

**КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЦІНОУТВОРЕННЯ  
НА ОПТОВОМУ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

**В.А. Євдокімов**<sup>1\*</sup>, канд. наук з держ. упр., **З.Х. Борукаєв**<sup>1\*\*</sup>, докт. техн. наук,  
**К.Б. Остапченко**<sup>2\*\*\*</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,  
вул. генерала Наумова, 15, Київ, 03164, Україна.

E-mail: [jevdokimov40@gmail.com](mailto:jevdokimov40@gmail.com), [zelimh1948@gmail.com](mailto:zelimh1948@gmail.com).

<sup>2</sup> НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,  
просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: [okb2003@ukr.net](mailto:okb2003@ukr.net).

*Широкомасштабне впровадження у традиційні енергетичні системи генеруючих об'єктів і устаткування, які використовують відновлювані джерела енергії у рамках реалізації стратегії декарбонізації енергетики, призводить до зміни у структурі виробництва та споживання електроенергії, стрімкого зростання числа учасників торговельно-економічних відносин на ринку електроенергії. Це обумовлює необхідність проведення досліджень у напрямку створення простих у використанні, функціональних за призначенням об'єктно-орієнтованих комп'ютерних систем моделювання процесів конкурентного ринку в частині управління ціноутворенням задля підвищення продуктивності та результативності рішень, які приймаються учасниками ринку. В статті формулюються принципи, функціональність та вимоги до побудови такого класу комп'ютерних систем моделювання. На основі їхнього застосування визначається орієнтовний склад функціональних модулів комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення з єдиним уніфікованим середовищем інформаційних ресурсів та комп'ютерних моделей. Подано визначальну алгоритмічну модель аналізу динаміки розподілу обсягів купівлі-продажу (попиту) електроенергії на сегментах оптового ринку у складі середовища комп'ютерних моделей комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення. Наведено результати проведених модельних розрахунків для оцінки динаміки попиту на сегментах ринку, які отримано з використанням інформаційних ресурсів і модулів подання та візуалізації даних побудованої комп'ютерної системи моделювання. Бібл. 22, рис. 2, табл. 1.*

**Ключові слова:** алгоритмічна модель, комп'ютерна модель, комп'ютерна система моделювання, ринок електричної енергії, профіль показників, процеси ціноутворення.

**Вступ.** Згідно із Законом України від 13 квітня 2017 року №2019-VIII «Про ринок електричної енергії» в Україні з 01.07.2019 року почав функціонувати новий ринок електричної енергії, побудований з дотриманням вимог Директиви 2009/72/ЄС про спільні правила внутрішнього ринку електричної енергії [1]. Відповідно до цього закону створюється більш складна система взаємовідносин за новою моделлю лібералізованого багатосегментного оптового та роздрібного ринків. Але при цьому дається можливість всім учасникам цих ринків реально конкурувати між собою, а також вільно обирати як постачальника, так і виробника електричної енергії. В результаті споживач (за винятком побутових споживачів) отримує право і реальну можливість купувати електричну енергію на рівні з постачальниками у її виробників. Проте для ефективної роботи на зазначених сегментах ринку його активним учасникам необхідний інструментарій у вигляді об'єктно-орієнтованої комп'ютерної системи моделювання, яку побудовано на базі сучасних програмно-апаратних та інформаційно-телекомунікаційних засобів, що забезпечують формування інформаційних ресурсів для розробки та використання комп'ютерних моделей, призначених для вирішення практичних завдань підтримки прийняття рішень щодо 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.

© Євдокімов В.А., Борукаєв З.Х., Остапченко К.Б., 2024

ORCID: \* <https://orcid.org/0000-0001-9497-4030>; \*\* <https://orcid.org/0000-0003-1290-6451>;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-6957-8180>

**Метою** статті є визначення складу функціональних модулів комп'ютерної системи моделювання процесів ціноутворення з єдиним уніфікованим середовищем інформаційних ресурсів та комп'ютерних моделей як компоненти системи організаційного управління суб'єктами оптового ринку електроенергії.

**1. Аналіз проблеми і останніх досліджень.** Аналіз останніх досліджень показує, що питання створення математичних моделей роботи існуючого ринку електричної енергії має широкий інтерес серед учасників ринку та національного регулятора. Так, в роботах [2-4] описано моделі, які дають змогу не тільки визначати обсяги та ціни на відповідних сегментах ринку, але ще враховувати особливості об'єднання українського ринку з відповідними європейськими ринками. В [5] представлено моделі рівноважного стану електроенергетики в ринкових умовах, що дає можливість враховувати не тільки поведінку учасника ринку, але технологічні й системні обмеження, в яких вони працюють. Таким чином, постає питання створення відповідного програмного комп'ютерного інструментарію для використання математичних моделей. Як визначено у роботі [6], практично всі відомі великі світові виробники програмних та програмно-апаратних платформ, такі як: SAP, ORACLE, IBM, Siemens [7-10] 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) [11-13]. Проте, всі ці програмні комплекси в переважній більшості орієнтовані на моделювання енергетики в цілому та використовуються національними регулюючими органами для аналізу стратегій розвитку енергетичних комплексів. Але на даний час у зв'язку із розвитком і впровадженням в енергетичні системи генеруючих об'єктів і устаткування, що використовують відновлювані джерела енергії, а також з утворенням нових Мікроринків і застосуванням технологій Smart Grid (Розумна мережа) та Demand Response (Управління попитом) у світі почали формуватися конкурентні ринки електроенергії з активною участю не тільки великих гравців, але й з постійно зростаючою кількістю учасників із невеликими обсягами виробництва електроенергії та обмеженими можливостями залучення інвестиційних коштів. В результаті, застосування «великих» коштовних багатофункціональних комп'ютерних систем для широкого загалу «маленьких» гравців задля агрегування наявної інформації про процеси функціонування енергоринків, моделювання і 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.

Тому постає актуальною проблема розробки та впровадження зручної у використанні комп'ютерної системи моделювання, призначеної для вирішення задач аналізу процесів ціноутворення на ринку електричної енергії як складової системи організаційного управління енергопідприємств. Тобто такого інформаційно-технологічного та модельного середовища, яке складається із інформаційних ресурсів з масивами даних із актуальною і ретроспективною інформацією та модельного інструментарію, що може інтегруватися з іншими централізованими організаційно-технічними системами суб'єктів ринку як інформаційно-моделююча система інформаційно-аналітичного забезпечення підтримки прийняття рішень.

**2. Призначення комп'ютерної системи моделювання.** Основним завданням впровадження 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 виробників електроенергії, 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, аналітичних розрахунків, в умовах зростання обсягів даних, що використовуються, розвитку обчислювальних потужностей і засобів зберігання даних [14].

Як визначено в роботах [15, 16], суб'єкти електроенергетики за встановлених правилах роботи ринку економічно зацікавлені у вдосконаленні методів і засобів подання змін ключових параметрів функціонування ринку та моделювання процесів ціноутворення на ньому. Отже, в цілях

реалізації положень Закону про ринок електричної енергії України та створення ефективних умов функціонування енергопідприємств – учасників лібералізованого ринку електричної енергії – доцільне запровадження спеціалізованої об'єктно-орієнтованої комп'ютерної системи моделювання (КСМ) у систему організаційного управління учасників ринку, яка дасть можливість здійснювати оперативний порівняльний аналіз їхньої поведінки з іншими гравцями на ринку електричної енергії 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 КСМ, яка в попередніх публікаціях отримала назву Еквант (Equant), надасть учасникам ринку можливість визначення оцінки діапазону мінімально та максимально можливих цін і тарифів, виходячи з результатів моделювання процесів ціноутворення на ринку електричної енергії.

**3. Принципи і вимоги, на яких побудована комп'ютерна система.** КСМ процесів ціноутворення є складовою у структурно-функціональній схемі побудови системи підтримки прийняття рішень щодо організаційного управління суб'єктами ринку [6, 17].

Об'єктом автоматизації КСМ є технологічні процеси підготовки та змістовної переробки необхідної інформації для участі в роботі користувачів відповідних сегментів оптового ринку – двосторонніх договорів, «на добу наперед», внутрішньодобового та балансуєчого ринку, у тій частині, яка стосується функцій проведення моделюючих розрахунків з утворення цінкових та тарифних показників діяльності.

КСМ забезпечує автоматизацію інформаційних процесів, пов'язаних з:

- організацією підготовки вхідних та формування вихідних даних про результати розрахунків з моделювання процесів функціонування суб'єктів і сегментів ринку;
- проведенням моделюючих розрахунків для визначення складових системи показників результативності діяльності суб'єктів ринку і сегментів його в цілому;
- складанням звітності та організацією статистичного обліку оперативної і ретроспективної інформації;
- оперативним контролем за станом розвитку функціонування ринку на основі аналітичної обробки даних.

КСМ слугує системою колективного користування та включає сукупність організаційних, інформаційних, програмних і технічних засобів, що дає змогу оперативно виконувати функції інформаційно-технологічного забезпечення прийняття рішень у реальному масштабі часу.

Розробка КСМ та її складових здійснено з дотриманням таких принципів:

- використання засобів обчислювальної техніки й устаткування передачі 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 з необхідною глибиною зберігання.

Якщо класифікувати та ідентифікувати місце комп'ютерної системи моделювання в складі комплексу систем інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень в електроенергетиці, то вона є середовищем комп'ютерних моделей процесів функціонування енергетичних об'єктів ринкової структури, яке включає:

- засоби математичного формального опису досліджуваних складних об'єктів та процесів взаємодії їхніх складових структурних елементів між собою та із зовнішнім середовищем;
- єдиний інформаційний простір, що поєднує засоби концептуального та інформаційного моделювання процесів взаємодії складових структурних 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 дотримувалися наступних загальносистемних вимог:

- системність, яка відтворюється в раціональній декомпозиції системи, у тому числі на складові компоненти, модулі та підсистеми, що надає можливість автономної розробки та

впровадження складових частин на основі єдиної технічної політики і забезпечує цілісність системи за її взаємодії зі змінним зовнішнім середовищем;

- відкритість, яка полягає у здатності системи до розширення складу наданих послуг інформаційного забезпечення та збільшення кількості джерел інформації і користувачів без порушення її внутрішнього функціонування та погіршення експлуатаційних характеристик;

- стандартизація, яка полягає у раціональному застосуванні міжнародних стандартів в електроенергетиці, а також типових, уніфікованих проектних рішень та технологій, внутрішніх і зовнішніх інтерфейсів і протоколів, що закладає фундамент для блокової, модульної побудови компонентів і підсистем системи в цілому;

- узгодженість, яка відтворює взаємозалежність між собою процесів проектування та поетапної модернізації структурних складових системи, що забезпечують взаємопов'язаність її складових та постійну адаптацію до вимог користувачів і зовнішнього середовища, що змінюються.

Крім перелічених загальносистемних вимог враховувалися ще й спеціальні вимоги до інформаційної складової КСМ, які визначають її функціональність: повнота інформації; ієрархічність (підпорядкованість) інформації; семантична єдність; переносимість системи; комплексна інформаційна безпека.

Із врахуванням наведених вимог сформовано наступний склад компонентів та модулів КСМ, які мають відмінні особливості функціональності, а саме:

1) компонент єдиного сховища даних, що призначений для накопичення та зберігання інформації з різних джерел, необхідної для вирішення завдань моніторингу і прогнозування ключових параметрів функціонування суб'єктів і сегментів ринку;

2) модулі збору та завантаження даних у сховище даних, що забезпечують можливість автоматизованого та ручного введення даних з 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 і публікації їх в мережі Інтернет;

6) 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 подається як комплекс програм, який реалізує функції системи за інформаційною технологією "клієнт-сервер" і спирається у роботі на інструментальні засоби обробки запитів і даних, що надходять до системи із зовнішнього по відношенню до структуроутворюючих систему компонентів Internet-середовища, де знаходяться клієнти-користувачі КСМ. В результаті до архітектури КСМ включені наступні інструментальні компоненти: проксі-сервер обробки запитів, веб-сервер відтворення інформації, сервер обробки даних, сервер БД.

Слід відзначити наступну 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 застосовується підхід подання показників функціонування суб'єктів ринку, безпосередньо пов'язаних із обробкою даних, що забезпечує адаптованість структури бази до можливих змін у структурі суб'єктів ринку і особливостей їхнього функціонування в майбутньому. Цей підхід побудований на механізмі опису мета-даних через створення класифікаторів показників, їхніх зв'язків та сховища даних. Повну структуру БД КСМ наведено у роботі [18]. Прикладом реалізації КСМ на визначених принципах і встановлених вимогах є інтерфейс системи Equant, опису якої присвячено роботу [19].

**4. Алгоритмічна модель аналізу динаміки попиту електроенергії на сегментах оптового ринку.** Функція моделювання комп'ютерної системи обумовлює необхідність аналітичної обробки вхідних оперативних і ретроспективних даних функціонування суб'єктів і сегментів ринку з наступною підготовкою інформації для процесів оцінки та прогнозування показників діяльності. Однією із важливих комп'ютерних моделей оцінки процесів функціонування ринку є модель аналізу динаміки попиту на електроенергію на ціноутворюючих сегментах оптового ринку. Розглянемо

процес утворення моделі, який починається з визначення вхідних і вихідних змінних величин і параметрів моделі та формалізації критеріїв оцінки попиту. Відповідно до Правил ринку визначено наступні часові інтервали в організації процесу купівлі-продажу електроенергії: доба постачання – доба, в якій відбувається фізичне постачання обсягів електричної енергії, 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 аналізу динаміки розподілу купівлі-продажу електроенергії для оцінки попиту на оптовому ринку в розрізі часток сегментів ринку є наступні погодинні вхідні величини, для яких введемо такі позначення:

1)  $q^{\text{РДД},k}(i,j)$  – обсяги продажу електроенергії в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України та Енергетичному острові «Бурштинська ТЕС» (БуТЕС) на ринку двосторонніх договорів (РДД);

2)  $q^{\text{РДН},k}(i,j)$  – акцептовані обсяги купівлі-продажу в ОЕС та БуТЕС на ринку «на добу наперед» (РДН);

3)  $q^{\text{ВДР},k}(i,j)$  – акцептовані обсяги купівлі-продажу в ОЕС та БуТЕС на внутрішньодобовому ринку (ВДР);

4)  $q^{\text{БР},k}(i,j)$  – обсяги балансуєної енергії «вгору» та «вниз» в ОЕС та БуТЕС на балансуєному ринку (БР);

5)  $p^{\text{РДН},k}(i,j)$  – маржинальна ціна в ОЕС та БуТЕС на РДН.

Введені позначення змінних обсягів і ціни інтерпретуються наступним чином:

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 у розрахункову годину  $j \in (1,24)$  доби постачання  $i \in (01.01, \dots, 31.12)$ ;

б)  $p^{\text{РДН},k}(i,j) p^{s,k}(i,j)$  – ціна продажу на сегменті  $s$  у системі  $k$ , що склалася у 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 і розподілу електроенергії у ОЕС.

Показниками оцінки попиту на оптовому ринку будемо вважати наступні вихідні величини, які позначимо як:

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

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

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

4)  $\{w^s(n) | n \in (\text{рік}, \text{кліматичний період}, \text{місяць}), s \in (\text{РДД}, \text{РДН}, \text{ВДР}, \text{БР})\}$  – 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)  $\{z^{\text{РДН}}(n) | n \in (\text{рік}, \text{кліматичний період}, \text{місяць})\}$  – інтервальні (сезонні) профілі середньої (середньозваженої) ціни продажу електроенергії на РДН.

Для оцінки попиту розрахунок профілів визначається наступними алгоритмами:

$$v^s(n,j) = \frac{1}{K(n)} \sum_{i \in S(n)} (q^{s,\text{ОЕС}}(i,j) + q^{s,\text{БуТЕС}}(i,j)); w^s(n,j) = \frac{v^s(n,j)}{\sum_s v^s(n,j)}; v^s(n) = \sum_{j=1}^{24} v^s(n,j);$$

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

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

В результаті використання алгоритмічної моделі надається можливість визначати наступні залежності: ціни купівлі-продажу (погодинну, інтервальну) від структури продажу електроенергії; загального обсягу (погодинного, інтервального) від структури продажу електроенергії.

Інтегрованим критерієм оцінки динаміки попиту в наведеній моделі визначено загальну (середньодобову) ціну електроенергії з урахуванням ціни на РДН, яка визначається за формулами

$$Z(n) = \sum_s \sum_{j=1}^{24} p^{\text{РДН, ОЕС}}(i, j) \times (q^{s, \text{ОЕС}}(i, j) + q^{s, \text{БутЕС}}(i, j)), \quad \tilde{Z}(n) = \frac{1}{K(n)} Z(n).$$

**5. Приклади експериментальних розрахунків моделі.** Для аналізу динаміки змін обсягів попиту на електроенергію на відповідних сегментах ринку та ціни на РДН використано модельні профілі та побудовано їхні графічні діаграми за період з 2020 по 2021 роки. А саме: погодинні середні обсяги і ціна продажу (рис. 1); посезонні середньогодинні обсяги і ціна продажу (рис. 2); річний середньогодинний обсяг і ціна продажу електричної енергії на сегментах ринку. Інформацію для аналізу було отримано за допомогою інформаційного ресурсу КСМ Equant, сформованого на основі ретроспективних даних Оператора системи передачі [20], Оператора ринку [21] та Української енергетичної біржі [22].

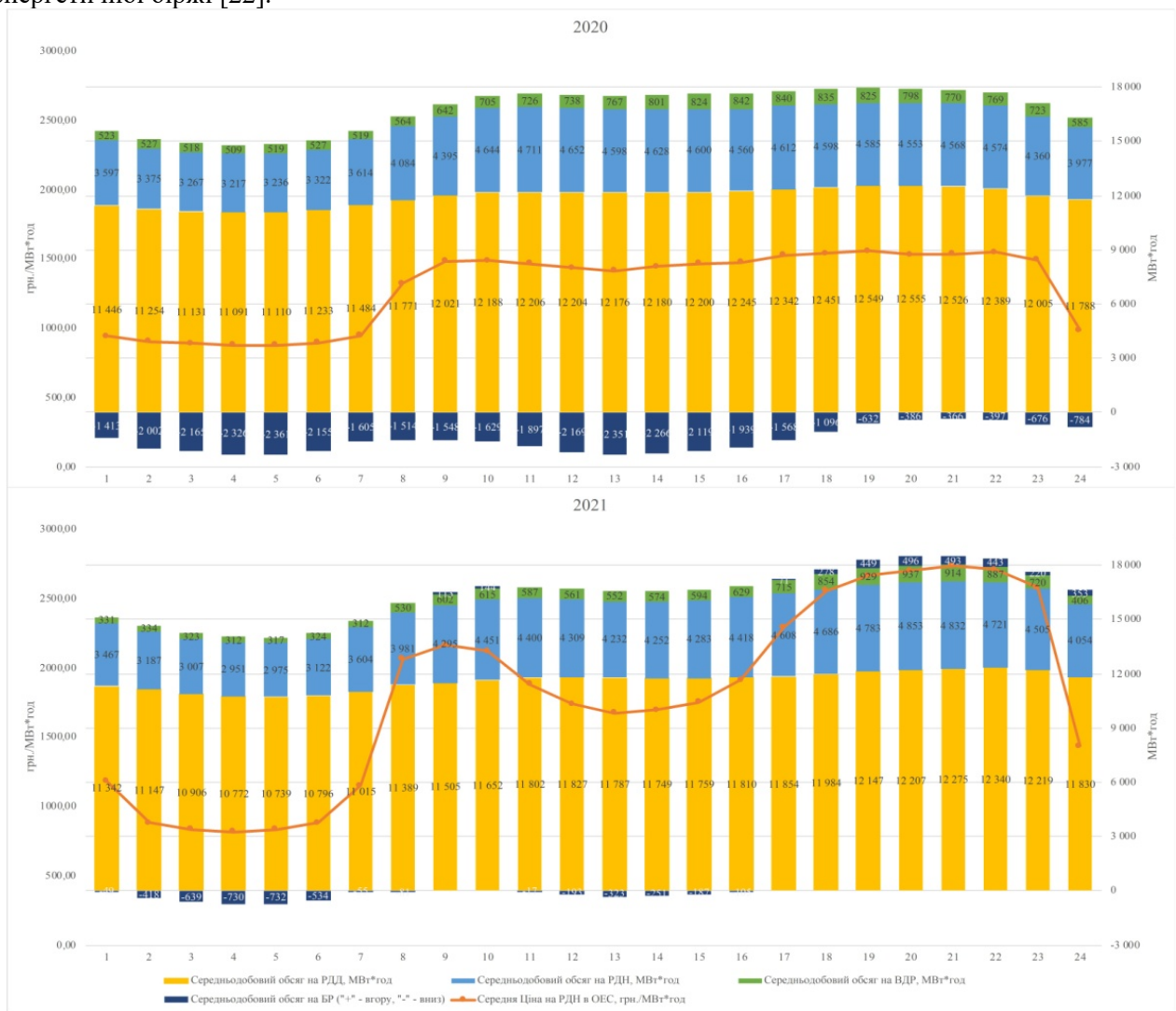


Рис. 1

На рис. 1 відображено графічну інформацію щодо динаміки погодинного профілю середніх обсягів і ціни продажу, яка підтверджує суттєву нестационарність у часі процесу ціноутворення та дає можливість зробити відповідні висновки про наявність якісної залежності середньої ціни РДН від зміни структури обсягів акцептованої електричної енергії на відповідних сегментах ринку.

Аналогічну залежність можна спостерігати на рис. 2, а саме посезонному профілю середньогодинних обсягів продажу електричної енергії за 2020-2021 роки.

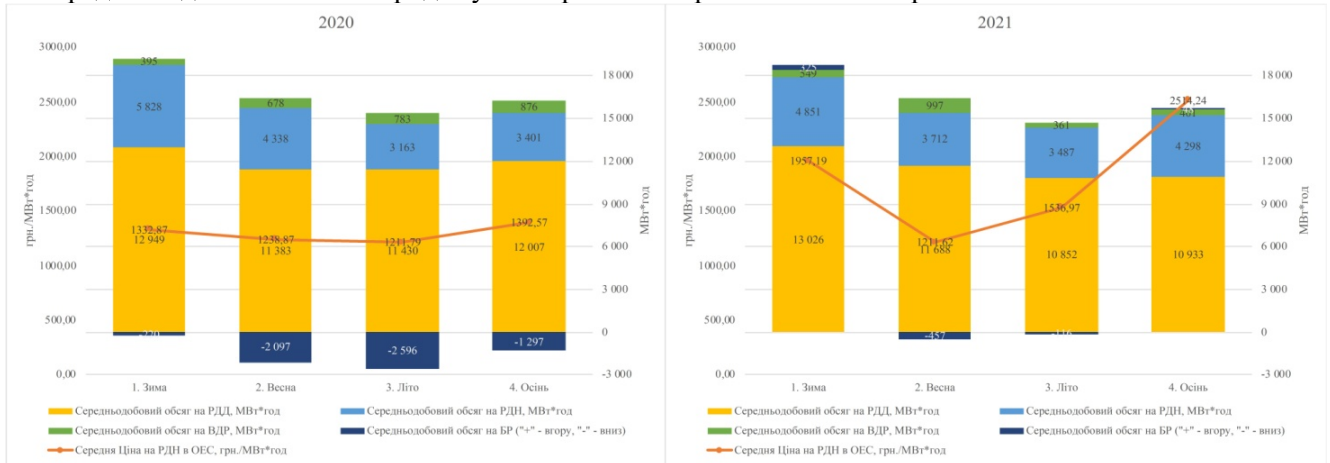


Рис. 2

Як відомо, в ОЕС України визначено режими роботи енергетичного устаткування, за яких Оператор системи передачі задля балансування генерації і попиту на ринку електроенергії (активного навантаження) здійснює розвантаження (вниз) або завантаження (вгору) енергоблоків, тому що енергетична система не може в часі не реагувати на зміну фактичного попиту електроенергії шляхом корекції її виробництва. Тобто знаходиться у дефіцитному режимі, коли на ринку існує непокритий попит, або у профіцитному режимі, коли на ринку є надлишок пропозицій. Наведені на рис. 1 та рис. 2 результати розрахунків профілів зміни обсягів реалізації електроенергії та ціни її продажу на БР підтверджують, що за профіцитного режиму роботи енергосистеми ціна на продаж електричної енергії зменшується і навпаки – за дефіцитному режимі ціна збільшується.

У таблиці наведено результати розрахунків відсоткових річних, сезонних профілів динаміки попиту на електроенергію, яка визначає структуру продажу та приріст ціни і обсягів для якісної оцінки залежностей цих основних показників функціонування оптового ринку.

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, сезонними профілями можна встановити наступні тенденції у зміні структури продажу електроенергії 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 у цих профілях мають певну залежність у динаміці напряму зміни. Так, напрями зміни обсягу і ціни у поточному розрахунковому періоді постачання в цілому збігаються, але сповільнення спаду ціни поточного періоду (літо 2020 р. у -2%) обумовлює зростання обсягу наступного періоду (осінь 2020 р. у 17%), а пришвидшення зростання ціни поточного періоду (зима 2021 р. у 40%) обумовлює спадання обсягу наступного періоду (весна 2021 р. у -15%). Наведені в таблиці результати ґрунтуються на погодинних значеннях шуканих величин. Їхній короткий аналіз оціночно показав, 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 «не ефективну» 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. Тоді частка БР у погодинному розрізі вже склала 1-4%.

**Висновки.** Запропонований склад функціональних компонентів і модулів КСМ забезпечує створення об'єктно-орієнтованого середовища та єдиного сховища даних для подальшої інтеграції існуючих і розроблюваних програмних комплексів суб'єктів ринку електроенергії.

База даних КСМ, яка семантично узгоджена із пов'язаними модулями обробки даних системи, забезпечує адаптованість до можливих змін у структурі суб'єктів ринку і особливостей їхнього функціонування та дає змогу підвищити оперативність і якість вирішення завдань управління процесами ціноутворення на ринку електроенергії.

Наведено приклад модельних розрахунків, який демонструє практичні можливості застосування побудованої КСМ для якісної оцінки динаміки розподілу обсягів купівлі-продажу (попиту) електроенергії на сегментах оптового ринку. А результати розрахунків створюють основу для побудови комп'ютерних імітаційних моделей, які відображають залежності взаємопов'язаних динамічних потокорозподілів: обсягів та фінансів на всіх стадіях технологічного процесу виробництва, передачі і розподілу електроенергії.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Теоретико-ігрові моделі та методи мінімізації ризиків для систем підтримки прийняття рішень з управління попитом на ринку електроенергії (ПОТЕНЦІАЛ), КПКВК 6541030.*

1. Директива Європейського парламенту та Ради від 13 липня 2009 року про спільні правила внутрішнього ринку електроенергії: Директива від 13.07.2009 р. № 2009/72/ЄС. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0072> (дата звернення 23.02.2024).
2. Блінов І.В., Парус Є.В. Врахування мережних обмежень та мінімізація різниці цін між ринками електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 81–88.
3. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційна модель ринку електричної енергії «на добу наперед» з неявним урахуванням мережних обмежень енергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.060>.
4. 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>.
5. Саух С.Є., Борисенко А.В. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія. К.: Три К, 2020. 340 с.
6. 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. Т. 43. № 4. С. 51–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.051>.
7. 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).
8. Oracle Utilities Management Solutions for Energy and Water. URL: <https://www.oracle.com/utilities/> (дата звернення 23.02.2024).
9. Transformative energy and utilities solutions from IBM. URL: <https://www.ibm.com/industries/energy?lnk=flatitem> (дата звернення 23.02.2024).
10. Siemens Global Products&Services: Energy. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy.html> (дата звернення 23.02.2024).
11. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/documentation/> (дата звернення 23.02.2024).
12. Plexos market simulation software. URL: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos/> (дата звернення 23.02.2024).



13. Aurora electric modeling, forecasting and analysis software. URL: <https://energyexemplar.com/solutions/aurora/> (дата звернення 23.02.2024).
14. Макоклюев Б.И., Антонов А.В., Набиев Р.Ф. Информационная структура и программные средства обработки и хранения данных технологического оборудования и режимных параметров. *Электрические станции*. 2004. № 6. С. 48–52.
15. 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>.
16. 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>.
17. 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*. Ed. by O. Kyrylenko, S. Denysiuk, D. Derevianko, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets. Cham: Springer. 2023. Vol. 220. Pp. 257–279. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_12).
18. 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>.
19. 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>.
20. Балансуючий ринок та врегулювання небалансів: Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: [https://ua.energy/uchasnikam\\_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/](https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/) (дата звернення 23.02.2024).
21. Результати торгів: Оператор ринку. URL: [https://www.oree.com.ua/index.php/control/results\\_mo/DAM](https://www.oree.com.ua/index.php/control/results_mo/DAM) (дата звернення 23.02.2024).
22. 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).

## COMPUTER SIMULATION SYSTEM OF PRICE-FORMATION PROCESSES IN THE WHOLESALE ELECTRICITY MARKET

V.A. Evdokimov<sup>1</sup>, Z.Kh. Borukaiev<sup>1</sup>, K.B. Ostapchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering National Academy of Sciences of Ukraine, General Naumov Str., 15, Kyiv, 03164, Ukraine.

E-mail: [ievdokimov40@gmail.com](mailto:ievdokimov40@gmail.com), [zelimh1948@gmail.com](mailto:zelimh1948@gmail.com).

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: [okb2003@ukr.net](mailto:okb2003@ukr.net).

*The large-scale introduction into traditional energy systems of generating facilities and equipment that use renewable energy sources as part of the implementation of the energy decarbonization strategy leads to a change in the structure of electricity production and consumption, a rapid increase in the number of participants in trade and economic relations on the electricity market. This determines the need for conducting research in the direction of creating easy-to-use, functional object-oriented computer systems for modeling competitive market processes in terms of pricing management in order to increase the productivity and effectiveness of decisions made by market participants. The article formulates the principles, functionality and requirements for building such a class of computer modeling systems. Based on their application, the approximate composition of the functional modules of the computer system for modeling pricing processes with a single unified environment of information resources and computer models is determined. A deterministic algorithmic model is presented for the analysis of the dynamics of the volume distribution of electricity purchase and sale (demand) in the wholesale market segments as part of the computer models environment of the computer simulation system of price formation processes. The results of model calculations are presented for assessing the dynamics of demand in market segments, which are obtained using information resources and data presentation and visualization modules of the constructed computer simulation system. References 22, figures 2, table 1.*

**Keywords:** algorithmic model, computer model, computer simulation system, electricity market, indicator profile, pricing processes.

1. Directive of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity: Directive 13.07.2009 p. No 2009/72/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0072> (accessed at 23.02.2024).
2. Blinov I.V., Parus Ye.V. Congestion management and minimization of price difference between coupled electricity markets. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 81 – 88. (Ukr).
3. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Ivanov G.A. Simulation model of the day-ahead electricity market with implicit consideration of power systems network constraints. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 60–67. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.060>.
4. 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>.
5. Saukh S.E., Borysenko A.V. Mathematical modeling of electric power systems in market conditions: monograph. Kyiv: Tri K, 2020. 340 p. (Ukr).
6. Ostapchenko K.B., Lisovychenko O.I., Borukaiev Z.Kh., Evdokimov V.A. Creation of information modeling system for analysis of pricing processes in the electricity market. *Elektronne Modeliuvannia*. 2021. Vol. 43. No 4. Pp. 51–68. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.04.051>.
7. 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> (accessed at 23.02.2024).
8. Oracle Utilities Management Solutions for Energy and Water. URL: <https://www.oracle.com/utilities/> (accessed at 23.02.2024).
9. Transformative energy and utilities solutions from IBM. URL: <https://www.ibm.com/industries/energy?lnk=flatitem> (accessed at 23.02.2024).
10. Siemens Global Products&Services: Energy. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy.html> (accessed at 23.02.2024).
11. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/documentation/> (accessed at 23.02.2024).
12. Plexos market simulation software. URL: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos/> (accessed at 23.02.2024).
13. Aurora electric modeling, forecasting and analysis software. URL: <https://energyexemplar.com/solutions/aurora/> (accessed at 23.02.2024).
14. Makokliuev B.I., Antonov A.V., Nabiev R.F. Information structure and software for processing and storing data of technological equipment and operating parameters. *Elektricheskie stantsii*. 2004. No 6. Pp. 48–52. (Rus).
15. 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. *Adaptivni systemy avtomatichnoho upravlinnia*. 2019. Vol. 1. No 34. Pp. 42–52. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.1.2019.178228>.
16. Borukaiev Z.Kh., Ostapchenko K.B., Lisovychenko O.I. A method for constructing an informal hybrid model for forecasting electricity consumption in the wholesale market. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu Problem Modeliuvannia v enerhetytsi Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2019. No 89. Pp. 157–166. (Rus). DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3860762>.
17. 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*. Ed. by O. Kyrylenko, S. Denysiuk, D. Derevianko, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets. Cham: Springer. 2023. Vol. 220. Pp. 257–279. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_12).
18. Ostapchenko K.B., Evdokimov V.A., Borukaiev Z.Kh. Operational data warehouse of the decision support system for organizational management of the electricity market. *Elektronne Modeliuvannia*. 2022. Vol. 44. No 3. Pp. 101–112. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.44.03.101>.
19. Evdokimov V.A. Functional organization of the user interface of the hardware and software computer system Equant Cloud. *Elektronne Modeliuvannia*. 2023. Vol. 45. No 2. Pp. 83–94. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.02.083>.
20. Balancing Market and Settlement of Imbalances: National power company "Ukrenergo". URL: [https://ua.energy/uchasnikam\\_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-ryнку-2/](https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-ryнку-2/) (accessed at 23.02.2024). (Ukr).
21. Trading results: Market Operator. URL: [https://www.oree.com.ua/index.php/control/results\\_mo/DAM](https://www.oree.com.ua/index.php/control/results_mo/DAM) (accessed at 23.02.2024). (Ukr).
22. Exchange quotations, Base load index of electric power: Ukrainian Energy Exchange. URL: <https://www.uex.com.ua/exchange-quotations/electric-power/indexes/> (accessed at 23.02.2024). (Ukr).

Надійшла 28.02.2024  
Остаточний варіант 19.03.2024