕС	0,75	розподіль	19.05.2016	495,95	активний	-	37908677	ТОВ "ВІНСОЛА	Р" ВІННИЦЬКА О	05.04.2013	активний
38	СОНЯЧНА ЕЛЕКТ	Вінницька	ВІННИЦЬКА О	СЕС	0,864	розподіль	06.04.2017	466,66	активний	-	37908677	ТОВ "ВІНСОЛА	Р" ВІННИЦЬКА О	05.04.2013	активний

Рисунок 7.8. Масив даних об'єктів альтернативних джерел енергії

A	B	C	D	E
Область	Джерело	Доба постачання	год	Значення, кВт*год
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	1	12253
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	2	12334
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	3	12308
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	4	12339
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	5	12268
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	6	12330
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	7	12413
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	8	12394
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	9	12421
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	10	12335
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	11	12275
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	12	12303
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	13	12346
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	14	12370
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	15	12368
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	16	12159
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	17	12129
Вінницька	Біогаз	01.01.2020	18	12168
2019	2020 ч1	2020 ч2	2021 ч1	2021 ч2

Рисунок 7.9. Масив даних погодинного фактичного відпуску ЕЕ з альтернативних джерел енергії

7.5 Висновки до розділу 7

1. На основі проведеного аналізу методів та засобів побудови моделей короткострокового прогнозування запропоновано методику дослідження часових рядів та утворення моделі оперативного прогнозування показників стану ринку ЕЕ (цін, обсягів) в режимі, близькому до реального часу. Застосування методики дасть змогу автоматизувати, визначити формальні ознаки і спростити процеси утворення системи моделей прогнозування показника, адекватного до поточного стану функціонування ринку із прийнятною оцінкою точності результату прогнозування

2. Розроблено модель формування прогнозної ціни контракту для постачальників, особливість якої полягає в тому, що вона дає змогу враховувати вплив чинників ризику для формування ціни контрактації як із купівлі ЕЕ, так і під час продажу її кінцевому споживачеві на основі використання інформаційного-методичного ресурсу КСМ задля підвищення інформативності постачальників та споживачів.

3. Розроблено алгоритмічну модель прогнозування погодинного попиту на РДН на основі використання комбінації двох методів експоненційного згладжування та вибірці максимальної подоби, яку можна застосовувати для виконання щоденних практичних розрахунків, а також задля розв'язання задачі щодо дослідження тенденцій ціноутворення на РДН та ВДР, рівноважного стану ринку ЕЕ та відслідковування нетипової поведінки учасників ринку. На підставі зазначених розрахунків у сукупності з використанням математичної моделі рівноваги на РДН алгоритмічна модель прогнозування надає можливість здійснювати аналіз тенденцій ціноутворення на РДН разом із аналізом змін рівноважних цін на ринку ЕЕ.

4. Розроблено інформаційно-моніторингову систему як складову в КСМ, предметна область якої — об'єкти альтернативної генерації, що дає змогу збирати й систематизувати актуальну інформацію про об'єкти, що використовують альтернативні джерела енергії, з необхідною дискретністю в часі та розширює можливості для її подальшого використання в розв'язанні наукових і практичних задач з електроенергетики.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна проблема розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу формування цін у СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації інформаційно-технологічного забезпечення вирішення задач моделювання й обчислення у процесі ціноутворення.

Під час виконання дисертаційної роботи були отримані наступні теоретичні та практичні результати.

1. Запропоновано математичний опис процесу ціноутворення у СОТС як сукупності формалізованих дій з виробництва та споживання товару в реальних умовах організаційної, технологічної та інформаційної взаємодії суб'єктів товарного ринку. Від відомих запропонований опис відрізняється способом формалізації такого процесу шляхом його подання у вигляді двох взаємопов'язаних графів потокорозподілу товару та його вартості з різним кількісним складом вузлів, які названо локальними вузлами ціноутворення.

2. Запропоновано метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку ЕЕ для аналізу динаміки змін ціни в вузлах всього ланцюгу фізичного та економічного потокорозподілу від виробника до кінцевого споживача з використанням обчислювальних процедур визначення індексів цін. Відмінна особливість методу від відомих полягає у його здатності відображати зміни цін та обсягів ЕЕ у підсистемах, елементарних вузлах та вулових точках СОТС ціноутворення, з урахуванням впливу як внутрішніх, так і зовнішніх факторів.

3. Розроблено, з використанням методу вузлової трансформації, алгоритмічну модель аналізу динаміки попиту на ЕЕ на ціноутворюючих сегментах оптового ринку задля якісної оцінки стану процесу ціноутворення ринку. Результати розрахунково-експериментальних досліджень моделі із застосуванням реальних даних змін цін та обсягів

дають можливість отримати інформацію про динаміку погодинного профілю середніх обсягів і цін продажу, посезонному профілю середньогодинних обсягів продажу та дозволяють зробити відповідні висновки про наявність якісної залежності середньої ціни РДН від зміни структури обсягів акцептованої ЕЕ на відповідних сегментах ринку.

4 Розроблено мультиагентне подання процесу ціноутворення ринку ЕЕ, а саме функціональний опис агентів у мультиагентній системі ціноутворення та архітектуру агента в інтегрованій мультиагентній системі ціноутворення. На відміну від відомих таке подання відрізняється наявністю у складі агентів зовнішнього середовища, яке впливає на процес ціноутворення. На його основі побудовано мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення у вигляді кортежу сукупності певних множин імітованих агентів та множини агентів впливу зовнішнього середовища.

5. Розроблено агентно-орієнтовану архітектуру комунікаційного середовища взаємодії агентів у процесі ціноутворення у вигляді сукупності множин автономних агентів, агентів навколишнього та агентів зовнішнього середовища в єдиному просторі комп'ютерної системи моделювання у складі системи управління і координації, системи комунікації і математичного та інформаційно-технологічного забезпечення, як гетерогенної розподіленої системи взаємопов'язаної організаційної, інформаційної, технологічної та економічної взаємодії агентів у єдиному процесі ціноутворення в СОТС ринку ЕЕ.

6. Розроблено метод кількісної оцінки рішень щодо сполучення сегментів ринків ЕЕ «на добу наперед» України та європейських міждержавних бірж ЕЕ задля забезпечення детального аналізу результатів сполучення ринків ЕЕ. Особливості застосування запропонованого методу продемонстровано на прикладі аналізу результатів сполучення ринків ЕЕ України та Молдови. Отримані результати розрахунків підтверджують, що

метод дає можливість приймати обґрунтовані рішення на етапі підготовки до інтеграції сегменту ринку «на добу наперед» України з європейськими ринками ЕЕ. Показано, що утворена на основі застосування запропонованого методу імітаційна модель може використовуватися і для більш ґрунтовних досліджень перспектив сполучення РДН України із ринками ЕЕ інших суміжних країн.

7. Розроблено математичну та комп'ютерну модель оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту РДН задля визначення рівноважної ціни ЕЕ на підставі цінових заявок виробників та постачальників ЕЕ. Модель представлено у вигляді нелінійної задачі, що містить два типи невідомих змінних – ціло числові змінні, значення яких відображають ринкові рішення щодо акцепту заявок на купівлю та продаж ЕЕ, та дійсні змінні, які визначають рівноважні ціни для кожного розрахункового періоду часу. В процесі виконання тестового порівняльного завдання встановлено: результати розрахунку цін, які отримано за допомогою запропонованого алгоритму, практично не відрізняються від результатів, отриманих за допомогою діючої моделі Оператора ринку, що є підтвердженням адекватності процесу ціноутворення на аукціоні. Витрати часу на отримання розв'язків задач змішаного ціло числового програмування істотно менше фактичного часу та не перевищували 0.03 с, що свідчить про високу швидкість отримання розв'язку сформульованої оптимізаційної задачі.

8. Розроблено комп'ютерну модель для розрахунку ціни та обсягів в пропозиціях теплових електростанцій на аукціон сегменту ринку «на добу наперед». Проведено порівняльні розрахунково-експериментальні дослідження моделі, що підтверджують її адекватність. Відхилення цін у взятій для практичної реалізації комп'ютерної програми розробленої імітаційній моделі від фактичної ціни ТЕС попередньої моделі ОРЕ становить 6,8 %, а відхилення середньозважених цін на РДН за 2 півріччя

2019 року становить близько 9%, що відповідає попереднім розрахункам, які виконані, ще у 2017 році та свідчить про адекватність розробленої моделі.

9. Розроблено теоретичні засади створення КСМ функціонування ринку ЕЕ та процесів ціноутворення на ньому за принципами об'єктно-орієнтовного моделювання, які забезпечують автоматизацію процесів уніфікованого збирання, накопичення та візуалізацію інформації про процеси функціонування ринку ЕЕ у зручній єдиній формі для різних його суб'єктів. Це, в свою чергу, дозволило розробити інформаційно-моніторингову систему як складову КСМ, предметна область якої – об'єкти альтернативної генерації, яка дає можливість здійснювати збір і систематизацію актуальної інформації про об'єкти, що використовують альтернативні джерела енергії, з необхідною дискретністю у часі.

10. Розроблено програмно-апаратне середовище КСМ процесу ціноутворення, яке базується і орієнтоване на утворенні в складі системи структурних підсистем-програмних модулів з інформаційно-моделюючої та інформаційно-розрахункової підсистем. Комплексна взаємодія цих підсистем забезпечується єдиним інформаційним простором, утвореним інформаційно-довідковими модулями різного призначення. Програмно-апаратне середовище КСМ утворює єдиний програмний продукт організації і розгортання інтерфейсів в режимі онлайн засобами Internet-середовища для супроводу діючих та створення нових функціональних задач організаційного управління процесом ціноутворення на ринку ЕЕ.

11. Розроблено модель формування прогнозової ціни контракту для постачальників, відмінна риса якої полягає у можливості враховувати вплив чинників ризику для формування ціни контрактації як із купівлі ЕЕ, так і під час продажу її кінцевому споживачеві, на основі використання інформаційного-методичного ресурсу комп'ютерної системи моделювання задля підвищення інформативності постачальників та споживачів.

12. Розроблено алгоритмічну модель прогнозування погодинного попиту на ЕЕ на РДН, відмінна риса якої полягає у використанні комбінації двох методів – експоненційного згладжування та вибірки максимальної подоби. Таку модель може бути застосовано для виконання щоденних практичних розрахунків, а також для вирішення задачі дослідження тенденцій ціноутворення на РДН та ВДР, рівноважного стану ринку ЕЕ та відслідковування нетипової поведінки учасників ринку ЕЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про ринок електричної енергії» № 2019-VIII від 13.04. 2017 р. [Електронний ресурс]. [сайт] Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. (Дата звернення : 17.08.19).
2. НКРЕКП. Про затвердження Правил ринку. Постанова №307 від 14.03.2018 р. [Електронний ресурс] : [сайт] Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> - (Дата звернення: 10.10.19).
3. НКРЕКП. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Постанова №308 від 14.03.2018 р. [Електронний ресурс] : [сайт] Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/page#Text> - (Дата звернення: 10.10.19).
4. Берталанфи Л. Фон. Общая теория систем: критич. обзор Л. Фон Берталанфи ; пер. с англ. под ред. В.Н. Садовского, Э.Г. Юдина. *Сборник переводов Исследования по общей теории систем*. - М. : – Прогресс, 1969. – С. 23–82.
5. Месарович М. Общая теория систем: математические основы : пер. с англ. пер. с англ. Э.Л. Наппельбаума, под ред. С.В. Емельянова. - М. : Мир, 1978. – 311 с.
6. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техника, 1975. 312 с.
7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. *М.Наука*, 1978, 400 с.
8. Михалевич В.С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных. *М.Наука*, 1982. – 286 с.
9. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. *Выща шк. Головное изд-во*, 1988. – 359 с.

10. Томашевський В.М. Моделювання систем. *Київ: Видавнича група ВНУ*, 2005, 352 с.
11. Находов В., Замулко А. Усовершенствование новой модели рынка электроэнергии путем управления режимами электропотребления (научное мнение). <http://reform.energy/news/usovershenstvovanie-novoy-modeli-rynka-elektroenergii-putem-upravleniya-rezhimami-elektropotrebleniya-nauchnoe-mnenie-13412>. (Дата звернення: 15.01.20).
12. Праховник А.В., Попов В.А., Ярмолук Е.С., Кокорина М.Т. Перспективы и пути развития распределенной генерации в Украине. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2012, №2, с.7 – 14.
13. Євдокімов В.А. Деякі питання дослідження технічного і організаційно-економічного впливу розподіленої генерації на функціонування енергосистеми та ринок електричної енергії. *Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць*. Київ: 2019, вип. № 88, с. 134 - 143.
14. Chiradeja P., An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation. P. Chiradeja R. Ramakumar. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 2004, Vol. 19, № 4, p.764-773.
15. Donnelly M.R Impact of the Distributed Utility on Transmission System Stability. M.R. Donnelly, J.E. Dagle, D.J. Trudnowski, G.J. Riders. *IEEE Trans. Power Systems*, 1996, Vol.11, № 2, p.741-746.
16. Jenkins N. Embedded Generation. N. Jenkins, R. Allan., P. Grossley., D. Kirschen, G. Strbac. *London; IEE*, 2000, 273 p.
17. Batrinu F., Current Issues on Operation and Management of Distributed Resources. F.Batrin, G. Chicco, R. Pomrube, P. Postolache, C. Toader. *5th Int. World Energy System Conf., Oradea, Romania*, May 17-19, 2004, p.31-36.
18. Barker Ph. P., Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems / Ph. P. Barker, R.W. De

Mello. 2000 *IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA*, July 11-15, 2000, p.222-233.

19. Jimeno J., Laresgoiti I., Oyarzabal J., Stene B., Bacher R. Architectural Framework for the Integration of Distributed Resources. J. Jimeno, I. Laresgoiti, J. Oyarzabal, B. Stene, R Bacher. 2003 *IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy*, June 23-26, 2003, p.91-96.

20. Meliopoulos A.P.S. Distributed Energy Sources: Needs for Analysis and Design Tools / A.P.S Meliopoulos. 2001 *IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada*, July 15-19, 2001, p.143-147.

21. Woo C.K., King M., Tishler A., Chow L.C. H. Cost of electricity deregulation. *Energy*, 2006, Vol. 31, pp. 747–768.

22. Денисюк С.П., Махлін П.В., Шрам О.А., Слінько В.М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями). *Технічна електродинаміка*, 2022, № 1, с. 41—49.
<https://doi.org/10.15407/techned2022.01.041>

23. Саух С.Е. Методология и методы математического моделирования энергетики в рыночных условиях. *Электрон. моделирование*, 2018, 40, №3, с. 3 – 32.

24. Lukashevych Y, Evdokimov V, Polukhin A, Maksymova I, Tsvilii D. Innovation In The Energy Sector: The Transition To Renewable Sources As A Strategic Step Towards Sustainable Development. *AFRICAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH*. 2024. 10(1), P. 43–56. ISSN:2408-7920 (Scopus).
<https://doi.org/10.26437/ajar.v10i1.665>.
<https://www.ajaronline.com/index.php/AJAR/article/view/665>

25. Fridgeirsson, T. V., Ingason, H. T., & Onjala, J. (2023). Innovation, awareness and readiness for climate action in the energy sector of an emerging economy: the case of Kenya. *Sustainability (Switzerland)*, 15(17).
<https://doi.org/10.3390/su151712769>.

26. Grafström, J., Söderholm, P., Gawel, E., Lehmann, P., & Strunz, S. (2023). *Government support to renewable energy R&D: drivers and strategic interactions among EU Member States. Economics of Innovation and New Technology*, 32(1), pp. 1–24. <https://doi.org/10.1080/10438599.2020.1857499>.
27. Javed, A., Rapposelli, A., Khan, F., & Javed, A. (2023). The impact of green technology innovation, environmental taxes, and renewable energy consumption on ecological footprint in Italy: Fresh evidence from novel dynamic ARDL simulations. *Technological Forecasting and Social Change*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122534>.
28. Laur, I., & Berntzen, L. (2023). Opposing forces of business model innovation in the renewable energy sector: Alternative patterns and strategies. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation*. <https://doi.org/10.1177/14657503231194727>.
29. Majeed, Y., Khan, M. U., Waseem, M., Zahid, U., Mahmood, F., Majeed, F. Raza, A. (2023). ‘Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture’, *Energy Reports*, 10, 344–359. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.032>.
30. Maksymova, I., & Kurylyak, V. (2022). World industry digitization in the context of ensuring climate neutralit. *Journal of European Economy*, 21(3), 343–360. <https://doi.org/10.35774/jee2022.03.343>.
31. Pinheiro, A. B., Panza, G. B., Berhorst, N. L., Toaldo, A. M. M., & Segatto, A. P. (2023). Exploring the relationship between ESG, innovation, and economic and financial performance: evidence from the energy sector. *International Journal of Energy Sector Management*, 18(3), 500–516. <https://doi.org/10.1108/IJESM-02-2023-0008>.
32. Sun, Y., Shen, S., & Zhou, C. (2023). Does the pilot emissions trading system in China promote innovation? Evidence based on green technology

innovation in the energy sector. *Energy Economics*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.10698>.

33. Samir, B., Abi Akle, A., & Lizarralde, I. (2023). A multi-objective decision-making approach to support the design of social innovations in the energy sector. *Proceedings of the Design Society*, 3, 313–322. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.32>

34. Julius Trebbien, Anton Tausendfreund, Leonardo Rydin Gorjão, Dirk Witthaut. Patterns and correlations in European electricity prices. *Chaos* 34, 073108 (2024); doi: 10.1063/5.0201734 · 2 July 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0201734>.

35. Директива Європейського парламенту та Ради №2009/72/ЄС від 13 липня 2009 року про спільні правила внутрішнього ринку електроенергії. 2009. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0072> (дата звернення: 11.03.2021).

36. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження Кабінету Міністрів від 18 серпня 2017 р. № 605 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>. (дата звернення: 09.04.2022).

37. Геєц В.М. Економіка України в імперативах низьковуглецевого розвитку. Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. *Вісник Національної академії наук України*, 2022, № 3, с. 8-17. <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.00>.

38. Кириленко О.В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. *Вісник НАН України*, 2022, № 3, с. 18- <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018>.

39. Кириленко, О. В., Снежкін, Ю. Ф., Басок, Б. І., Базєєв, Є. Т. (). Енергетика України: ймовірні сценарії відновлення та розвитку. *Вісник НАН України*. 2022, №9, с. 22-37. <https://doi.org/10.15407/visn2022.09.022>.
40. Ukraine Recovery Plan. <https://recovery.gov.ua/en>.
41. National projects. Energy. <https://bit.ly/3xQg4KB>.
42. Сайт Оператора ринку <https://www.oree.com.ua/>
43. Linden A.J., Kalantzis F., Maincent E, Pieńkowski J. Electricity Tariff Deficit. Temporary or Permanent Problem in the EU? *European Commission Directorate-General for Economic and Financial Affairs*. http://ec.europa.eu/economy_finance/publications/.
44. Сайт Європейського союзу https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/QANDA_22_3141_.
45. Яловець А.Л. Мультиагентне моделювання переслідування на площині: від теорії до програмної реалізації. *Київ: Наук. думка*, 2019, 165 с.
46. North M.J., Macal C.M. Managing business complexity: discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulations. *Oxford University Press, Inc.*, 2007, 313 p.
47. Мохор В.В., Євдокімов В.А. Створення мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2020. Том 43, №6. С. 3-17. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.003> (фахове видання категорії Б).
48. Євдокімов В.А. (2021). Формулювання задачі побудови мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*, 43(3). С. 47-63. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.047>
49. НКРЕКП. Про затвердження Порядку формування прогнозованої оптової ринкової ціни електричної енергії. Постанова №289 від 03.03.2016 р. [Електронний ресурс] : [сайт] Режим доступу :

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0428-16#Text> - (Дата звернення: 10.10.19).

50. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Танкевич С.Є, Базюк Т.М. Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2016, №1, с. 29 – 34.

51. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. *Київ: Ін-т електродинаміки НАН України*, 2016, 400 с.

52. Аналіз тарифо- та ціноутворення на електроенергію у країнах ЄС та ОЕСР. Системи стимулюючого тарифоутворення: Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/10/3.-Taryfo_tsinoutv_elektroen.pdf (дата звернення 30.09.2018).

53. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційна модель ринку електричної енергії «на добу наперед» з неявним урахуванням мережових обмежень енергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 60-67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.060>

54. Блінов І.В. Методи та моделі забезпечення функціонування конкурентного ринку електричної енергії в Україні. *Вісник НАН України*. 2013. №6. С. 81-87.

55. Блінов І. В. Теоретичні та практичні засади функціонування конкурентного ринку електроенергії. *К.: Наукова думка*, 2015. 216 с.

56. Остапченко К.Б., Лісовиченко О.І., Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х. Створення інформаційно-моделюючої системи аналізу процесів ціноутворення на ринку електричної енергії. *Електронне моделювання*. 2021. Том 43, № 4. С. 51-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.051>

57. Shinde P., Amelin M. Agent-Based Models in Electricity Markets: A Literature Review. *IEEE Conference Proceedings Innovative Smart Grid*

Technologies - Asia 2019. Chengdu, China, May 21-24, 2019. Pp. 3026-3031.
DOI: <https://doi.org/ISGT-Asia.2019.8880889>.

58. Куцан Ю.Г., Блінов І.В., Іванов Г.А. Моделювання тарифо- та ціноутворення на роздрібному ринку електричної енергії України в нових умовах функціонування. *Електронне моделювання. 2017.* Том 39, № 5. С. 71-80. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.39.05.071>

59. Oprea S., Bara A., Preotescu D., Bologa R., Coroianu L. A Trading Simulator Model for the Wholesale Electricity Market. *IEEE Access. 2020. Vol. 8.* Pp. 184210-184230. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029291>

60. Євдокімов В.А. Математичне та інформаційно-технологічне забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення енергоринку. *Монографія. ISBN 978-617-8126-95-7.* DOI <https://doi.org/10.36074/Yevdokimov-monograph.2023> Published 30.09.2023

61. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Обчислювальний метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії. *Технічна електродинаміка. 2022. №5.* С. 67-76. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.067> .

62. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Побудова архітектури мультиагентного середовища імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання. 2023.* Том 45, №6. С. 15-30. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.06.015>.

63. Денисюк С.П., Базюк Т.М., Федосенко М.М., Ярмолюк О.С. (2017). Системи електропостачання з активним споживачем: моделі та режими. *Київ: ПП «АБЕРС», 182 с.*

64. Saukh S.E., Borysenko A.V. (2023). Mathematical model of a flexible micro grid integrated into the country grid. *Технічна електродинаміка, № 2,* 61-68. <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.061>

65. Macal C., North M. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, № 4, 151-162. <https://doi:10.1057/jos.2010.3>.
66. Zhi Zhou, Wai Kin (Victor) Chan, Joe H Chow. (2007). Agent-based simulation of electricity markets: a survey of tools. *Artificial Intelligence Review*. Vol. 28, 305-342. <https://doi.org/10.1007/s10462-009-9105-x>.
67. Leigh Tesfatsion. ACE Research Area: Electric Power System Design 2023 URL: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/aelect.htm>. (дата звернення: 10.08.2023).
68. Wooldridge M. (2002). *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons Ltd, 348 p.
69. Wooldridge M. (2000). *Reasoning about rational agent*. The MIT Press, 227 p.
70. Franklin S., Graesser C. Is it an Agent, or Just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. *Intelligent Agents III, Agent Theories, Architectures, and Languages // ECAI '96 Workshop (ATAL) Proceedings, Budapest, Hungary, August 12-13, 1996. Lecture Notes in Computer Science, 1997, Vol. 1193, pp. 22-35*.
71. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. Пер. с англ. М. Издательский дом "Вильямс", 2007, 1408 с.
72. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії. Постанова №312 від 14.03.2018р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua>. (Дата звернення: 10.10.23).
73. Стофт С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии, пер. с англ. под ред. Лазебника А.И., Сорокина И.С. М.: Мир, 2006. 623 с.
74. Commission Regulation (EU) 2015/1222 of 24 July 2015 establishing a guideline on capacity allocation and congestion management.

Official Journal of the European Union. 2015. Vol. 58. Pp. 24–72.

75. Commission Regulation (EU) 2016/1719 of 26 September 2016 establishing a guideline on forward capacity allocation. *Official Journal of the European Union*. 2016. Vol. 259. Pp. 42–68.

76. EUPHEMIA Public Description Single Price Coupling Algorithm. NEMO Committee, 2019. 55 p.

77. Парус Є.В., Євдокімов В.А. Оцінка результатів сполучення ринків електричної енергії на ринку «на добу наперед». *Технічна електродинаміка*. 2024. №1. С. 69-76. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.069>

78. Іванов Г.А. Побудова імітаційної моделі лібералізованого ринку електричної енергії з урахуванням особливостей функціонування ОЕС України. *Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14*. Інститут електродинаміки НАН України, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, 2021. <https://rada.kpi.ua/node/1385>.

79. Varian Hal R. Microeconomic Analysis (Third ed.). *New York: Norton*, 1992. 563 p.

80. Patinkin D. Walras's Law. In: Eatwell J., Milgate M., Newman P. (eds) *General Equilibrium*. London: Palgrave Macmillan, 1989. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-349-19802-3_37.

81. O'Sullivan A., Sheffrin Steven M. *Economics: Principles in Action*. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2003. 462 p.

82. Mas-Colell, A.; Whinston, Michael D.; Green, Jerry R. (1995), "Chapter 16: Equilibrium and its Basic Welfare Properties". *Microeconomic Theory*, Oxford University Press, ISBN 978-0-19-510268-0.

83. Arrow, Kenneth J., and Gérard Debreu ed., 2002. *Landmark Papers in General Equilibrium Theory, Social Choice and Welfare*. Edward Elgar Publishing, ISBN 978-1-84064-569-9.

84. Блінов І., Парус Є. 2015. Врахування мережових обмежень та мінімізація різниці цін між ринками електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 81-88. <https://www.techned.org.ua/index.php/techned/article/view/940>.

85 .Blinov I., Kyrylenko O., Parus E., Rybina O. Decentralized Market Coupling with Taking Account Power Systems Transmission Network Constraints. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. vol 388. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_1.

86. Klemperer, Paul (July 1999). "Auction Theory: A Guide to the Literature". *Journal of Economic Surveys*. 13 (3): 227–286. doi:10.1111/1467-6419.00083.

87. Milgrom, Paul (2004), Putting Auction Theory to Work, Cambridge, United Kingdom. *Cambridge University Press*, ISBN 978-0-521-55184-7.

88. Блінов І.В., Парус Є.В. Особливості об'єднання двох ринків електроенергії в використанні ліній чистого експорту. *Електропанорама*, 2013. – №9 – С.50-52.

89. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0944> (дата звернення 25.12.2023).

90 Robert Phillips. Pricing and Revenue Optimization. *Stanford University Press*. 2005. p. 78.

91. Сайт НЕК «Укренерго» <https://ua.energy/>.

92. Блінов І.В. Парус Є.В. Підхід до формування лотів виробників на аукціоні з купівлі-продажу електричної енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. – К.: ІЕД НАНУ, 2011.-Вип.28. – С. 20-25.

93. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В. Балансуючий ринок електроенергії України та його математична модель. *Технічна електродинаміка*. 2011. - № 2. - С. 36–43.

94. Домбровская Г.П., Геращенко И.А. Основные системы формирования цен на энергию. *Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник №80*. С. 124-133.

95. Дейли Джон. Эффективное ценообразование – основа конкурентного преимущества.: *Пер. с англ.* – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 304 с.

96. User's Manual for CPLEX.
<https://www.ibm.com/docs/en/icos/20.1.0?topic=cplex-users-manual>.

97. Optimization Programming Language (OPL).
<https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.8.0.0?topic=opl-optimization-programming-language>.

98. Євдокимов В.Ф., Борукаєв, З.Х., Остапченко К.Б., Лісовиченко О.І. Теоретико-ігрове та об'єктно-орієнтоване моделювання систем організаційного управління.: Монографія. Київ: ТОВ «Три К», ІПМЕ ім.Г.Є.Пухова НАН України, 2019, 283 с.

99. Borukaiev Z., Ostapchenko K., Chemerys O., Evdokimov V. Information Technology Platform for Automation of Decision-Making Processes by the Organizational Management System. In *Power Systems Research and Operation: Selected Problems II. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham, 2023, vol 220, pp.257-279.

100. Sprague, R. H., Carlson, E. D. (1982). Building effective decision support systems. *Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall*.

101. Sprague, R. H., Watson, H. J. (1996). Decision support for management. *EnglewoodCliffs, NJ: Prentice-Hall*.

102. Борукаєв З.Х., Блінов І.В., Остапченко К.Б., Чемерис О.А., Шкарупило В.В. Моделі та засоби автоматизації систем організаційного

управління енергоринком. Монографія. ; за заг. ред. З. Х. Борукаєва. *Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2022. 122 с. ISBN 978-617-8037-82-6, DOI 10.36074/mtzasoye-monograph.2022.*

103. IEC 62325-301. Framework for energy market communications. Part 301: Common information model (CIM) extensions for markets, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/31487>.

104. IEC 62325-351. Framework for energy market communications. Part 351: CIM European market model exchange profile, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/25128>.

105. Грэхэм И. Объектно-ориентированное моделирование. *Принципы и практика. М.: Изд-во Вильямс, 2004, 880 с.*

106. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++: *Третье изд.; пер. с англ. И. Романовского, Ф. Андреева. М.: Изд-во Вильямс, 2008, 720 с.*

107. Ostapchenko K. Lisovychenko O., Evdokimov V. Functional organization of system of support of decision-making of organizational management. *Адаптивні системи автоматичного управління, 2020, №1(36), с. 17-31. URL: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.36.2020.209753>.*

108. Євдокімов В.А. Інформаційно-моделюючої система аналізу процесу ціноутворення на ринку електричної енергії. *Журнал «Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки». 2021, № 3, с. 10-18.*

109. Євдокімов В.А. Функціональна організація інтерфейсу користувача програмно-апаратної комп'ютерної системи Equant Cloud. *Електронне моделювання. 2023, 45(2), с. 83-84.*

110. А.С. 112221 Україна. База даних « Моделі процесів функціонування ринку електроенергії» / К.Б. Остапченко, В.А. Євдокімов, З.Х. Борукаєв; дата реєстрації 9 березня 2022 р. №112221; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.

111. Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б. Комп'ютерна система моделювання процесів ціноутворення на оптовому ринку електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2024. №2. С. 72-81. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.072>

112. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В. Комплексна розрахункова модель ринку на добу наперед та балансуючого ринку електроенергії України. *Промелектро*, 2016, № 4-5, С. 8-12.

113. Ivanov H., Blinov I., Parus Ye. Simulation model of new electricity market in Ukraine. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 339–342. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>.

114. Саух С.Є., Борисенко А.В. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія. К.: Три К, 2020. 340 с.

115. Innovative solutions for the oil, gas, and energy industry from SAP and our partners. URL: <https://www.sap.com/ukraine/industries/oil-gas.html#products> (дата звернення 23.02.2024).

116. Oracle Utilities Management Solutions for Energy and Water. URL: <https://www.oracle.com/utilities/> (дата звернення 23.02.2024).

117. Transformative energy and utilities solutions from IBM. URL: <https://www.ibm.com/industries/energy?lnk=flatitem> (дата звернення 23.02.2024).

118. Siemens Global Products&Services: Energy. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy.html> (дата звернення 23.02.2024).

119. The National Energy Modeling System: AnOverview 2018.URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/documentation/> (дата звернення 23.02.2024).

120. Plexos market simulation software. URL: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos/> (дата звернення 23.02.2024).
121. Aurora electric modeling, forecasting and analysis software. URL: <https://energyexemplar.com/solutions/aurora/> (дата звернення 23.02.2024).
122. Ostapchenko K.B., Lisovychenko O.I., Borukaiev Z.Kh. Hybrid approach to the forecasting of electric consumption time series for organizational management in the wholesale market. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2019. Т. 1. № 34. С.42–52. DOI:<https://doi.org/10.20535/1560-8956.1.2019.178228>.
123. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Лисовиченко О.И. Способ построения неформализованой гибридной модели прогнозирования электропотребления на оптовом рынке. *Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України*. 2019. Вип. 89. С. 157–166. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3860762>.
124. Остапченко К.Б., Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х. Сховище оперативних даних системи підтримки прийняття рішень для організаційного управління ринком електроенергії. *Електронне моделювання*. 2022. Т. 44. № 3. С. 101–112. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.03.101>.
125. Євдокімов В.А. Функціональна організація інтерфейсу користувача програмно-апаратної комп'ютерної системи Equant Cloud. *Електронне моделювання*. 2023. Т. 45. № 2. С. 83–94. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.02.083>.
126. А.С. 74797. Україна. Комп'ютерна програма «Платформа алгоритмічного моделювання для учасників ринку електричної енергії «Equant Cloud»»/ В.А. Євдокімов, Г.А. Іванов; дата реєстрації 17 листопада 2017 р. №112221; заявл.18.09.2017; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.
127. Біржові котирування, індекси базового навантаження електричної енергії: Українська енергетична біржа. URL:

<https://www.ueex.com.ua/exchange-quotations/electric-power/indexes/> (дата звернення 23.02.2024).

128. Євдокімов В.А., Полухін А.В. Оптимізація доходу учасників ринку «на добу наперед» шляхом моделювання процесів визначення ціни на цьому ринку. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №4. С. 121-129. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.04.121>

129. Polukhin A., Evdokimov V. Conceptual principles of forecasting demand on the day-ahead market using changes in hourly bidded demand between previous similar days. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)* 22/05/2023 - 26/05/2023. Kryvyi Rih, Ukraine. Volume 1254. 2023. Online ISSN: 1757-899XPrint ISSN: 1757-8981. doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012035. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1254/1/012035/pdf>

130. Остапченко К.Б., Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А. Методика побудови моделі оперативного прогнозування показників стану ринку електричної енергії (цін та обсягів). *Журнал «Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки»*. 2023. № 2. С. 106-117. ISSN:2786-4588 (Print), 2786-4596 (Online). DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.12> (фахове видання категорії Б)

131. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Стан та перспективи організації децентралізованої торгівлі електроенергією на регіональному рівні. *Електронне моделювання*. 2023. Том 45, №3. С. 11-27. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.011>

132. Стан і перспективи розвитку технологій «інтелектуальних» електромереж, управління попитом та систем режимного управління в умовах розвитку поновлюваних джерел енергії у зарубіжній енергетичній сфері. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://ua.energy/wp->

content/uploads/2018/04/1.-Stan-rozvytku-smart-grid.pdf. (Дата доступу 09.04.2022р.).

133. Коцар О.В, Расько Ю.О. Вдосконалення методичного та інструментального забезпечення управління попитом в лібералізованих ринках електричної енергії. *Техн. електродинаміка*. 2023. № 3. С.68-78. <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.068>

134. V. Bobinaite, I. Konstantinavičiūtė, V. Lekavičius, "Theoretical model for electricity market price forecasting". *Economics and Management*, 2012, Vol.17, No 3, pp.944-951, <https://doi.org/10.5755/j01.em.17.3.2119>

135. Weron R. Modeling and Forecasting Electricity Loads and Prices. *Statistical Approach*, John Wiley & Sons Ltd., 2006

136. Edgar E. Peters. Chaos and Order in the Capital Markets. *A New View of Cycles, Prices, and Market Volatility*, 2nd Edition, Wiley, USA, 1996, 288 p.

137. S.K. Aggarwal, L.M. Saini and A. Kumar, "Electricity price forecasting in deregulated markets: A review and evaluation", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2009, vol. 31, no. 1, pp. 13-22.

138. Singhal, D. & Swarup, K. S. (2011). Electricity price forecasting using artificial neural networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33 (3), 550-555.

139. Weron R. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future. *International Journal of Forecasting*. - 2014, Vol. 30. - P. 1030–1081. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2014.08.008>)

140. Євдокімов В. А., Іванов Г.А. Методи визначення обсягів та цін на електричну енергію в контрактах в умовах лібералізованого ринку. *Моделювання та інформаційні технології*. – 2017. - Вип. 81. - С. 142-152.

141. .Блінов І.В., Іванов Ф.А. Способи формування ключових вхідних даних для імітаційного моделювання цін та тарифів в новій моделі ринку електричної енергії. *Промелектро*. – 2017. – № 3. – С.54-57.

142. Блінов І.В., Парус С.В., Іванов Г.А. Імітаційне моделювання функціонування балансуючого ринку електроенергії з урахування системних обмежень на параметри ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. – 2017. - № 6. – С.72-79.

143. Лукашевич Я.П., Євдокімов В.А. Інформаційна система моніторингу динаміки розвитку альтернативної електроенергетики. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №5. С. 90-101. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.05.090>

144. Бабина О.М. Світовий досвід розвитку альтернативних джерел енергії. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*, 2019, № 6(111), с. 15–19.

145. Офіційний сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/news/4087> (Дата звернення: 10.04.2022).

146. Офіційний сайт ДП «Гарантований покупець». [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.gpee.com.ua/get_document/83 (Дата звернення: 10.04.2022).

147. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text> (Дата звернення: 10.04.2022).

148. П'ять проблем ринку електроенергетики, які привітали Україну з 2020 роком. *Українська енергетика*, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/piat-problem-rynku-elektroenerhetyky-iaki-potribno-pryvitaly-ukrainu-z-2020-rokom> (Дата звернення: 10.04.2022).

149. Кудря С.О. Стан та перспективи розвитку відновлювальної енергетики в Україні. *Вісник НАН України*, 2015, №12, с. 19—26.

150. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Праховнік А.К. Аналіз енергетичних стратегій країн ЄС та світу і ролі в них відновлювальних джерел енергії.

Аналітична записка БАУ №13. Режим доступу: www.uabio.org/activity/uabio-analytics, 35 с.

151. Дячук О., Чепелєв М., Подолець Р. та ін. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року. *Представництво Фонду ім. Г. Бьоля в Україні. Київ: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017, 88 с.*

152. Кудря С.О. Потенціал розвитку відновлювальних джерел енергії. Режим доступу: www.reee.org.ua, 46 с.

153. Циганок К.О., Череп А.В. Альтернативні джерела енергії як засіб ресурсоефективності. *Глобальні та національні проблеми економіки, 2018, № 22(18), с. 688—691.*

154. Задорожнюк Н.О. Сучасне програмне забезпечення для здійснення бізнес-аналізу. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», 2021, № 18.* Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.19.2021.230070>

155. Камбур О.Л., Тюлькіна К.О., Панова Т.Б. Використання інструментів бізнес аналітики для оцінки перспектив розвитку альтернативних джерел енергії в Україні. Там же, 2022, № 35. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-35-15>.

156. Energy Map. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://map.ua-energy.org/> (Дата звернення: 10.04.2022).

157. ПЛАТФОРМА ENERGO.UA. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.energo.ua/> (Дата звернення: 10.04.2022).

158. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» Редакція від 19.08.2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (Дата звернення: 22.09.2022).

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати.

Монографії:

1. Borukaiev Z., Ostapchenko K., Chemerys O., Evdokimov V. Information Technology Platform for Automation of Decision-Making Processes by the Organizational Management System. In Power Systems Research and Operation: Selected Problems II. Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham: Collective monograph. 2023, vol 220. P.257-279. ISSN 2198-4182. ISBN 978-3-031-17553-4. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_12 (розділ колективної монографії) (Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57857542800>).

2. Євдокімов В.А. Математичне та інформаційно-технологічне забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення енергоринку. Монографія. ISBN 978-617-8126-95-7. DOI <https://doi.org/10.36074/Yevdokimov-monograph.2023> Published 30.09.2023 (особиста монографія).

Статті у фахових періодичних виданнях:

3. Євдокімов В.А., Іванов Г.А. Методи визначення обсягів та цін на електричну енергію в контрактах в умовах лібералізованого ринку. *Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”*, 2017, вип.81. С. 142-152. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Mtit_2017_81_22. (фахове видання).

4. Євдокімов В.А. Деякі питання дослідження технічного і організаційно-економічного впливу розподіленої генерації на функціонування енергосистеми та ринок електричної енергії. *Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”*, 2019, вип.88.

С. 134-143. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Mtit_2019_88_22. **(фахове видання).**

5. Ostapchenko K., Lisovychenko O., Evdokimov.V. Functional organization of system of support of decision-making of organizational management. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління»*. 2020. №1,(36). С. 17-31. ISSN 2522-9575 (Онлайн), ISSN 1560-8956 (Друк). UDC 004.89:65.011.56. <https://www.google.com.ua/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://asac.kpi.ua/article/download/209753/209815&ved=2ahUKEwjhkeXi39eGAxV4gv0HHTi-BA8QFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw2AjfGW4kVjLezdZSDOzUos> **(фахове видання).**

6. Мохор В.В., Євдокімов В.А. Створення мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2020. Том 43, №6. С. 3-17. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.003> **(фахове видання).**

7. Євдокімов В.А. Формулювання задачі побудови мультиагентної імітаційної моделі процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2021. Том 43, №3. С. 47-63. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.03.047> **(фахове видання).**

8. Євдокімов В.А. Інформаційно-моделююча система аналізу процесу ціноутворення на ринку електричної енергії. *Журнал «Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки»*. 2021. № 3. С. 10-18. ISSN:2786-4588 (Print), 2786-4596 (Online). DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.3.2> **(фахове видання).**

9. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Створення інформаційно-моделюючої системи аналізу процесів ціноутворення на

ринку електричної енергії. *Електронне моделювання*. 2021. Том 43, №4. С. 51-68. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.051> **(фахове видання)**.

10. Євдокімов В.А., Полухін А.В. Оптимізація доходу учасників ринку «на добу наперед» шляхом моделювання процесів визначення ціни на цьому ринку. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №4. С. 121-129. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.04.121> **(фахове видання)**.

11. Остапченко К.Б., Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х. Сховище оперативних даних системи підтримки прийняття рішень для організаційного управління ринком електроенергії. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №3. С. 101-112. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.03.101> **(фахове видання)**.

12. Лукашевич Я.П., Євдокімов В.А. Інформаційна система моніторингу динаміки розвитку альтернативної електроенергетики. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44, №5. С. 90-101. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.05.090> **(фахове видання)**.

13. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Обчислювальний метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. №5. С. 67-76. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.067> **(Scopus фахове видання категорії А)**.

14. Polukhin A., Evdokimov V. Conceptual principles of forecasting demand on the day-ahead market using changes in hourly bidded demand between previous similar days. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023) 22/05/2023 - 26/05/2023*. Kryvyi Rih, Ukraine. Volume 1254. 2023. Online ISSN: 1757-

899XPrint ISSN: 1757-8981. **(Scopus)** doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012035.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1254/1/012035/pdf>

15. Євдокімов В.А. Функціональна організація інтерфейсу користувача програмно-апаратної комп'ютерної системи Equant Cloud. *Електронне моделювання*. 2023. Том 45, №2. С. 83-94. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.02.083> **(фахове видання)**.

16. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Стан та перспективи організації децентралізованої торгівлі електроенергією на регіональному рівні. *Електронне моделювання*. 2023. Том 45, №3. С. 11-27. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.011> **(фахове видання)**.

17. Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А., Остапченко К.Б. Побудова архітектури мультиагентного середовища імітаційної моделі процесу ціноутворення на ринку електроенергії. *Електронне моделювання*. 2023. Том 45, №6. С. 15-30. ISSN:0204-3572. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.06.015> **(фахове видання)**.

18. Остапченко К.Б., Борукаєв З.Х., Євдокімов В.А. Методика побудови моделі оперативного прогнозування показників стану ринку електричної енергії (цін та обсягів). *Журнал «Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки»*. 2023. № 2. С. 106-117. ISSN:2786-4588 (Print), 2786-4596 (Online). DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.12> **(фахове видання)**.

19. Парус Є.В., Євдокімов В.А. Оцінка результатів сполучення ринків електричної енергії на ринку «на добу наперед».. *Технічна електродинаміка*. 2024. №1. С. 69-76. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.069> **(Scopus, фахове видання категорії А)**.

20. Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б. Комп'ютерна система моделювання процесів ціноутворення на оптовому ринку

електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2024. №2. С. 72-81. ISSN:1607-7970 (Print), 2218-1903 (Online). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.072> (**Scopus, фахове видання категорії А**).

21. Lukashevych Y, Evdokimov V, Polukhin A, Maksymova I, Tsvilii D. Innovation In The Energy Sector: The Transition To Renewable Sources As A Strategic Step Towards Sustainable Development. *AFRICAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH*. 2024. 10(1), P. 43–56. ISSN:2408-7920 (**Scopus**). <https://doi.org/10.26437/ajar.v10i1.665>.
<https://www.ajaronline.com/index.php/AJAR/article/view/665>

Праці апробаційного характеру:

22. Євдокімов В.А. Про особливості впливу розподіленої генерації на функціонування енергосистеми. *Abstracts of I International Scientific and Practical Conference* (Kharkiv, Ukraine, 16-17 December 2019.) P. 329-334. https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2020/01/science-society-education_topical-issues-and-development-prospects_16-17.12.2019.pdf (дата звернення 13.06.2024).

23. Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х. Про особливості впливу розподіленої генерації на кібербезпеку функціонування енергосистеми. *Науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН*. Україна, Київ, 20 грудня 2019 року. С.5. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Програма-КБЕЕЦ-2019.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

24. Ostapchenko K., Lisovychenko O., Borukaev Z., Evdokimov.V. Information and Simulation System for Processes. *Analysis in the Liberalized Electricity Market. Actual trends of modern scientific research. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference*. May 9-11, 2021. Munich, Germany: MDPC Publishing. 2021. P.165-171. URL: <https://sci->

conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/05/ACTUAL-TRENDS-OF-MODERN-SCIENTIFIC-RESEARCH-9-11.05.21.pdf (дата звернення 13.06.2024).

25. Борукаєв З.Х., Лісовиченко О.І., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Information and Simulation System for Processes Analysis in the Liberalized Electricity Market. *Applied scientific and technical research. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції*. 5-7 квітня 2021р. Івано-Франківськ: Академія технічних наук України. 2021. С. 30-32 URL: http://ukrtsa.org.ua/media/docs/6-prikladni-naukovo-tekhichni-doslidzhennia/ATSU_2021.pdf (дата звернення 13.06.2024).

26. Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б. Кібербезпека організаційних і організаційно-технічних систем в енергетиці України. *Безпека енергетики в епоху цифрової Трансформації. Матеріали III науково-практичної конференції*. 22 грудня 2021року, м.Київ. 2021, Інститут проблем моделювання енергетики ім. Г.Є. Пухова НАН України. С.54-60.
https://www.researchgate.net/publication/358783849_FUNKCIONALNA_SKLADOVA_BEZPEKI_ASU_TP_ZA_NIST_SP_800-82 (дата звернення 13.06.2024).

27. Євдокімов В.А. Комп'ютерна система equant cloud моделювання процесів ціноутворення на ринку електроенергії України. *Комп'ютерні системи та мережні технології: XIII Міжнародна науково-практична конференція. (CSNT 2021), Київ, 15-17 квітня 2021 року*. Національний авіаційний університет. Київ, 2021. С. 36–39.
<https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/50655/1/Євдокімов%20В.А..pdf> (дата звернення 13.06.2024).

28. Євдокімов В.А. Мультиагентні технології в дослідженнях електроенергетики у нових умовах роботи ринку електричної енергії України. *XXXIX НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова*

НАН України. Київ, 12 травня 2021. С. 10-12. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/05/Програма-конференції-2021.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

29. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Інтерфейс взаємодії з базою даних «Моделі процесів функціонування ринку електричної енергії». *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України*. Матеріали, 27 травня 2022 р. Київ. 2022. С. 70-79. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Матеріали-КБЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

30. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Кібербезпека організаційних і організаційно-технічних систем в енергетиці України. *III науково-практичної конференції, Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації (22 грудня 2021 року) ІПМЕ*. Збірник тез 2021. С. 55-61. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/12/Матеріали-КБЕЕЦ-2021-1.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

31. Лукашевич Я.П., Євдокімов В.А. Обґрунтування задачі створення бази даних об'єктів «зеленої» енергетики України для визначення складових розвитку та механізмів підтримки галузі. *XL Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, м. Київ. 11 травня 2022 р. Збірник тез ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2022. С. 65-68. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Збірник-тез-конференція-молодих-вчених-ІПМЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

32. Євдокімов В.А., Полухін А.В. Важливість прогнозування обсягів попиту на ринку «на добу наперед» в процесі моделювання визначення цінової позиції на продаж на ринку електричної енергії. *XL Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем*

модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ. 11 травня 2022 р. Збірник тез ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2022. С. 69-71. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Збірник-тез-конференція-молодих-вчених-ІПМЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

33. Борукаєв З. Х., Остапченко К. Б., Євдокімов В. А. Інтерфейс взаємодії з базою даних «Моделі процесів функціонування ринку електричної енергії». *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України 27 травня 2022 р. Київ*. Матеріали конференції. 2022. С.70-79. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/05/Матеріали-КБЕ-2022.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

34. Ostapchenko K., Borukaiev Z., Evdokimov V. Information environment for the organizational management system of the electricity market. *The 10th International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects", June 25-27 2022*. SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. P.99-105. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/06/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-25-27.06.22.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

35. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А. Особливості побудови моделі короткострокового прогнозування електроспоживанням постачальниками на оптовому ринку електроенергії. *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України. 24 листопада 2022 року. м.Київ., 2022. С. 41-46*. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/12/Матеріали-КБЕЕЦ-2022.doc.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

36. Євдокімов В.А. Програмно-апаратна комп'ютерна система модельовання в енергетиці - «Equant Cloud». *Восьма міжнародна науково-*

технічна конференція «Модельовання і комп'ютерна графіка», 11-14 квітня 2023 року в м. Луцьк та м. Києві. Програма конференції. 2023. С.8. https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/04/MCG_2023_-_Programm_Fin.pdf (дата звернення 13.06.2024).

37. Bekmagambetova G., Polukhin A., Evdokimov V., Kasmin D., Dmytriienko O. Algorithmic means of ensuring network security and websites: trends, models, future cases. *Amazonia Investiga*. 2023 12(65), P. 149-163. (Scopus) <https://doi.org/10.34069/AI/2023.65.05.15> (дата звернення 13.06.2024).

38. Євдокімов В.А. Децентралізація ринку, як основа побудови резильєнтної енергосистеми України. *Науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України*. 21 червня 2023 року. Київ, ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2023. С. 45-47. <https://ipme.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/06/Матеріали-конференції-Critical-Infrastructure-Resilience---2023.pdf> (дата звернення 13.06.2024).

39. Євдокімов В.А., Остапченко К.Б., Цвілій Д.Р. Комп'ютерна система модельовання, як інструмент організаційного управління енергетичними ринками. *VI International Scientific and Practical Conference «Old and new technologies of learning development in modern conditions»*, 13-16 лютого 2024 р., Берлін, Німеччина. <https://isg-konf.com/old-and-new-technologies-of-learning-development-in-modern-conditions/> (дата звернення 13.06.2024).

40. Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., Євдокімов В.А., Цвілій Д.Р. Особливості реалізації комп'ютерної системи модельовання процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України*. 29 травня 2024 року. м.Київ., 2024. С. 86-89. <https://ipme.kiev.ua/wp->

content/uploads/2024/06/Матеріали-КБЕ-2024.pdf (дата звернення 13.06.2024).

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. Євдокімов В. А. Алгоритм функціонування фонду врегулювання вартісного дисбалансу / Євдокімов В.А., Комова С.К., Вишинський О.С. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 6. – С. 29-42.

2. А.С. 74797. Україна. Комп'ютерна програма «Платформа алгоритмічного моделювання для учасників ринку електричної енергії «Equant Cloud»». Євдокімов В.А., Іванов Г.А.; дата реєстрації 17 листопада 2017 р. №112221; заявл.18.09.2017; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.

3. А.С. 112221 Україна. База даних «Моделі процесів функціонування ринку електроенергії». Євдокімов В.А., Остапченко К.Б., Борукаєв З.Х.; дата реєстрації 9 березня 2022 р. №112221; опубл. URL: <https://sis.ukrpatent.org>

4. А.С. 115332 Україна. Науковий твір «Математична модель рівноваги на ринку електроенергії «на добу наперед» .Саух С.Є, Євдокімов В.А.; дата реєстрації 17 жовтня 2022 р. №115332; опубл. URL: <https://sis.ukrpatent.org>

5. А.С. 115256 Науковий твір «Обчислювальний метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії». Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б.; дата реєстрації 13 жовтня 2022 р. № 115256; опубл. URL: <https://sis.ukrpatent.org>.

6. А.С. 119846 Науковий твір «Алгоритм розрахунку прогнозу погодинного попиту на ринку «на добу наперед». Євдокімов В.А.; дата реєстрації 19 червня 2023 р. №119846; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.

7. А.С. 119898 Комп'ютерна програма «Алгоритм розрахунку прогнозу погодинного попиту на ринку електричної енергії «на добу наперед». Євдокімов В.А., Полухін А.В., Цвілій Д.Р.; дата реєстрації 20 червня 2023 р. №119898; опубл. <https://sis.ukrpatent.org>.

Апробація матеріалів дисертації. Основні наукові теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях, у тому числі й міжнародних: Abstracts of I International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, Ukraine, 16-17 December 2019.); Науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН. Україна, Київ, 20 грудня 2019 року; Actual trends of modern scientific research, 10th International scientific and practical conference. May 9-11, 2021. Munich, Germany; V міжнародної науково-практичної конференції. 5-7 квітня 2021р. Івано-Франківськ; Безпека енергетики в епоху цифрової Трансформації, III науково-практичної конференції. 22 грудня 2021 року, м. Київ. 2021 р.; Комп'ютерні системи та мережні технології: XIII Міжнародна науково-практична конференція. (CSNT 2021), Київ, 15-17 квітня 2021 року. Національний авіаційний університет. Київ, 2021; XXXIX НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. Київ, 12 травня 2021 р.; Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України, 27 травня 2022 р. Київ. 2022 р.; III науково-практичної конференції, Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації (22 грудня 2021 року) ІПМЕ; XL Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ. 11 травня 2022 р.; XL Науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ. 11 травня 2022 р.; Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України 27 травня 2022 р. Київ; The 10th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and

prospects”, June 25-27 2022. SSPG Publish, Stockholm, Sweden.2022; Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України. 24 листопада 2022 року. м. Київ; Восьма міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання і комп’ютерна графіка», 11-14 квітня 2023 року в м. Луцьк та м. Києві; Amazonia Investiga. 2023; Науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України. 21 червня 2023 року. Київ; VI International Scientific and Practical Conference «Old and new technologies of learning development in modern conditions», 13-16 лютого 2024 р., Берлін, Німеччина; Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України. 29 травня 2024 року. м. Київ.

ДОДАТОК Б

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Асоціація сонячної енергетики України

тел: +380937822033
 пошта: office@aseu.org.ua
 сайт: www.aseu.org.ua
 адреса: 19/4, Григорія Кочура
 Київ, 03110, Україна

Інститут проблем моделювання в
 енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
 03164, Київ 164,
 вул. Генерала Наумова 15

№1-15/10/2024 від 15.10.2024

*Про підтримку
 дисертаційного дослідження*

Громадська спілка «Асоціація сонячної енергетики України» (АСЕУ) створена для сприяння розвитку відновлюваної електроенергетики України, представництва інтересів своїх членів у органах державної влади та управління, місцевого самоврядування, захисту прав учасників АСЕУ, а також забезпечення зв'язків з громадськістю.

АСЕУ об'єднує учасників ринку сонячної енергетики загальною кількістю понад 50 компаній та груп компаній, а також, понад 400 власників домашніх СЕС. Ми представляємо інтереси власників промислових сонячних станцій, українських та іноземних інвесторів, компаній, які здійснюють проектування, будівництво та обслуговування СЕС, виробників обладнання для сонячних станцій та власників домашніх СЕС. Спільнота АСЕУ налічує понад 7000 осіб.

Ознайомившись із дисертаційною роботою Євдокімова В.А. «Методи та засоби комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу ціноутворення в організаційно-технічних системах» підтверджуємо її актуальність. Результати представлені в ній мають і велике практичне значення. До числа таких відносяться результати які пов'язані з утворенням інформаційно-довідкової системи об'єктів альтернативної генерації у складі комп'ютерної системи моделювання EQUANT CLOUD.

Розроблена модель збирання даних динаміки змін кількісних та якісних показників функціонування об'єктів альтернативної електроенергетики, дозволяє здійснювати збір і систематизацію актуальної інформації про об'єкти, з необхідною дискретністю у часі. Відзначена її відмінна риса розширяє можливості її подальшого використання у вирішенні наукових і практичних задач інтеграції зазначених об'єктів до централізованої електроенергетичної системи, удосконаленню механізмів ціноутворення на ринку електроенергії.

З повагою

**Голова Правління
 Асоціації сонячної
 енергетики України**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Владислав", is placed over the printed name.

Владислав СОКОЛОВСЬКИЙ



МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ
АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «ОПЕРАТОР РИНКУ»

вул. Симона Петлюри, 27 м. Київ 01032
 (044) 205-01-61, kanc@oree.com.ua
 www.oree.com.ua ЄДРПОУ 43064445

Директору
 Інституту проблем моделювання в
 енергетиці ім. Г.Є. Пухова
 НАН України
 Володимир Мохору

Про експертний висновок

Шановний пане Володимире!

АТ «Оператор ринку» висловлює подяку і глибоку вдячність Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за плідну співпрацю та проведену фундаментальну науково-дослідну роботу з розроблення математичної моделі рівноваги ринку «на добу наперед» (далі – РДН), яка забезпечує суттєве зменшення обсягу обчислень в процесі визначення оптимальних цін та обсягів купівлі-продажу електроенергії у відповідності до вимог встановлених Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Надані нам результати науково-дослідної роботи у вигляді математичної моделі РДН та експериментального програмного коду, що її реалізує, забезпечують проведення в товаристві тестових розрахунків на фактичних даних роботи РДН. Вже виконані тестові завдання підтверджують коректність результатів моделювання та швидкодію запропонованого обчислювального алгоритму.

Розроблена Інститутом проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова математична модель РДН та запропонований алгоритм визначення оптимальних цін та обсягів купівлі-продажу електричної енергії повністю відповідають сформульованим проблемним завданням і будуть використані у роботі з вдосконалення програмного забезпечення, яке щоденно використовує товариство для виконання функції по проведенню торгів на РДН. Використання вказаної математичної моделі РДН забезпечить суттєве скорочення часу проведення розрахунків, особливо в умовах застосування на ринку профільованих та гнучких блочних заявок на купівлю та продаж електричної енергії.

Висловлюємо впевненість у збереженні дружніх відносин та подальшій плідній та взаємовигідній співпраці.

Бажаємо Вам та Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова успіхів і процвітання.

З повагою
 В.о. генерального директора

Олександр ГАВБА

ДЗІТІБ 01-53

АТ «Оператор ринку»
 № 01-32/1379 від 05.10.2022



Про використання результатів
дисертаційної роботи
Євдокімова В.А

Інститут проблем моделювання в
енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

АКТ

про введення в дослідну експлуатацію результатів дисертаційного
дослідження «Методи та засоби комп'ютерного моделювання
мультіагентного процесу ціноутворення в організаційно-технічних
системах» здобувача ступеня доктора технічних наук
Євдокімова Володимира Анатолійовича

Результати досліджень дисертаційної роботи Євдокімова В.А. «Методи та засоби комп'ютерного моделювання мультіагентного процесу ціноутворення в організаційно-технічних системах» які пов'язані з розробленням математичної моделі визначення оптимальних цін та обсягів купівлі-продажу електричної енергії на «ринку на добу наперед» (РДН) були впровадженні в дослідну експлуатацію АТ «Оператор ринку». Розроблена математична модель РДН була реалізована у вигляді алгоритму та програмного коду. Проведені обчислювальні експерименти при виконання тестових завдань показали адекватність математичної моделі. Алгоритм та програма забезпечили необхідну точність отриманих результатів обчислень та суттєве прискорення розрахунку оптимальних цін та обсягів купівлі-продажу електричної енергії на РДН.

Розроблена математична модель алгоритму визначення оптимальних цін та обсягів купівлі-продажу електричної енергії на РДН та програмне забезпечення знайшли застосування та використовуються при проведенні торгів на аукціоні РДН в резервній системі програмного забезпечення АТ «Оператор ринку».

Генеральний директор
АТ «Оператор ринку»



Олександр ГАВВА



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ЕНЕРГОСТАБ»
 ЄДРПОУ 45145237 ІПН 451452326502
 м. Київ, вул. Скоропадського Павла Гетьмана, 6а, оф. 405
 моб. тел.: +380 (63) 062 72 44
 e-mail: energostab@yahoo.com www.energostab.com.ua
 IBAN UA793226690000026002300673666 у банку АТ «Ощадбанк»

N= 1029/2024
Big 21.10.2024p

Інститут проблем моделювання в
 енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України

АКТ
про використання
результатів дисертаційної роботи
«Методи та засоби комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу ціноутворення
в організаційно-технічних системах»
Євдокімова Володимира Анатолійовича
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

ТОВ «Енергостаб» є постачальником електричної енергії на ринку електричної енергії України. ТОВ «Енергостаб» підтверджує факт використання у робочому процесі результатів досліджень дисертаційної роботи Євдокімова В.А. у вигляді інформаційно-аналітичного та інформаційно-розрахункового забезпечення комп'ютерної системи моделювання Еквант (Eqvant). Зазначені ресурси комп'ютерної системи моделювання надають ТОВ «Енергостаб» можливість вирішення важливих для трейдерських компаній практичних задач моделювання процесів ціноутворення для задля визначення оцінки діапазону мінімально та максимально можливих цін і тарифів на сегментах ринку електроенергії.

У робочому процесі ТОВ «Енергостаб» використано такі результати дисертаційної роботи, а саме: метод вузлової трансформації процесу ціноутворення на ринку електроенергії, модель аналізу динаміки змін ціни в вузлах всього ланцюгу від виробника до кінцевого споживача, модель аналізу динаміки попиту на ЕЕ на «ринку на добу наперед», модель прогнозування основних показників ринку електричної енергії (обсягів та цін).

Директор
 ТОВ «Енергостаб»



Максим ФІЛІПОВ

ENERGYPOOL**LIMITED LIABILITY COMPANY****«ENERGY POOL»**

01024, Ukraine, Kyiv, Lva Tolstogo street, 6A, off 404
EDRPOU 44344131, tel. +380 (93) 370 24 83, email energypool@yahoo.com
UA 763226690000026009300228252 at JSC «Oschadbank»

Інститут проблем моделювання в
енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
03164, Київ 164,
вул. Генерала Наумова 15

№ 01/17 від 17 жовтня 2024 року.

Про використання результатів
дисертаційної роботи
Євдокімова В.А

Результати досліджень дисертаційної роботи Євдокімова В.А. «Методи та засоби комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу ціноутворення в організаційно-технічних системах» були використані в практичній діяльності ТОВ «ЕнерджіПул» при розробці стратегії купівлі та продажу електричної енергії та її реалізації при визначенні цінних показників формування заявок на відповідних сегментах ринку.

Представлені у роботі математичні моделі які присвячені дослідженню процесу ціноутворення, комп'ютерні моделі системи моделювання Еквант використовуються ТОВ «ЕнерджіПул» у роботі пов'язаної із здійсненням прогнозування цін на ринку «на добу наперед», а також вирішенням необхідних задач аналізу динаміки зміни цін задля коригування та вдосконалення стратегії купівлі та продажу електричної енергії на відповідних сегментах ринку

Директор ТОВ «ЕнерджіПул»



А.Ю. Бабенко

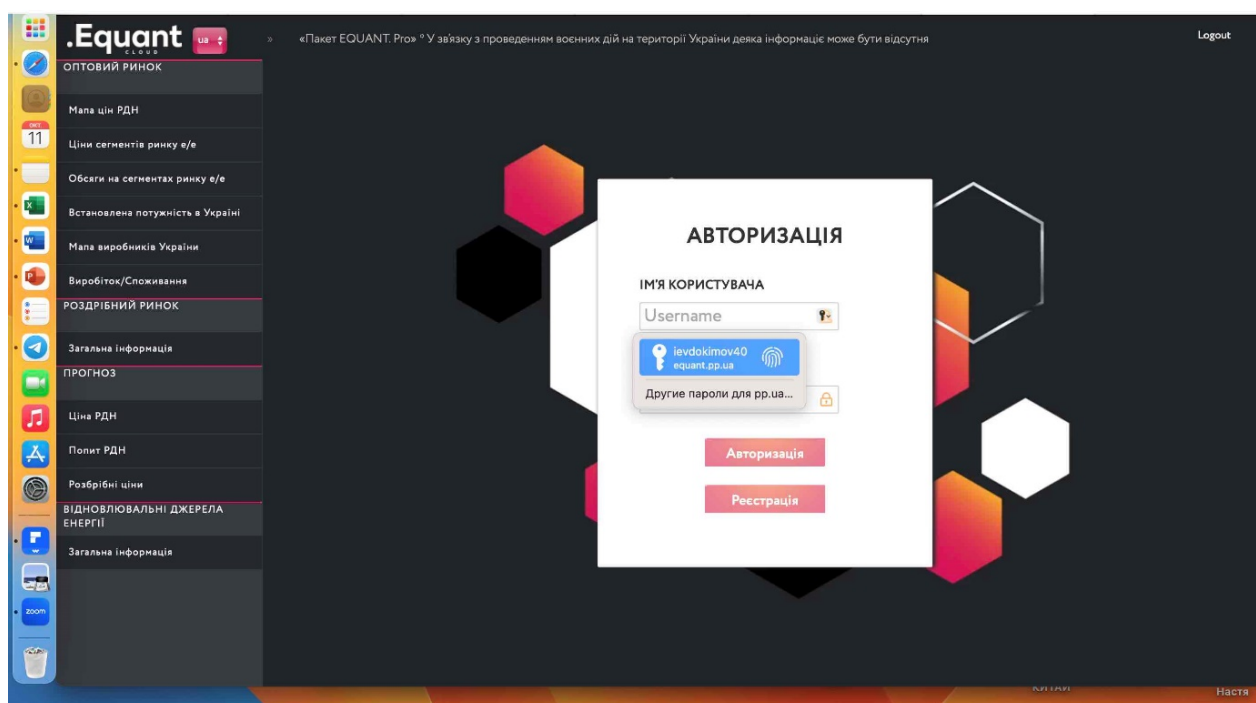
ДОДАТОК В

ПРИКЛАДИ ІНТЕРФЕЙСІВ КСМ

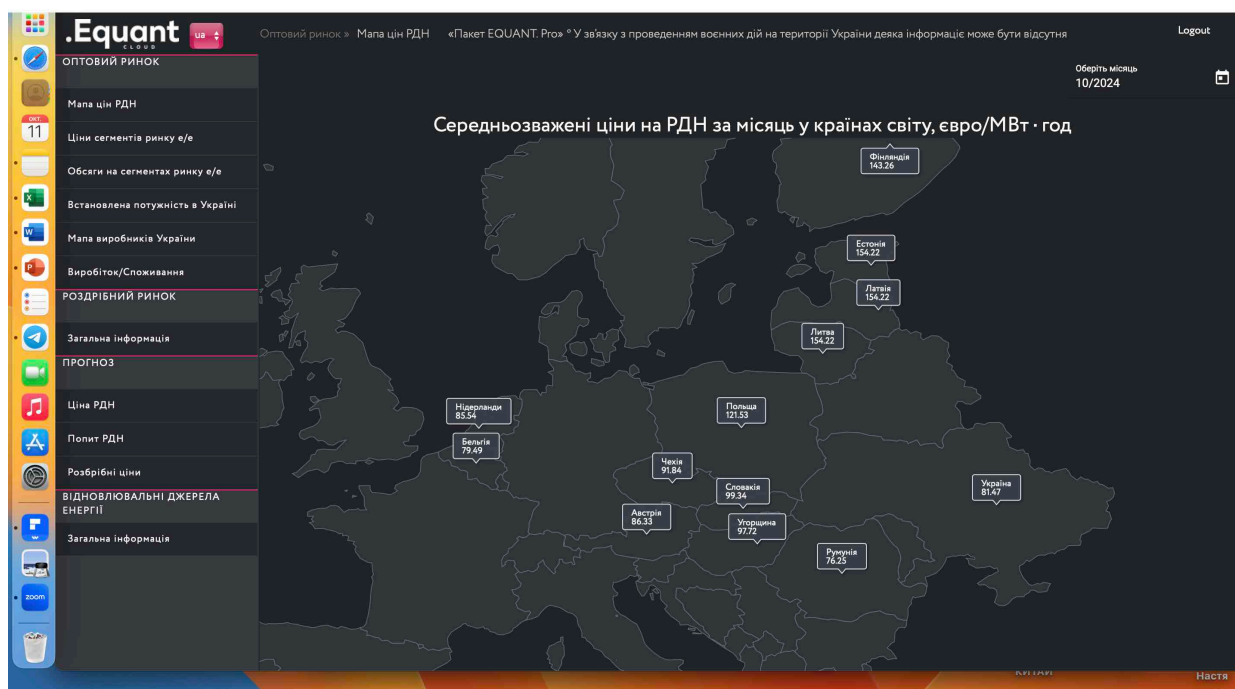
Головна сторінка



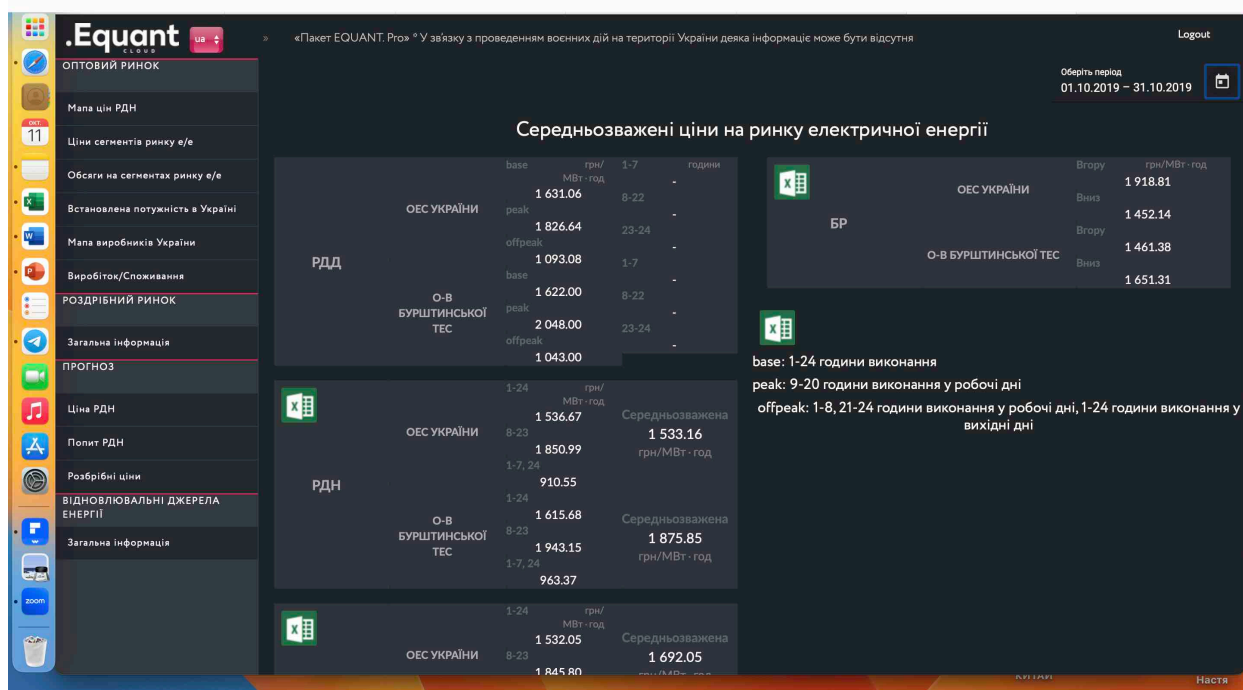
Сторінка Авторизації



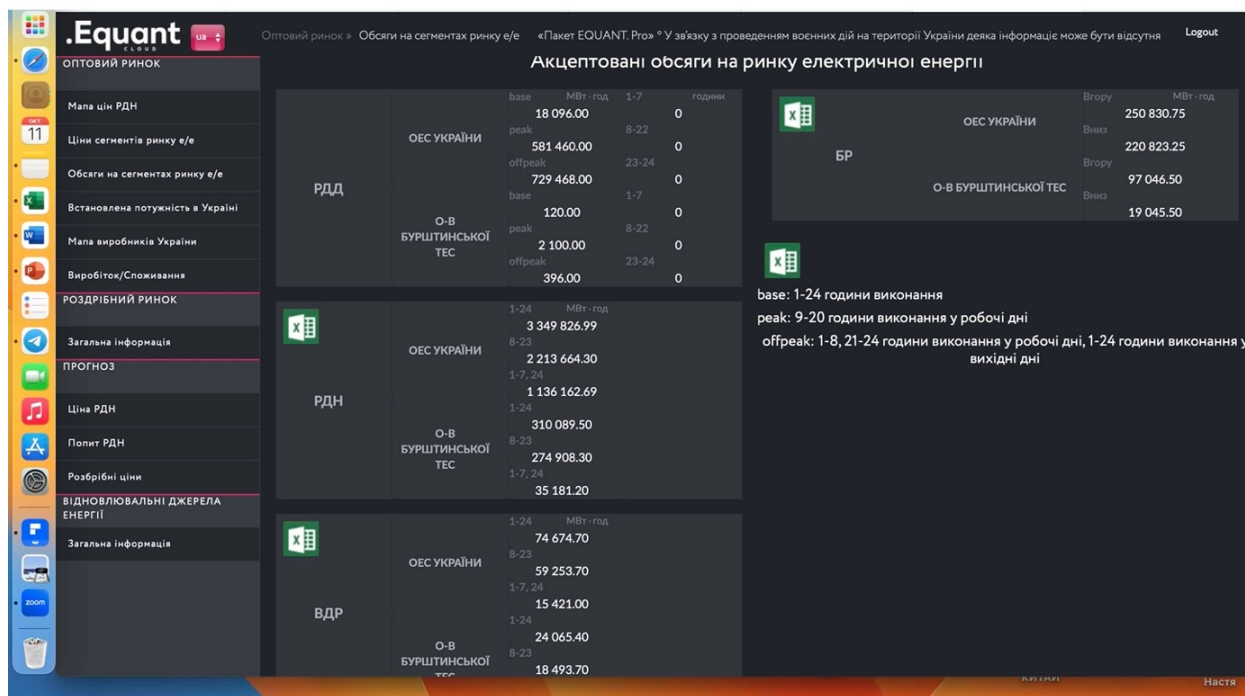
Сторінка Ціни Європи



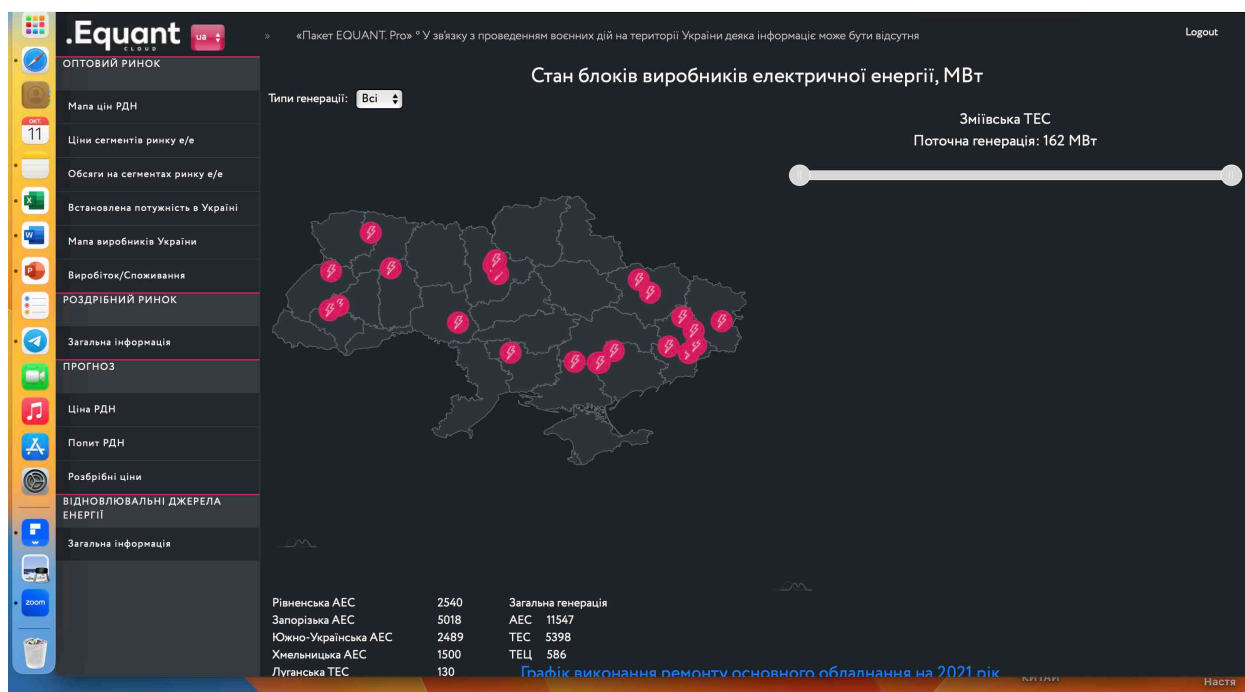
Сторінка Ціни



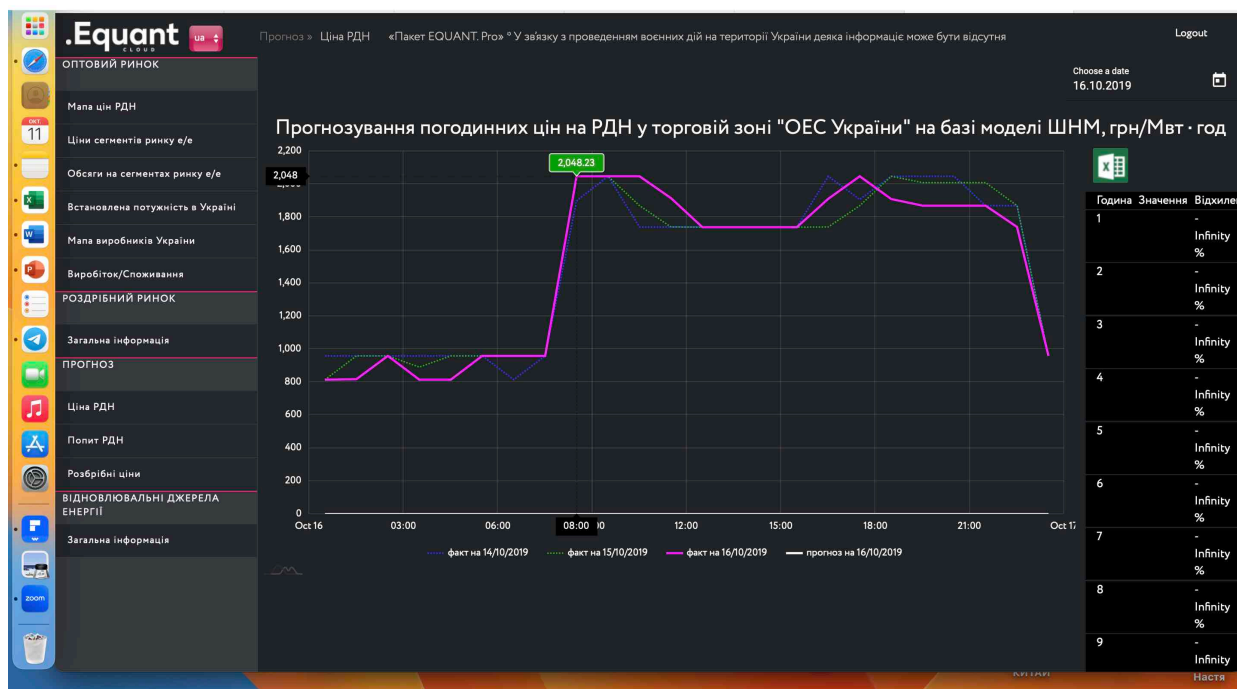
Сторінка Обсяги



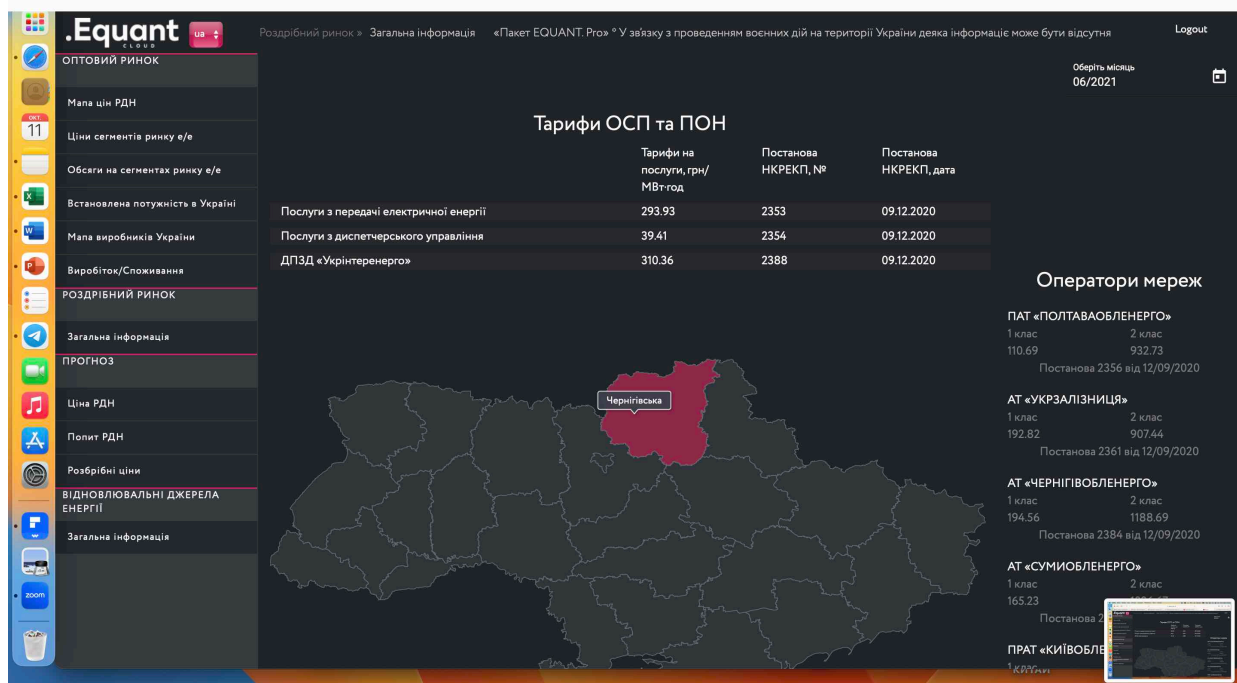
Сторінка Стан блоків



Сторінка Прогноз Ціна



Сторінка Роздрібний ринок



ДОДАТОК Г

КОПІЇ СВІДОЦТВ ПРО АВТОРСЬКІ ПРАВА



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 115256

Науковий твір «ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ МЕТОД ВУЗЛОВОЇ
ТРАНСФОРМАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЦІНОУТВОРЕННЯ НА РИНКУ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ»

(назва, назва службового твору)

Автор(и) **Борукасв Зелімхан Харитонович, Євдокімов Володимир
Анатолійович, Остапченко Костянтин Борисович**

(повне ім'я, по батьку (за наявності))

Авторські майнові права належать **Інститут проблем моделювання в енергетиці імені
Г. С. Пухова Національної академії наук України, вул. Генерала Наумова, 15,
м. Київ, 03164**

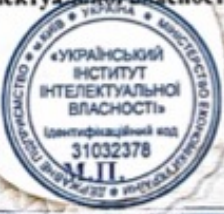
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 13 жовтня 2022 р.

В.о. Генерального директора
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»



Олександр ОПАНАСЕНКО





УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 119846

**Науковий твір «Алгоритм розрахунку прогнозу погодинного попиту на ринку
«на добу наперед»**

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Євдокімов Володимир Анатолійович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

**Авторські майнові права належать Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.
Є. Пухова Національної академії наук України, вул. Генерала Наумова, 15, м.
Київ, 03164**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 19 червня 2023 р.

**Директор
Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»**

Олена ОРЛЮК





УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 112221

База даних «Моделі процесів функціонування ринку електричної енергії»
(вид, назва службового твору)

**Автор(и) Остапченко Костянтин Борисович, Євдокімов Володимир
Анатолійович, Борукаєв Залімхан Харитонович**
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

**Авторські майнові права належать Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.
Є. Пухова Національної академії наук України, вул. Генерала Наумова, 15, м.
Київ, 03164**
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 9 березня 2022 р.

**Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»**

 **Андрій КУДІН**

