

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

ЄВДОКІМОВ ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 004.94 : 621.311.001.57

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

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2024

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 направленою» 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 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. Геєць, 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 ПМЕ 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 багатоелементної 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 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 поточкорозподілу 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 поточкорозподілу ЕЕ та її вартості 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 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. 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 розроблених 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) задля визначення рівноважної ціни ЕЕ на підставі цінкових заявок виробників та постачальників ЕЕ. Модель представлено у вигляді нелінійної задачі, що містить два типи невідомих змінних – цілі 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. На відміну від відомих таку модель сформовано у вигляді оптимізаційної задачі з параметрично заданими рівноважними цінами на ринку. Запропоновано обчислювальний метод пошуку оптимального рішення задач моделювання та на його підставі розроблений алгоритм та програму його реалізації.

6. Розроблено структурну організацію програмного забезпечення КСМ процесу ціноутворення у складі системи інформаційно-моделюючої та інформаційно-розрахункової підсистем як базового компонента системи підтримки прийняття рішень. Комплексна взаємодія цих підсистем забезпечується єдиним інформаційним простором, утвореним інформаційно-довідковими модулями різного призначення. Програмне середовище комп'ютерної системи утворює єдиний програмний продукт організації і розгортання інтерфейсів в режимі онлайн засобами Internet-середовища для супроводу діючих та створення нових функціональних задач організаційного управління процесами ціноутворення на ринку ЕЕ.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Наукові результати, а саме модель збирання даних динаміки змін кількісних та якісних показників функціонування об'єктів альтернативної електроенергетики, що дозволяє здійснювати збір і систематизацію актуальної інформації про об'єкти, з необхідною дискретністю у часі, розширяє можливості її подальшого використання у вирішенні наукових і практичних задач інтеграції зазначених об'єктів до централізованої електроенергетичної системи, удосконаленню механізмів

ціноутворення на ринку ЕЕ. Підтверджується листом підтримки дисертаційної роботі 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 потокорозподілу, 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 методіку 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 моделювання 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 включає 158 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі представлено загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність науково-прикладної проблеми, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено відомості про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено наукову новизну основних результатів і практичне значення, надано інформацію про публікації та особистий внесок в наукових працях, опублікованих у співавторстві, про апробацію матеріалів роботи та її структуру.

У першому розділі наведено огляд та аналіз публікацій, присвячених вирішенню науково-практичних проблем розвитку ринку 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 КСМ задля організації інформаційно-технологічного забезпечення, вирішення задач моделювання й обчислення у процесі ціноутворення на ринку ЕЕ, всебічного дослідження процесу ціноутворення та аналізу діючих механізмів управління процесом ціноутворення з безпосередньою участю суб'єктів ринку з метою підвищення його прозорості.

Формальний опис організаційно-технічної системи ціноутворення ринку електроенергії. На рис. 1.1 наведено структурну схему організаційно-технічної

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

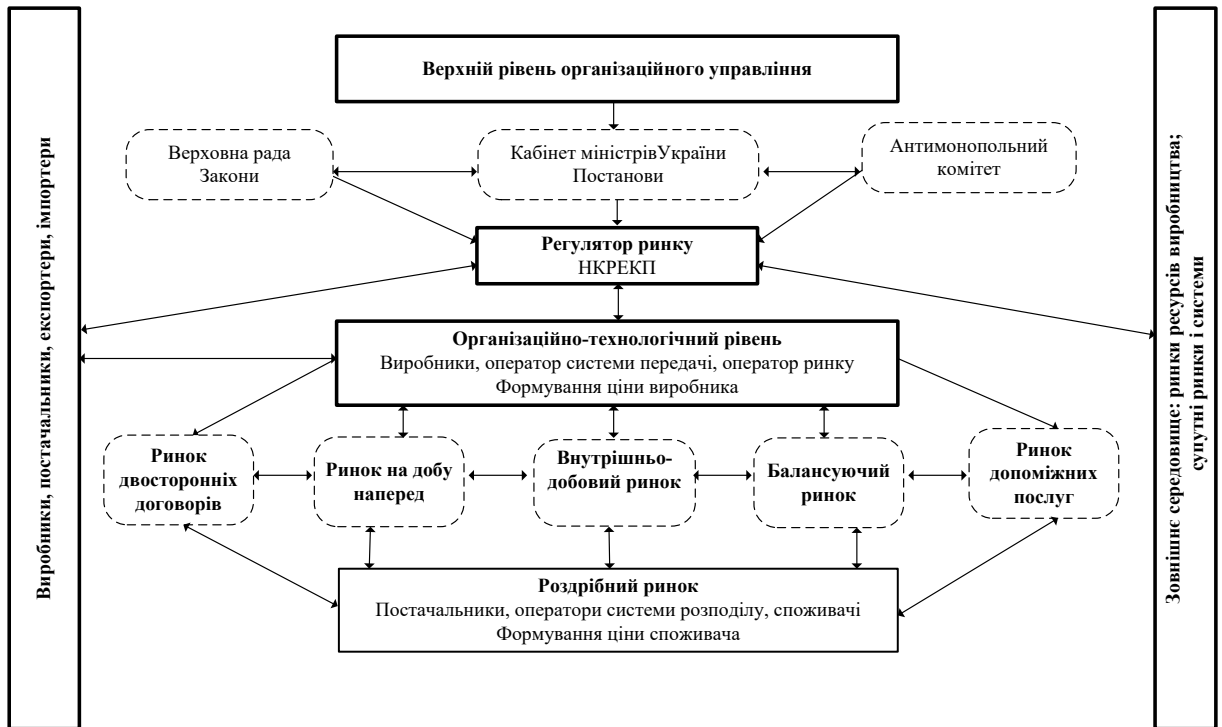


Рисунок 1.1. Структурна схема організаційно-технічної системи управління ціноутворенням на ринку ЕЕ

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 і розвитку ринку ЕЕ.

Другий рівень – Національна комісія, уповноважений Верхнім рівнем організаційного управління орган регулювання, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг (НКРЕКП), – Регулятор ринку.

Третій рівень – Організаційно-технологічний рівень управління утворюють підсистеми – сегменти ринку, що забезпечують управління процесами взаємоузгодженого оперативного-технологічного та інформаційного забезпечення процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання спільно виробленої продукції, тобто ЕЕ, на ринку.

Четвертий рівень – управління роздрібним ринком ЕЕ.

Таким чином, 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.

Аналіз стану досліджень проблеми математичного та комп'ютерного моделювання процесу ціноутворення. Дослідженням комплексу теоретичних і прикладних проблем вдосконалення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання, призначених для аналізу ефективності механізмів функціонування окремих СОТС, приділяється велика увага.

До числа таких проблем входять наступні: адекватний математичний опис процесів функціонування СОТС і розробка 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 їхню 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.

Науково-прикладних проблем розвитку ринку ЕЕ, вирішення яких вимагає проведення теоретичних досліджень, існує дуже багато. Серед них є проблеми, пов'язані з підвищенням енергоефективності процесів виробництва, передачі і використання ЕЕ, з економічною диспетчеризацією виробництва передачі та розподілу ЕЕ, зі змінами структури виробництва і споживання ЕЕ, ціно- та тарифоутворення на ЕЕ тощо.

Крім зазначених проблем багато ринків ЕЕ стикаються з проблемою появи безпосередньо в системі розподілу ЕЕ генеруючих установок (ГУ) розподіленої генерації, яка має флуктуаційні особливості. Виявлено і значні додаткові проблеми, які стосуються роботи ринку ЕЕ в цілому. Серед них наступні: організаційні, пов'язані з необхідністю регламентувати діяльність ГУ розподіленої генерації в об'єднаній електроенергетичній системі (ОЕС); організаційно-економічні, пов'язані з 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 і необхідністю підтримки «гарячого резерву» потужності дзая забезпечення її балансу у процесі виробництва і 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.

Тобто реалізація стратегії розвитку електроенергетики вимагатиме вирішення комплексу науково-технічних проблем, пов'язаних з технологічним, інформаційним та нормативним забезпеченням надійного функціонування ОЕС України разом із Європейською енергетичною системою ENTSO-E в ринкових умовах.

Проблеми функціонування систем ціноутворення. Однією з ключових проблем розвитку ринку у багатьох країнах світу є проблема ціноутворення на ринках ЕЕ, якій присвячено дуже багато робіт. А їхнім оглядам, класифікації застосовуваних нових підходів, у тому числі і мультиагентного, та інших методів

аналізу процесів ціноутворення, прогнозу основних показників функціонування ринку – десятки таких робіт. І цей потік не зменшується. Ця обставина дає можливість зробити висновок про те, що проблема підвищення продуктивності прийняття рішень в напрямку формування нових та удосконалення діючих механізмів ціноутворення на ринку ЄЕ шляхом розробки та застосування 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 на ринку ЄЕ є актуальною.

Для її вирішення необхідно визначити систему взаємопов'язаних задач, реалізація яких із застосуванням нових технологій імітаційного моделювання та інформаційно-комунікаційних технологій забезпечить підвищення обґрунтованості та якості прийнятих рішень. Теоретичні дослідження цієї проблеми тривають у багатьох країнах світу, що дозволяє зробити висновок про її важливість та про те, що від її вирішення, зрештою, залежить і розв'язання інших проблем ринку ЄЕ та енергетики в цілому.

Приклади недосконалості систем ціноутворення. Приклад 1. Ринок України. Основними структурними елементами системи організаційного, оперативного-технологічного та інформаційного управління, відповідно до Правил ринку, визначені Оператор ринку (ОР) та Оператор системи передачі (ОСП), які і забезпечують роботу на новостворених сегментах ринку в сенсі організації торгівлі ЄЕ і допоміжними послугами з урахуванням вимог забезпечення надійності поставок ЄЕ та стійкості режимів ОЕС. Теоретично всі суб'єкти спроможні купувати та продавати ЄЕ за вільними ринковими (нерегульованим) цінами. Однак фактично тільки на сегментах ринку «на добу наперед» (РДН), внутрішньодобовий ринок (ВДР) і балансуєчий ринок (БР) реалізовано ринковий принцип ціноутворення. В його основу покладено механізм конкурентного ціноутворення, що враховує баланс попиту та пропозиції на аукціоні цінних торгових заявок покупців і продавців ЄЕ.

На сегментах ринку ВДР і БР проводиться усунення поточного небалансу між попитом і пропозицією, що здійснюється шляхом покупки/продажу ЄЕ за цінами, які формуються із застосуванням відомих, затвердженими Регулятором ринку, механізмів ціноутворення.

Аналіз стану взаєморозрахунків між учасниками ринку показав, що незважаючи на те, що вже 5 років ринок ЄЕ в Україні працює за лібералізованими правилами європейського зразка, але і досі у країні сьогодні залишається чимало проблем, які безпосередньо пов'язані з недосконалістю процесу ціноутворення. Неурегульованість та відсутність комплексного підходу до управління процесами ціноутворення на рівні взаємодії між учасниками ринку ЄЕ призвели до створення на ринку ЄЕ великих боргів між тими, хто є найбільш впливовими гравцями процесу ціноутворення.

Приклад 2. Ринки в країнах ЄС. Не менш складна ситуація із ціноутворенням виявляється на ринках ЄЕ і в країнах ЄС. Періодично проблеми із ціноутворенням на ринках ЄЕ в ЄС виникали і раніше. Як приклад, наведемо ситуації в деяких країнах ЄС, що призвели до формування проблеми, яка отримала у науковій літературі назву «дефіциту тарифу». Дефіцит тарифу в Іспанії поступово накопичувався з 2000 року. Станом на кінець 2013 року страна мала найвищий показник дефіциту 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.

Значний тарифний борг спостерігається також і у Португалії. На кінець 2013 р. загальний накопичений тарифний борг був оцінений регулятором в 3,7 млрд євро (2,2% ВВП). За іншими оцінками уряду він може бути навіть вищим – на рівні 2,6% ВВП (4,4 млрд євро). Це означає значне збільшення у порівнянні з 2,85 мільярдами євро (1,7% ВВП) тарифного боргу на кінець 2012 року (ERSE 2013). Більшість тарифного дефіциту Португалії виникла в 2008, 2012 та 2013 роках.

Проведений аналіз системи ціноутворення показує, що дану проблему неможливо подолати окремими тимчасовими рішеннями Уряду та Регулятора, оскільки причини її виникнення мають системний характер і відображають комплексний вплив багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів, які можуть впливати на процес ціноутворення, зокрема, соціально-економічні, політичні та історичні.

У другому розділі дисертаційної роботи розглянуто важливі для постановки і вирішення прикладних задач моделювання досліджуваного процесу ціноутворення питання його математичного опису як сукупності формалізованих етапів та стадій процесу у виділеній СОТС ціноутворення.

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. В процесі виробництва і 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.

Відмітна 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. Наявність єдиних транспортних магістралей об'єктивно зумовлює необхідність режиму централізованого диспетчерського управління завантаженням всіх генеруючих блоків електростанцій, пов'язаних паралельною синхронною роботою в ОЕС, та навантаженням всіх споживачів з метою безперервного дотримання балансу пропозиції та попиту в ОЕС.

Наступним етапом є побудова опису факторів впливу зовнішнього середовища на процеси, що відбуваються в електроенергетиці, у тому числі і ті, що набирають масштабний характер у розвитку електроенергетики в багатьох країнах світу. А саме:

процеси, які пов'язані з декарбонізацією виробництва ЕЕ, децентралізацією процесів управління і з диджиталізацією (цифровізацією) технологічних процесів під час виробництва, передачі та споживання ЕЕ. До числа зовнішніх і внутрішніх факторів, що мають різний ступінь впливу на процес ціноутворення та описані у багатьох публікаціях, можуть бути віднесені наступні групи: зовнішні політичні; зовнішні сезонні; зовнішні екологічні; внутрішні ринкові; внутрішні економічні; внутрішні технологічні; внутрішні сезонні; внутрішні географічні.

Серед факторів впливу є такі, що важко врахувати і вони не завжди піддаються кількісній оцінці ступеня впливу на процес ціноутворення і фактично стають факторами ризику.

Опис такої системи ціноутворення, в якій повною мірою враховуються всі зовнішні (екзогенні) і внутрішні (ендогенні) фактори, що певним чином впливають на процеси ціноутворення, є досить важким завданням. Тому на даному етапі дослідження приймемо допущення, що вплив факторів на процес ціноутворення і пов'язані з ними виконання вимог екологічного та соціального характеру, враховуються Регулятором ринку шляхом застосування відповідних регуляторних механізмів. Все це знаходить відображення під час встановлення тарифів на оплату ЕЕ для різних груп споживачів на заключному етапі процесу ціноутворення.

Стадії технологічної процесу ціноутворення. Будемо розглядати процес ціноутворення нерозривно пов'язаним з технологічними стадіями процесу виробництва ЕЕ і доставки її кінцевому споживачеві (рис. 2.1).

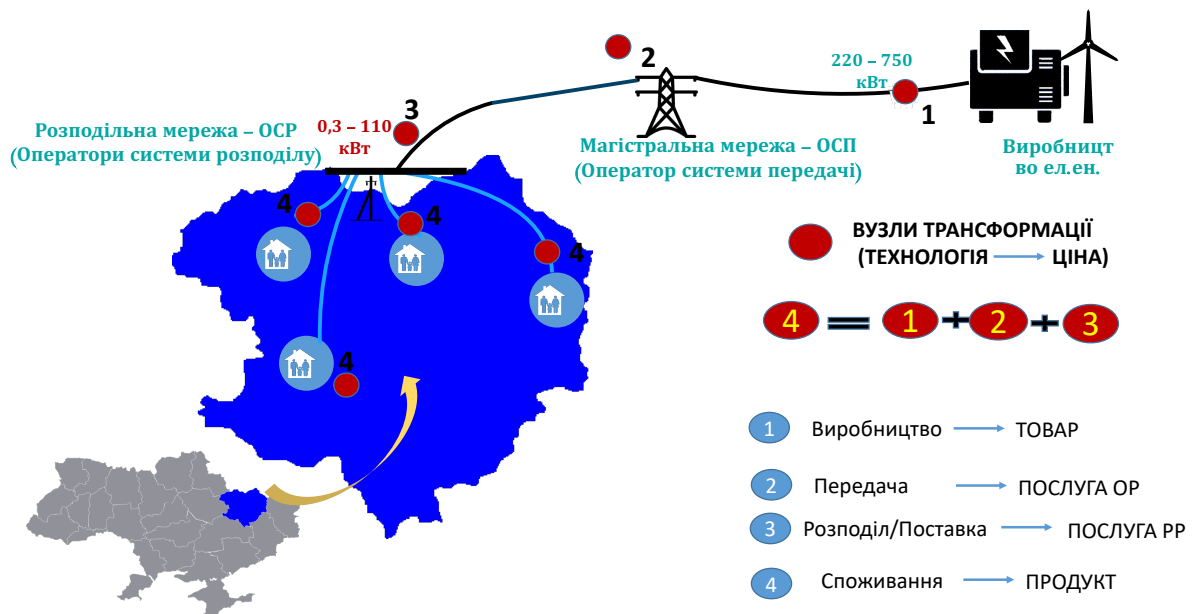


Рисунок 2.1. Стадії технологічного процесу ціноутворення

Таких стадій, що відображають функціональну структуру електроенергетики, в різних літературних джерелах виділяють декілька: генерація енергії високої напруги; диспетчеризація генерації високої напруги; передача енергії високовольтними лініями передач високого (110-220 кВ) та надвисокого класу (>220 кВ); диспетчеризація перетоків ЕЕ у вузлах ОЕС в умовах обмежень перетоків потужності; надання системних послуг; генерація низької напруги; розподіл ЕЕ по мережах середнього класу (до 35 кВ) диференційованим в залежності від напруги і доставки постачальникам; збут роздрібним споживачам.

На основі такого функціонального уявлення, можна вибудувати ланцюжок вузлів, в яких відбувається не тільки трансформація енергії та її поточкорозподіл, 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 поточкорозподілом. 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 ОСР.

Формалізація процесу ціноутворення. Розглянутий процес в СОТС ціноутворення в результаті взаємопов'язаної діяльності функціональних підсистем формує потоки організаційного (потік регуляторних впливів), технологічного (потік енергії), економічного (потік комерційних даних) та інформаційного (потік показників стану ринку і 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 пропонується виділити три підсистеми для стадій трансформації, які умовно назовемо "Товар", "Послуга", "Продукт", та які охоплюють діяльність основних функціональних структур управління ринком ЕЕ на різних стадіях процесу ціноутворення.

Спрощену схему ланцюга трансформації ціни зображено на рис. 2.2.

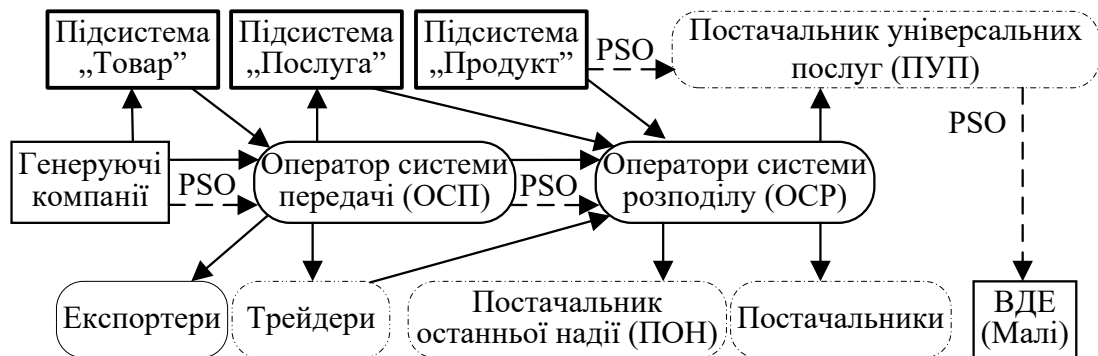


Рисунок 2.2. Схема ланцюга трансформації ціни

У подальшому елементи підсистем (сегменти ринку) називатимемо елементарними вузлами, а їхні складові компоненти (окремі енергетичні компанії-виробники, постачальники, транспортери ЕЕ) – вузловими точками. В кожному вузлі і вузловій точці послідовно вирішуються наступні задачі ціноутворення: постановка цілей ціноутворення; аналіз факторів, що впливають на ціноутворення; вибір методу ціноутворення в залежності від обраної стратегії ціноутворення; встановлення цін. Виділені підсистеми вузлів трансформації (перетворення) ціни на ЕЕ формуються з елементарних вузлів і вузлових точок.

Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "Товар", утворюють сегменти оптового ринку: ринок двосторонніх договорів (РДД); РДН; ВДР; БР. Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "Послуга", утворюють вузли:

Оператор системи розподілу (ОСР); Оператор системи передачі (ОСП). Підсистему елементарних вузлів, яку умовно названо "Продукт" (Роздрібний ринок), утворюють вузли: Постачальник «останньої надії», енергозбутові компанії (постачальники); ПОН; ГУ з використанням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ); активних споживачів.

Архітектура мультиагентного середовища процесу ціноутворення ринку ЕЕ. Імітаційне моделювання процесів організаційного управління в СОТС на основі застосування парадигми мультиагентного моделювання є відносно новим підходом до дослідження процесів функціонування динамічних багатоагентних систем. Відмінністю цих систем є те, що вони утворюються з неоднорідною множиною агентів з різним ступенем автономності по відношенню до володіння ресурсами виробництва можливостями їхнього використання. Такі агенти взаємодіють один з одним та з навколишнім середовищем, реалізуючи в процесі виробництва одночасно власні інтереси і інтереси системи в цілому задля досягнення загальної цілі функціонування.

Характерна особливість створення імітаційних моделей таких мультиагентних систем полягає в тому, що вони, як правило, включають не тільки моделі досліджуваних процесів, автономних агентів, а й моделі поведінки їх коаліцій. Вони використовуються задля спостереження за індивідуальними і колективними ефектами поведінки агентів, особливостями їхньої взаємодії у вирішенні виробничих завдань та виявлення нових закономірностей в розвитку досліджуваних процесів.

Моделі такого класу повинні включати три елементи: множину агентів та їхніх властивостей; навколишнє середовище – простір, в якому безпосередньо діють та взаємодіють агенти; множину правил, що визначають як агенти діють в навколишньому середовищі та взаємодіють між собою. Навколишнє середовище стає ключовим елементом імітаційної моделі як мультиагентне комунікаційне середовище агентів процесу ціноутворення. Воно включає: набір програмно-апаратних засобів комунікації, що забезпечують функціонування систем комунікації та управління процесом інформаційної взаємодії автономних агентів; набір засобів інформаційно-технологічного забезпечення.

Відмінна риса СОТС, що розглядається, полягає в тому, що на процес ціноутворення в ній можуть істотно впливати зовнішня багаторівнева система організаційного і оперативно-технологічного управління та й навіть зовнішні чинники, прояв яких у часі носить переважно не прогнозований характер. Тому, поряд з описаними вище трьома елементами імітаційної моделі доцільним є врахування і розгляд четвертого елементу, 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.

Таким чином, утворюється гетерогенна розподілена мультиагентна система (МАС), до множини агентів якої включаються агенти різнорідні за своїм функціональним призначенням, де виступають як складові у вигляді мультиагентних систем, що знаходяться у зовнішньому середовищі інтегрованої системи енергоринку, і через яке здійснюється взаємодія цих систем.

На рис. 2.3 зображено концептуальну схему інтегрованої з Мікроринком локальної електроенергетичної системи (ЛЕС) мультиагентної системи, яка

відтворює ієрархічну підпорядкованість її складових та необхідний рівень деталізації подання предметної області моделювання ринку ЕЕ. Агенти Оптового ринку електроенергії (ОРЕ) – ПУП та ОСР – забезпечують зв'язок фізичного (енергії) та економічного (фінансів) потокорозподілу з централізованою енергосистемою.

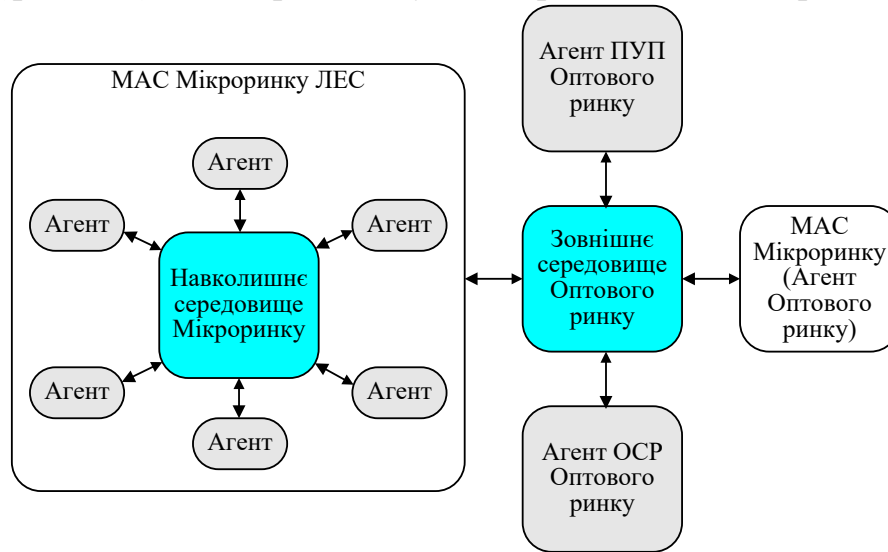


Рисунок 2.3. Архітектура гетерогенної розподіленої МАС процесу ціноутворення

Як результат, МАС Мікроринку стає агентом в інтегрованій за структурою мультиагентній системі ціноутворення (МАСЦ) Оптового ринку. З точки зору організації управління її можна розглядати окремо у складі власних агентів, взаємодіючих у навколишньому середовищі, на яке впливає зовнішнє середовище ОРЕ.

Функціональна модель мультиагентної системи ціноутворення. Метою створення функціональної моделі системи ціноутворення є специфікація функцій – індивідуальних функціональних особливостей всіх агентів, здійснюваних у межах процесу ціноутворення. Розглянемо опис елементів структури мультиагентного середовища МАСЦ у складі її агентів імітаційного моделювання на прикладі Мікроринку ЛЕС, яку утворено в рамках регіональної системи електропостачання централізованої мережі. Введемо наступні позначення: MS_{masp} – мультиагентне середовище МАСЦ; $AG_{mas,avs}$ – 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 у загальному вигляді мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення – МАСЦ – можна представити у вигляді кортежу як сукупність певних множин імітованих агентів та факторів впливу зовнішнього середовища наступним чином: $MS_{masp} = \{AG_{mas,avn}, AG_{mas,ans}, AG_{mas,aprs}, FW_{fzs}\}$.

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

Вважатимемо, що МАСЦ Мікроринку у ЛЕС об'єднує групи внутрішніх автономних агентів та агентів навколишнього середовища. Отже, до складу множини агентів МАСЦ включаються наступні типи множин внутрішніх агентів: агенти навантаження; агенти виробників; агенти адміністративних послуг.

До числа агентів навколишнього середовища відноситимемо типи агентів двох рівнів. Перший рівень утворюють зовнішні постачальники ЕЕ; другий рівень – агенти допоміжних послуг.

Таким чином, множину $AG_{mas,avn}$ утворюють множини агентів «Навантаження», «Виробники», «Адміністративні послуги», до складу яких входять підмножини вищенаведених типів агентів з 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. Множину факторів впливу зовнішнього середовища FW_{fs} складають такі групи як «Зовнішні політичні», «Зовнішні сезонні», «Зовнішні екологічні», «Внутрішні ринкові», «Внутрішні економічні», «Внутрішні технологічні».

Структура мультиагентного подання системи ціноутворення. Дотримуючись запропонованого 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).

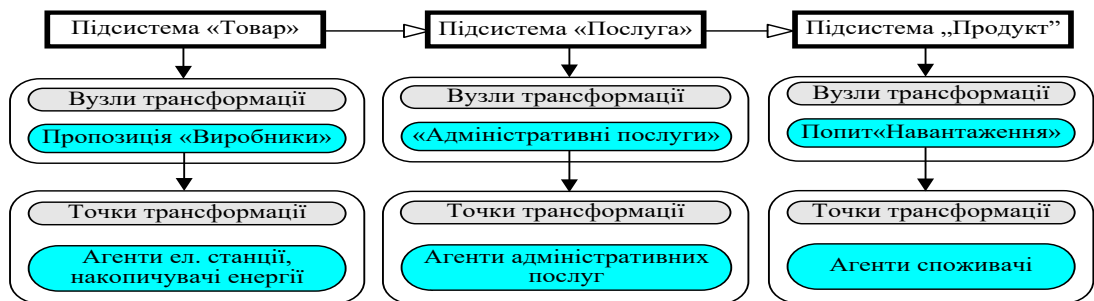


Рисунок 2.4. Структура мультиагентного подання суб'єктів системи ціноутворення

Комунікаційне середовище агентів мультиагентної системи ціноутворення. На основі застосування наведених вище результатів та з урахуванням досвіду побудови архітектури мультиагентних середовищ пропонується наступна архітектура комунікаційного середовища агентів, що подана на рис. 2.5.

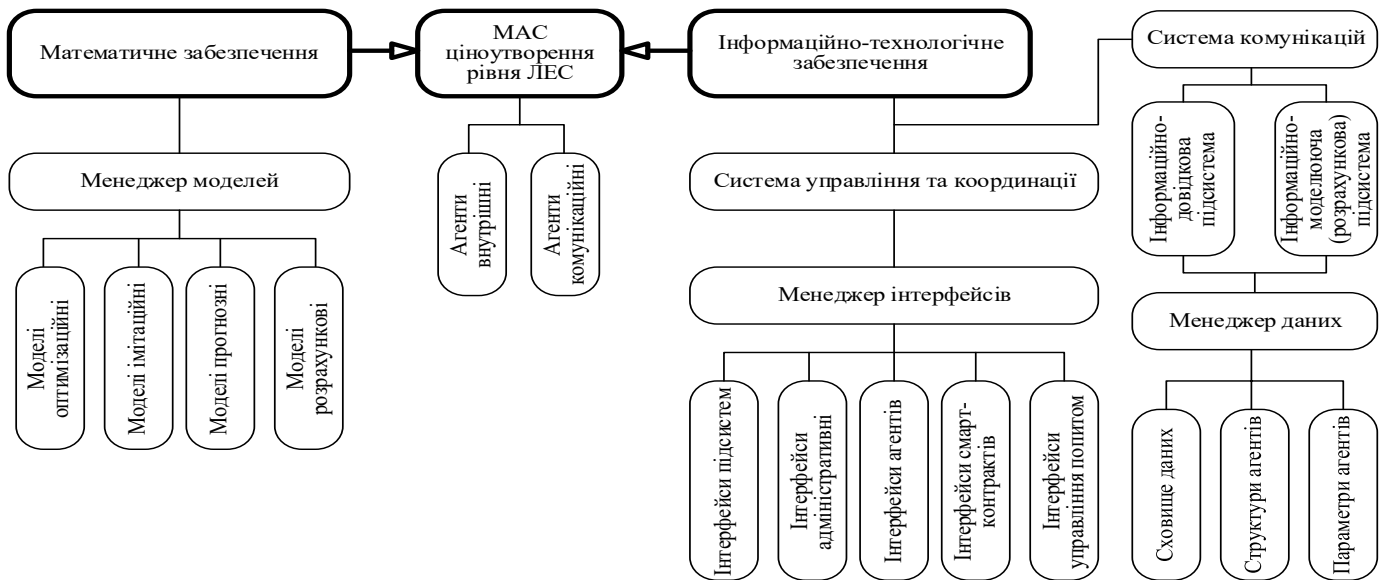


Рисунок 2.5. Архітектура комунікаційного середовища МАСЦ Мікроринку

У третьому розділі основна увага приділяється розробці методів, призначених для вирішення як наукових, так і прикладних практичних завдань 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 їхнього застосування для вирішення завдань аналізу і дослідження особливостей процесу формування цін на ринку ЕЕ в умовах зміни в структурі виробництва і споживанні ЕЕ у ОЕС.

Метод вузлової трансформації процесу ціноутворення. Розробка методу вузлової трансформації та подальше його застосування для аналізу процесу ціноутворення включає послідовність виконання основних конструктивних етапів моделювання технологічного процесу ціноутворення. У даному розділі зосереджено увагу на питанні розробки обчислювальних процедур методу. Основну ідею розробленого методу, що полягає у застосуванні локального вузлового ціноутворення для аналізу динаміки ціни в мережах передачі ЕЕ, розглянуто в монографії Стофта С. і узагальнено для випадку аналізу динаміки зміни ціни у всьому ланцюгу фізичного потокорозподілу.

Позначення змінних та параметрів процесу ціноутворення. Процес цінової трансформації відбувається у часі, породжуючи стадії трансформації, та розповсюджується у просторі агентів трансформації, поділених на рівні їхньої декомпозиції – підсистем, вузлів, вузлових точок.

Задля визначення процесу ціноутворення введемо наступні 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 наступні 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), вплив яких враховується у процесі трансформації ціни у вузлі k підсистеми p на даному 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 і ціни за його одиницю.

Початком процесу ціноутворення будемо вважати добу визначення акцептованих цін на аукціонах відповідних сегментів оптового ринку – РДД, РДН, ВДР. За розрахунковий період 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 $j=1,2,\dots,24$:

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

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

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

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 в результаті проведеного аукціону значень обсягів енергії та цін за одиницю товару, а також обсягів та ціни імпортованої енергії на сегменті РДД. Цю множину даних можна вважати вихідними даними планового економічного поточкорозподілу 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 автоматизованою системою комерційного обліку електроенергії починається процес погодинного обліку фактичного поточкорозподілу в мережах системи електропередачі виробленої ЕЕ та її споживання кінцевими споживачами протягом i -ї доби.

В результаті маємо, що

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

де $F^1 \left(v_{i,j}^{0,k}, z_{i,j}^{0,k}, X^{1,k} \right)$ – композиція впливу певної кількості функцій з 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 цінних змінних. Отже, відбувається зміна ціни на величину витрат інфраструктури, що забезпечує функціонування сегментів ринку – елементарних вузлів.

Тобто зміна ціни визначається виразом

$z_{i,j}^{1,k} = z_{i,j}^{0,k} + Z_{i,j}^{INF,1,k}$, де $Z_{i,j}^{INF,1,k}$ – питомі витрати вузла k першої підсистеми на

елемент інфраструктури INF . Очевидно, що економічний поточкорозподіл ЕЕ, що здійснюється відповідно до результатів торгів на відповідних торгових майданчиках, передбачає її виробництво у необхідних обсягах за визначеними цінами. При цьому природно здійснюються необхідні витрати в кожному елементарному вузлі першої підсистеми в залежності 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 наступного виду: $\Delta^{1,k}(t) = \phi^{1,k}(t) - \phi^{0,k}(t)$. Таким чином, на вхід наступної другої підсистеми елементарних вузлів, що забезпечує диспетчерське управління поточкорозподілом та транспорт енергії від шин електростанцій до розподільчих мереж, подається сукупний обсяг енергії, утворений на виході першої підсистеми $\phi^{1,1}(v_{i,j}^{1,1}, z_{i,j}^{1,1}), \dots, \phi^{1,K^1}(v_{i,j}^{1,K^1}, z_{i,j}^{1,K^1})$. В результаті на виході цієї підсистеми маємо, аналогічно першому перетворенню, результат комплексного впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на технологічний процес транспортування енергії високовольтними лініями електропередачі та диспетчерське управління в умовах жорстких обмежень в точках перетікання потужності. Необхідний критерій забезпечення мінімуму витрат на передачу енергії у цьому випадку матиме наступний вигляд: $\phi^{2,k}(v_{i,j}^{2,k}, z_{i,j}^{2,k}, X^{2,k}) = F^2(v_{i,j}^{1,k}, z_{i,j}^{1,k}, X^{2,k}), k = 1, 2, \dots, K^2$.

Таким чином, друге збільшення ціни в елементарних вузлах другої підсистеми визначається виразом $\Delta^{2,k}(t) = \phi^{2,k}(t) - \phi^{1,k}(t)$. При цьому дуже важливою вимогою залишається дотримання балансу обсягів у момент переходу з однієї підсистеми в іншу, не дивлячись 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 передачі 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 вирази для $\phi^{3,k}(v_{i,j}^{3,k}, z_{i,j}^{3,k}, X^{3,k})$ і $\Delta^{3,k}(t)$ у процесі 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 у 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 $\tilde{Z}_i^1 = \frac{1}{\tilde{V}_i^1} \sum_{j=1}^{24} \sum_{k=1}^{K^1} z_{i,j}^{1,k} \times v_{i,j}^{1,k}$, яка формується в першій підсистемі.

Етап 4. Подальший поток розподілу енергії здійснюється в третій підсистемі "Продукт", елементарні вузли якої забезпечують функціонування роздрібного ринку. Будемо також вважати, що у цих вузлах обсяг закупленої ЕЕ компаніями ПУП на оптовому ринку не змінюється. Проте, через необхідність урахування впливу зовнішніх і внутрішніх факторів у кожному з вузлів можуть відбуватися зміни ціни. Тому, як і раніше, загальний вираз трансформації цін у третій підсистемі матиме вигляд $\phi^{3,k}(v_{i,j}^{3,k}, z_{i,j}^{3,k}, X^{3,k}) = F^3(v_{i,j}^{2,k}, z_{i,j}^{2,k}, X^{3,k}), k = 1, 2, \dots, K^3$.

Але у 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, в цій підсистемі може відбуватися в деякій частині вузлів і 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 у цій підсистемі відрізняється від опису попередніх підсистем.

Ці дані надходять на вхід компаній ОСР третьої підсистеми. На основі цих даних формуються вихідні ціни ПУП для кінцевих споживачів. Таким чином для вихідних цін будемо мати вираз $z_{i,j}^{3,k} = z_{i,j}^{2,k} + z_{i,j}^{BR,3,k} + z_{i,j}^{PON,3,k} + z_{i,j}^{VDE,3,k} + z_{i,j}^{OSR,3,k} + z_{i,j}^{PUP,3,k}$. Тоді індекс ціни третьої підсистеми визначається як середньодобова

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

Алгоритмічна модель аналізу динаміки попиту на електроенергію на ціноутворюючих 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. Процес утворення моделі з використанням методу вузлової трансформації починається з визначення вхідних і вихідних змінних величин і параметрів моделі та формалізації критеріїв оцінки попиту.

Вихідними даними аналізу динаміки розподілу купівлі-продажу ЕЕ для оцінки попиту на оптовому ринку в розрізі часток сегментів ринку є погодинні вхідні величини. Вважатимемо, що розглядається тільки маржинальна ціна на РДН у системі ОРЕ, як визначальна, за якою обчислюються всі цінові показники про витрати на допоміжні послуги у процесі виробництва, постачання і розподілу у ОЕС.

Для оцінки попиту розрахунок профілів змінних величин визначається наступними алгоритмами:

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

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

$$z^{\text{РДН}}(n) = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} z^{\text{РДН}}(n, j), \text{ де } S(n) \text{ – множина одиниць часу, що належать до інтервалу}$$

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

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

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

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

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 та побудовано їхні графічні діаграми змін за період з 2020 по 2021 роки. А саме: погодинні середні обсяги і ціна продажу (рис. 3.1); посезонні середньогодинні обсяги і ціна продажу; річний середньогодинний обсяг і ціна продажу ЕЕ на сегментах ринку. Інформацію для аналізу було отримано за допомогою електронних таблиць програми Excel та інформаційного ресурсу КСМ Equant, сформованого на основі ретроспективних даних із відкритих джерел інформації ОР, ОСП та Української енергетичної біржі.

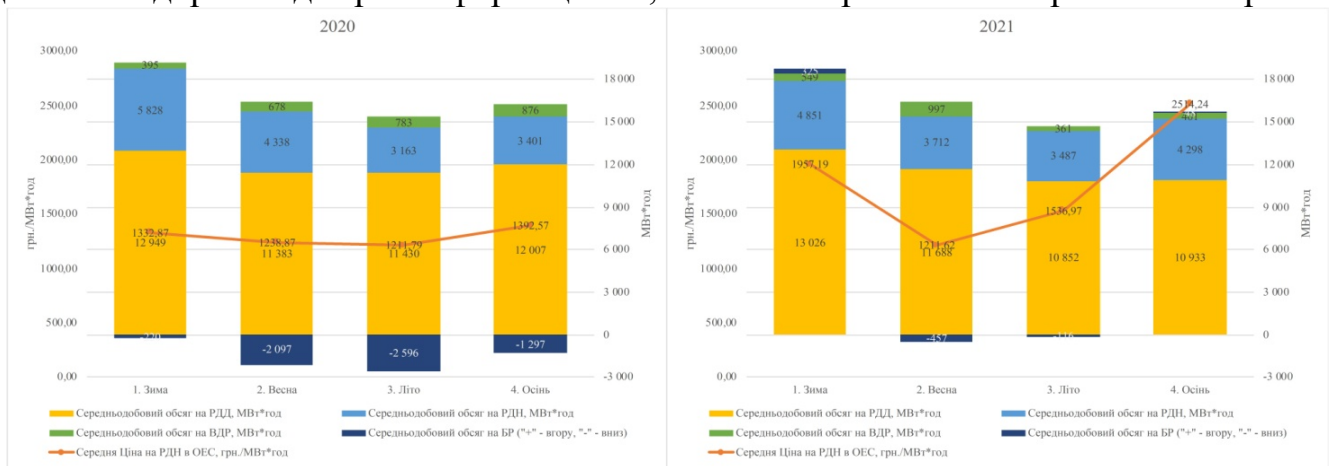


Рисунок 3.1. Динаміка посезонного профілю середньогодинних обсягів продажу ЕЕ

На рис. 3.1 відображено графічну інформацію про динаміку посезонного профілю середньогодинних обсягів продажу ЕЕ за 2020-2021 роки, яка підтверджує суттєву нестаціонарність в часі процесу ціноутворення та дає можливість зробити відповідні висновки про наявність якісної залежності середньої ціни РДН від зміни структури обсягів акцептованої ЕЕ на відповідних сегментах ринку. Аналогічну залежність можна спостерігати за результатами розрахунків погодинного профілю середніх обсягів і ціни продажу ЕЕ за 2020-2021 роки. За річними, сезонними профілями можна встановити наступні тенденції у 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.

Метод оцінки результатів сполучення ринків електричної енергії «на добу наперед» України з європейськими країнами. Для України важливою задачею є

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

Теоретичним підґрунтям методу є поняття ринкової рівноваги, стан якої імітується наявною ретроспективною інформацією про рівновагу між попитом і пропозицією у сегменті РДН. Порівняння станів початкової та кінцевої ринкової рівноваги дає можливість отримати кількісну оцінку чинників, які вплинули на ринкову рівновагу. Під впливом зовнішніх чинників розуміється передусім поява деякого обсягу обміну ЕЕ між торговими зонами, які до цього знаходилися у стані ринкової рівноваги. Структуру попиту та пропозиції у торгових зонах пропонується подавати функціями чистого експорту (ФЧЕ), 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 можливість 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).

Формалізація методу оцінки сполучення сегментів ринків на добу наперед.

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

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

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

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

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

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

Система (3.1) визначає для кожної торгової зони максимізацію цільової функції добробуту із врахуванням обмежень обсягів імпорту/експорту ЕЕ. Пошук оптимального рішення системи (3.1) пропонується 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:

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

(3.2)

Оскільки ФЧЕ означені залежностями рівноважних цін від обсягу торгів, то задача 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.

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

(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 задача пошуку оптимального обсягу обміну ЕЕ між двома сполучуваними торговими зонами розв'язується алгоритмічно з використанням цільової функції (3.3). Основна відмінність пошуку оптимального рішення по (3.3) полягає у 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 можливість 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:

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

(3.4)

де $V_{B \rightarrow A,h}^{\text{max}}$, $V_{A \rightarrow B,h}^{\text{max}}$ – 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 обмеженням (3.4). Якщо умови (3.4) порушуються, то результат розрахунків визначається за визначеною в (3.4) допустимій межі.

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

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

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

Алгоритмічна організація імітаційної моделі оцінки сполучення ринків. Алгоритм імітаційної моделі проведення порівняльного аналізу двох станів до та після сполучення торгових зон включає наступне:

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

2. Імітується вплив зовнішніх чинників на ринкову рівновагу. Під імітацією впливу розуміється створення нового чи зміна характеристик існуючого 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 порівняльної оцінки відносяться 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.

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

Для РДН України сполучення з Молдовою еквівалентне появі додаткової заявки з пропозицією ЕЕ у обсязі 104 МВт·год та ціною 4 422,34 €/ (МВт·год). Згідно із припущеннями про функції і 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). Задля вирівнювання ринкових цін в Україні і Молдові в розглянуту розрахункову годину необхідно забезпечити потік ЕЕ у обсязі 709,7 МВт·год. Проте можливості експорту ЕЕ з Молдови до України в розглянуту розрахункову годину обмежені обсягом 104 МВт·год. Тому експорт ЕЕ з Молдови в Україну спричиняє зниження ринкової ціни на РДН України з 5 600 €/ (МВт·год) до 5 400 €/ (МВт·год)

Припустимо ситуацію, що процедура сполучення ринків ЕЕ України та Молдови відбулася, коли на ринку ЕЕ Молдови склалася більш висока ціна. Така ситуація 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. 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.

У четвертому розділі розглянуті питання побудови комп'ютерних моделей процесу формування ціни на ЕЕ на сегменті РДН – елементарному вузлі підсистеми «Товар». Результат формування рівноважних погодинних цін на сегменті ринку РДН визначає початкові умови за подальшої трансформації ціни у всьому ланцюжку від виробника до кінцевого споживача. Тому і розглянемо спочатку побудову комп'ютерної моделі рішення оптимізаційної задачі визначення рівноважних погодинних цін на сегменті РДН, призначенням якої є визначення мінімально-можливої погодинної маржинальної ціни на РДН.

Комп'ютерна модель рішення оптимізаційної задачі. Виробники та постачальники ЕЕ подають свої заявки до ОР і надалі починає працювати механізм реалізації ЕЕ з повільними цінами, які визначаються на аукціоні сегменту РДН. Цей механізм відповідає вимогам Правил ринку, у яких визначено алгоритм проведення аукціону РДН, відмінна особливість застосування якого полягає в тому, що під час вирішення колізій застосовується принцип максимізації коефіцієнта соціального доходу. Визначення рівноважної ціни ЕЕ на підставі цінових заявок виробників (продаж ЕЕ) та цінових заявок постачальників (купівля ЕЕ) приводить до необхідності розв'язку нелінійної оптимізаційної задачі. Розглянемо питання побудові математичної моделі задачі та розроблення спеціалізованого обчислювального алгоритму її розв'язку.

Математична модель задачі. Нехай $\forall j$ або $\forall k$ та $\forall i$ величини $(\bar{B}_{j,i}, \bar{P}_{j,i})$ або $(\bar{S}_{k,i}, \bar{P}_{k,i})$ є обсяг і ціна купівлі або продажу ЕЕ, зазначені в заявці j для розрахункового періоду i . При цьому всі заявлені обсяги та ціни задовольняють обмеженням: $\bar{B}_{j,i} \geq 0$, $P_i^{min} \leq \bar{P}_{j,i} \leq P_i^{max}$, $\bar{S}_{k,i} \geq 0$, $P_i^{min} \leq \bar{P}_{k,i} \leq P_i^{max}$. 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 складаються з підмножин заявок певного типу.

У відповідності до затверджених Регулятором Правил ринку РДН та ВДР існує декілька видів заявок на купівлю та продаж ЕЕ на сегменті РДН. 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 під час продажу на РДН більше використовують блочні (прості та зв'язані) заявки, а у разі купівлі – погодинні. Це пов'язано із тим, що в структурі продажу ЕЕ на РДН більша частка виробництва припадає на теплові електричні станції (ТЕС) та електростанції з використанням ВДЕ, а під час купівлі – на постачальників та трейдерів. Підмножини типових заявок на купівлю: J_1 – погодинні, J_2 – прості блочні, J_3 – зв'язані блочні, J_4 – профільовані блочні, J_5 – гнучкі блочні; на продаж: K_1 – погодинні, K_2 – прості блочні, K_3 – зв'язані блочні, K_4 – профільовані блочні, K_5 – гнучкі блочні. Таким чином, математичне формулювання задачі визначення ціни та обсягів купівлі-продажу ЕЕ із застосуванням «принципу максимізації коефіцієнта соціального доходу» має вигляд оптимізаційної задачі з наступним функціональним критерієм

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

(4.1)

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

Обмеження на баланс акцептованих обсягів купівлі та продажу ЕЕ

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

Функціональний критерій (4.1) оптимізаційної задачі має тотожний спрощений вигляд

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

Сформульована оптимізаційна задача є нелінійною і містить два типи невідомих змінних – цілочислові 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.

Алгоритмічна організація розв'язку задачі. Основою побудови алгоритму є принципова можливість розгляду сформульованої оптимізаційної задачі у параметричному вигляді, де як параметри виступають рівноважні ціни на ринку. За такого розгляду оптимізаційної задачі її можна представити як задачу змішаного

цілочісельного 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 їхнього пошуку на дискретній множині цін погодинних заявок на продаж ЕЕ. При цьому значення цін на РДН визначаються на кожній ітерації у відповідності до Правил ринку. Формулювання та розв'язування задачі змішаного цілочислового лінійного програмування здійснюється в програмному середовищі IBM ILOG® CPLEX® Optimization Studio. Програмна імплементація такої задачі здійснена мовою OPL.

Аналіз результатів обчислювальних експериментів, перевірка адекватності моделі. Реалізований алгоритм застосовано задля отримання розв'язку 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 цілочісельного лінійного програмування не перевищували 0.03 с. Це свідчить про високу швидкість отримання розв'язку сформульованої оптимізаційної задачі. Отримані кількісні дані результатів тестових розрахунків визначення погодинних рівноважних цін, та обсягів підтверджують адекватність моделі рівноважного стану ринку РДН. Відхилення ціни, відхилення обсягу від результатів отриманих програмним комплексом ОР дорівнює нулю.

Комп'ютерна модель рішення задачі розрахунку ціни та обсягів в пропозиціях теплових електростанцій. Розглянемо побудову алгоритмічної моделі процесу підготовки пропозицій ТЕС на РДН.

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

$$C_{\Pi}^{TEC} = \frac{b_{p\delta 4} \times C_{\delta}^{yne}}{1000} \times 1,032, \text{ де } b_{p\delta 4} - \text{питомі витрати умовного палива на відпущену ЕЕ}$$

за максимального значення потужності на кривій графіка вихідних нормативних питомих витрат умовного палива відповідного блоку, г/кВт·год; 1000 – коефіцієнт приведення результату розрахунку до одиниць вимірювання грн./МВт·год; 1,032 – акциз на ЕЕ виробників, відповідно до вимоги п. 215.3.9 «Податкового кодексу України»; C_{δ}^{yne} – середньозважена ціна тонни умовного палива (т.у.п.) на виробництво ЕЕ відповідним блоком, грн./т.у.п. Середньозважена ціна умовного палива на виробництво ЕЕ відповідним блоком розраховується за формулою:

$$C_{\delta}^{yne} = \sum_k \left(\frac{C_{\delta k}^{nn}}{K_{\delta k}^Q} \times \frac{r_{\delta k}^e}{100} \right), \text{ де } k - \text{вид натурального палива (вугілля, газ, мазут); } C_{\delta k}^{nn} - \text{ціна}$$

натурального палива з урахуванням витрат на транспортування, доставку та перевалку 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; 7000 – теплотворна здатність умовного палива, кКал/кг.

2. *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 наступною формулою, г/кВт·год: $b_{P\delta 4} = b_{P\delta 4}^{6H} \times K_{ct}^{\phi}$, де $b_{P\delta 4}^{6H}$ – 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, який 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.

3. *Формування обсягу ЕЕ в пропозиціях ТЕС.* Обсяг виробленої ЕЕ у пропозиціях ТЕС для відповідного блоку розраховується за формулою, МВт·год:

$$E_n^{TEC} = \frac{(K \times P_{\delta \max}^{TEC} - P_{\delta \min}^{TEC})}{2} + P_{\delta \min}^{TEC}, \text{ де } P_{\delta \max}^{TEC} \text{ – максимальна потужність блоку, МВт; } P_{\delta \min}^{TEC} \text{ –}$$

мінімальна потужність блоку, МВт; K – коефіцієнт корисного відпуску.

Аналіз результатів обчислювальних експериментів, перевірка адекватності моделі. Задля підтвердження адекватності було проведено порівняльний аналіз цін на ЕЕ вироблену на ТЕС, які склалися на попередній моделі оптовому ринку електроенергії (ОРЕ) та цін, отриманих за результатами розрахунків в алгоритмічній моделі ціноутворення на ринку ЕЕ та порівняльний аналіз відхилення фактичної середньозваженої маржинальної ціни купівлі-продажу ЕЕ на РДН та встановленою прогнозованою ринковою ціною на 2 півріччя 2019 року. Для здійснення порівняльного аналізу цін на ЕЕ, виробленої на ТЕС, ціни, отримані в результаті розрахунків з використанням цієї моделі, порівнювалися з граничними цінами системи, що склалися на попередній моделі ОРЕ у відповідному 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. Порівняльний аналіз здійснювався для кожної години обраної доби. Порівнювалися погодинні та середньозважені добові ціни. Відхилення середньозваженої добової ціни становить 6,8 %. 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. Відхилення середньозважених цін на РДН за 2 півріччя 2019 року становить близько 9%, що відповідає попереднім розрахункам (6,8%), які виконані, ще у 2017 році. Зважаючи на рівень отриманого за розрахунками відхилення, можна зробити висновок, що похибка в розрахунках цін на ЕЕ вироблену на ТЕС в розробленої алгоритмічній моделі не перевищує 10 %.

У п'ятому розділі роботи розглянуто теоретичні та прикладні засади розробки сучасних засобів інформаційно-технологічного забезпечення КСМ в електроенергетиці у вигляді інтерактивних адаптивних об'єктно- та функціонально-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень (СППР) для вирішення завдань планування розвитку генеруючих потужностей на ринку ЕЕ. У тому числі пропонується підхід щодо вирішення задачі побудови КСМ процесів ціноутворення з розвиненими засобами об'єктно-орієнтованого моделювання (ООМ) шляхом формування єдиного 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.

Досягнення сформульованої мети визначає наступні напрямки робіт з побудови КСМ і застосування її як 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 (ПрО) з метою формування єдиної (уніфікованої) структури бази даних суб'єктів організаційного управління; функціональне моделювання технологічних процесів обробки і подання даних з метою уніфікації (стандартизації) програмного інтерфейсу системи через типізацію операцій взаємодії користувача з об'єктами предметної області в програмному забезпеченні системи; розробка протоколів (інтерфейсів) інформаційного обміну даними з моделями різного призначення, які підключаються до бази даних суб'єктів організаційного управління ціноутворенням.

Побудова системи, яка фактично призначена для реалізації базової функції – багатоваріантного аналізу інтерактивної адаптивної СППР, можлива тільки за допомогою КСМ, що забезпечує можливість проектування і застосування імітаційних комп'ютерних моделей процесів функціонування СОТС ціноутворення. Така система повинна включати: засоби формального математичного опису складних суб'єктів СОТС і процесів їхньої організаційної взаємодії між собою та з 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 з зовнішнім середовищем; уніфіковану систему класифікаторів і довідників, структуру зберігання даних, єдину систему протоколів і інтерфейсів; уніфіковані засоби застосування комп'ютерних моделей.

Концептуальна модель інформаційно-технологічного забезпечення процесів прийняття рішень. Відмітна особливість пропонованого концептуального підходу до створення інформаційно-технологічного забезпечення побудови і реалізації функцій адаптивної СППР полягає в уніфікації та формалізації компонентів DDM-парадигми (Data-Dialog-Model) як проблемно-незалежних компонентів концептуальної моделі СППР в організаційному управлінні: вдосконалення DDM-парадигми реалізоване через включення до структури СППР організаційного управління суб'єктами СОТС наступних проблемно-незалежних компонентів подання процесів функціонування ПрО енергоринку (рис. 5.1).

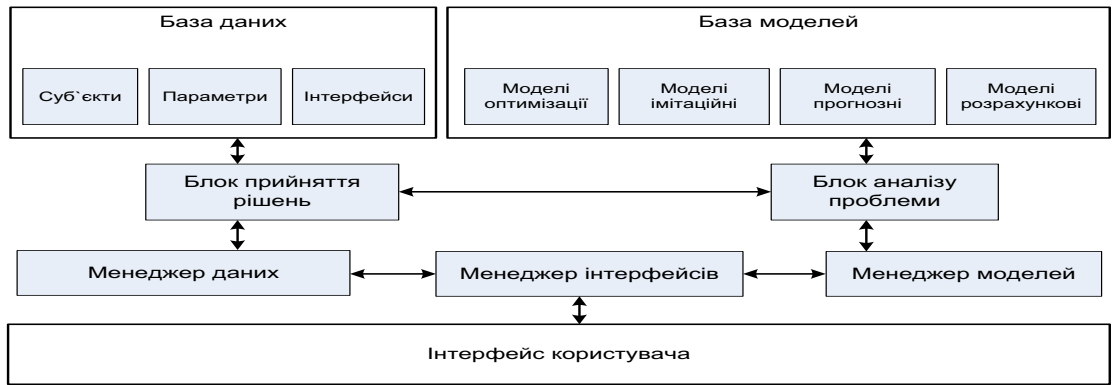


Рисунок 5.1. Концептуальна модель побудови СППР

Моделі суб'єктів, що беруть участь в структуроутворюючих зв'язках організаційного управління для визначення правила функціонування СОТС є: 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.

Важливим компонентом концептуальної моделі СППР є менеджер даних, що забезпечує інтерфейс користувача до структур даних ПрО з можливістю подальшого моніторингу та оцінки показників функціонування СОТС енергоринку.

Інформаційне забезпечення адаптивної СППР. Основою побудови єдиної системи класифікації та єдиного інформаційного простору даних повинна стати узагальнена інформаційна модель, яка однаковою способом відповідно до стандартів Міжнародної Електротехнічної Комісії (ІЕС) описує всю множину типових фізичних суб'єктів СОТС на основі принципів ООМ.

Дотримуючись принципів ООМ, в такій узагальненій інформаційній моделі підтримується опис фізичних суб'єктів СОТС на всіх рівнях організаційного управління. Це дає змогу одночасно представляти в інформаційному забезпеченні системи їхні властивості та зв'язки, створюючи можливість застосування єдиної системи класифікаторів, довідників та уніфікації системи доступу до даних. Суб'єкти організаційного управління в СОТС є об'єктами ПрО, що подаються засобами ООМ із усіма його принципами.

Інформаційна модель предметної області. Виділення такої сукупності інформаційних об'єктів, що володіють певними характеристиками і відносинами між ними, дає можливість побудувати об'єктну інформаційну модель певної ПрО. На цій основі в подальшому розробляється уніфікована система класифікаторів і довідників, структура зберігання даних, єдина система протоколів і інтерфейсів, а також єдині засоби програмування із застосуванням комп'ютерних моделей функціонування технологічних процесів в СОТС. 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.

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.

Функціональна організація інформаційно-технологічного забезпечення. Розглянемо функціональну організацію адаптивної об'єктно-орієнтованої СППР (рис. 5.2).

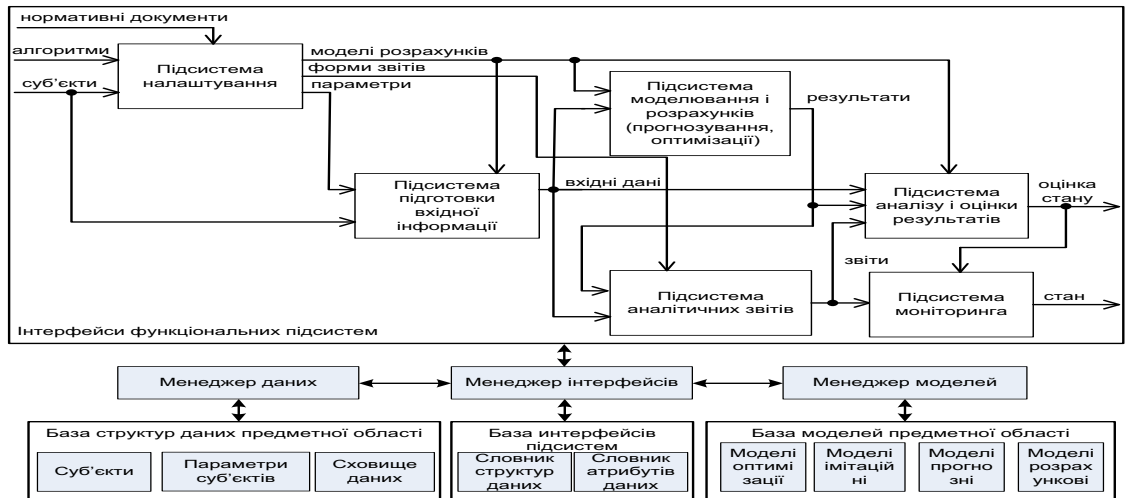


Рисунок 5.2. Функціональна організація інформаційно-технологічного забезпечення

Функціональна організація – це структуроване подання функціональних задач (функцій) СППР, потоків даних і сутностей інформаційної моделі, які пов'язують ці функції. Вона будується методом декомпозиції від складних функцій до більш простих. Елементи кожного рівня декомпозиції є дії з перетворення інформаційних потоків з 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 обробки даних.

В цілому базовий програмний комплекс об'єктно-орієнтованої СППР побудований на принципах декомпозиції і структурований з підсистем, що реалізують завдання, які відображають стадії з підготовки, аналізу і вироблення рішення у функціонуванні інформаційної моделі ПрО СОТС.

Організація інтерфейсу користувача. Організація технологічного процесу функціонування СППР забезпечує виконання функцій підготовки, проведення та обробки даних результатів розрахунків, складається з послідовного здійснення завдань функціональних підсистем, призначення яких відповідає основним типовим операціям взаємодії кінцевого користувача з СППР. Такими типовими операціями є: внесення змін до алгоритмів розрахунку; збір і підготовка вихідних даних; проведення обчислень показників функціонування організаційної системи; формування звітних даних з результатами розрахунків та подання їх 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. В результаті програмне забезпечення адаптивної об'єктно-орієнтованої СППР повинно складатися з

підсистем, орієнтованих на рішення функціональних задач в рамках забезпечення інформаційних потреб користувача предметної області СОТС.

Функціональні модулі інтерфейсів користувача. Застосування принципів вертикальної і горизонтальної декомпозиції дає змогу виділити під час побудови організаційної структури програмного забезпечення три рівня інтерфейсу взаємодії функціональних задач СППР: проблемно-орієнтованого середовища користувача ПрО СОТС; інструментальних засобів вирішення функціональної задачі, обраної користувачем; реалізації функції інструментального засобу функціональної задачі.

Перший рівень організовує роботу користувача під час вирішення прикладної проблеми ПрО СОТС 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 в залежності від поданих в концептуальній моделі інформаційних зв'язків елементів структур даних ПрО в інтерфейсі реалізації функціональної задачі. Кожна функціональна задача може використовувати типові інформаційні зв'язки між значеннями елементів структур даних.

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

Розробка і застосування такого програмного середовища утворює єдиний програмний продукт розгортання і супроводу СППР, який знизить ризик, складність та витрати у процесі переходу до нових задач організаційного управління суб'єктами ринку ЕЕ.

База даних процесів ціноутворення ринку електричної енергії. База даних (БД) процесів ціноутворення ринку ЕЕ 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.

Суб'єкти ринку ЕЕ стають об'єктами ПрО СОТС, що подаються засобами ООМ за усіма його принципами.

В результаті створення і застосування бази даних забезпечується автоматизація інформаційних процесів, пов'язаних з: організацією підготовки вхідних та формування вихідних даних про результати розрахунків з моделювання, прогнозування, оптимізації функціонування ринку ЕЕ; проведенням моделюючих розрахунків для складових суб'єктів ринку; складанням звітності та організацією статистичного обліку; оперативним контролем за станом розвитку функціонування ринку на основі аналітичної обробки даних.

У шостому розділі роботи розглянуто питання побудови програмно-апаратного забезпечення КСМ процесу ціноутворення, яку реалізовано на платформі алгоритмічного моделювання для учасників ринку ЕЕ «Equant Cloud», включаючи її структурно-функціональну організацію.

Призначення комп'ютерної системи моделювання.

Основним призначенням КСМ є надання можливості учасникам-агентам ринку ЕЕ України в режимі онлайн виконувати наступні завдання: інформаційне забезпечення математичного моделювання процесів у СОТС ціноутворення на окремих сегментах ринку; моніторинг об'ємних та цінових показників динаміки функціонування оптового і роздрібного ринків; прогнозування зміни цін та формування стратегії поведінки агентів з урахуванням їхніх інтересів та комерційних ризиків; виконання розрахунків поточних функціональних задач планування виробництва ЕЕ та управління електроспоживанням; наукове досліджування різних сценаріїв еволюційного розвитку СОТС ціноутворення на оптовому і роздрібному ринках за 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.

Принципи розробки комп'ютерної системи моделювання, визначення загальносистемних вимог до її побудови.

Розробку КСМ та її складових здійснено з дотриманням таких принципів:

- використання засобів обчислювальної техніки й устаткування передачі даних, які мають достатній горизонт застосування 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 КСМ 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 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 дотримувалися наступних загальносистемних вимог: системність; відкритість; стандартизація; узгодженість.

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.

Функції комп'ютерної системи моделювання. 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 і результатів розрахунків у табличному, графічному, картографічному вигляді та 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 включено наступні інструментальні компоненти: проксі-сервер обробки запитів, веб-сервер відтворення інформації, сервер обробки даних, сервер БД. Прикладом реалізації КСМ на визначених принципах і встановлених вимогах є інтерфейс системи Equant (<https://equant.pp.ua>).

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 входять засоби обробки запитів і даних, що надходять до системи із зовнішнього по відношенню до структуроутворюючих систему компонентів Internet-середовища, де знаходяться клієнти-користувачі КСМ. Основними такими засобами є: система управління БД; веб-сервер управління запитами; сервер застосувань з обробки даних.

Прикладним забезпеченням КСМ є комплекс програм, який реалізує функції системи за інформаційною технологією “клієнт-сервер” і спирається у роботі на інструментальні засоби. В результаті до архітектури КСМ включено наступні компоненти: і проксі-сервер обробки запитів Nginx; веб-сервер відтворення інформації Apache2; сервер обробки даних Django; сервер бази даних MSSQL Server.

Схему варіантів функціонування компонентів КСМ подано на рис. 6.1.

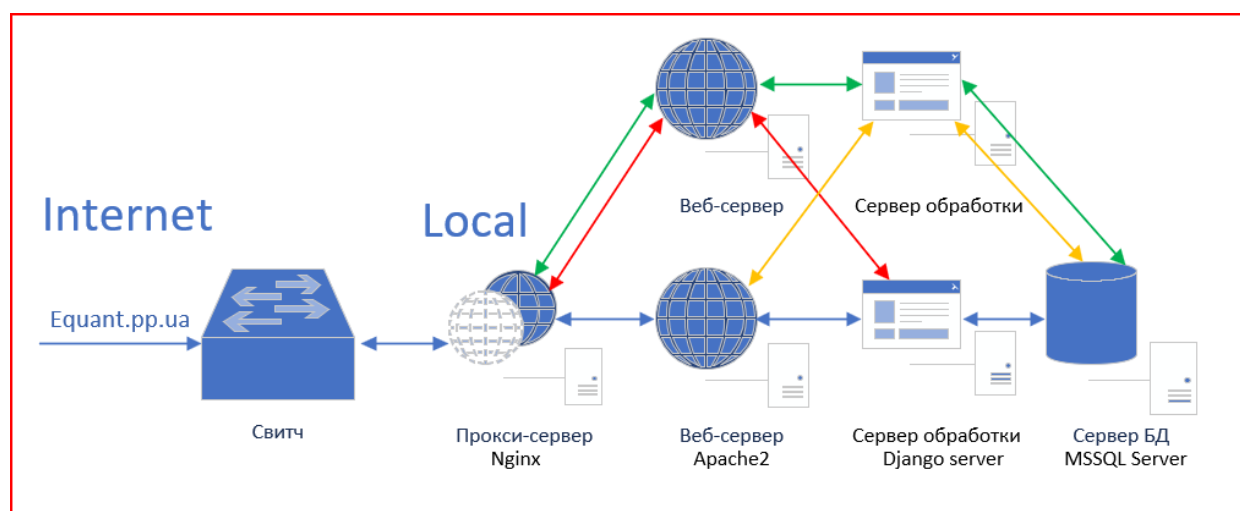


Рисунок 6.1. Схема функціонування основних компонентів КСМ:

- ↔ – виведення в резерв веб-сервера і сервера обробки;
- ↔ – виведення в резерв тільки сервера обробки;
- ↔ – виведення в резерв тільки веб-сервера.

Процедура функціонування компонентів КСМ полягає у прийнятті запитів з Internet-середовища на комунікаційному засобі-маршрутизаторі за програмними портами 443 або 80, направлені їх на проксі-сервер Nginx для ідентифікації пакетів та їхньої попередньої обробки. Системне програмне забезпечення серверів КСМ здійснюється за допомогою операційної системи Linux Debian 11.

Отже, основними інструментальними компонентами – фреймворками у складі програмного забезпечення, які забезпечують роботу КСМ, є клієнто-орієнтоване середовище AngularJS для відтворення інформації, сервіс-орієнтоване середовище Django Framework для обробки даних та система управління базою даних Microsoft SQL Server.

Створення єдиного інформаційного середовища КСМ щодо даних функціонування енергетичного ринку України та ринків суміжних країн може здійснюватися наступними механізмами обробки даних: ручне завантаження даних шляхом автоматизованої обробки вхідних файлів заздалегідь визначеного формату та структури; автоматичне завантаження даних шляхом розбору відповідних веб-сторінок енергетичних компаній, учасників оптового ринку ЕЕ, операторів ринку ЕЕ України та ринків суміжних країн, тощо; автоматичне завантаження даних із використанням загальнодоступних API сервісів.

Використання вищезазначених механізмів та технологій їхньої реалізації дає можливість охопити практично будь-які способи отримання даних та забезпечує високу гнучкість під час розробки відповідних сервісів, що у свою чергу, забезпечує процес оперативного наповнення інформацією єдиної БД КСМ та використання зазначених даних для подальших моделюючих розрахунків.

Для доступу до об'єктів та параметрів використовується стандартна мова запитів SQL. Тому, як сховище даних, окрім MS SQL Server, можуть бути використані всі інші основні типи СУБД із SQL-доступом ORACLE, Interbase тощо.

Інтерфейс користувача – агента ринку Серед розроблених та забезпечуючих взаємодію користувача з комп'ютерної системою інтерфейсів перерахуємо 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 постаальників та споживачів ЕЕ; інтерфейс виробників із відновлювальних джерел енергії; інтерфейс прогнозування цін та обсягів; та інші.

У цьому розділі розглядається постановка та способи вирішення проблеми управління попитом на ринку ЕЕ задля забезпечення задач оперативного планування електроспоживанням (попитом) з метою підвищення енергоефективності процесів виробництва, передачі та використання ЕЕ. На основі проведеного аналізу методів та засобів побудови моделей короткострокового прогнозування пропонуються моделі оперативного прогнозування показників стану ринку ЕЕ (цін, обсягів) в режимі близькому до реального часу. Наведено також приклади побудови комп'ютерних моделей та засобів інформаційно-методичного забезпечення КСМ для вирішення прикладних задач аналізу та прогнозу попиту на ЕЕ у процесі ціноутворення.

Модель визначення цін в контрактах постачальників роздрібною ринку ЕЕ. Для постачальників ЕЕ (далі постачальник) за нерегульованим тарифом, які забезпечують від 65% до 70% споживачів роздрібною 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 роздрібною ринку зумовлює необхідність забезпечення у конкурентних умовах рентабельність ціни для постачальників та її привабливість для споживачів.

Процес ціноутворення на роздрібною ринку – це процес встановлення ціни на продукт чи послугу кінцевому споживачеві. У діючій 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 визначення ціни постачання ЕЕ полягає в тому, що постачальник змушений формувати портфель замовлень продукту та допоміжних послуг, перебуваючи одночасно у двох системах ціноутворення: динамічного ринкового та регуляторного тарифоутворення.

Постачальник є фактично вузловою точкою трансформації ціни (рис. 7.1) та повинен мати у своєму розпорядженні математичний апарат (модель трансформації ціни) для розрахунку фіксованої ціни для споживача на роздрібною ринку та можливість розрахунку договірних цін за двосторонніми договорами для купівлі ЕЕ у виробників або на сегментах ОРЕ для постачання споживачеві за ціною, яку цей споживач бажає отримати.

Модель ціноутворення допомагає постачальнику врахувати різні чинники під час вибору товару на сегментах ОРЕ чи послуги на ринку допоміжних послуг. Визначення ціни контрактації для споживачів на розрахунковий період пропонується здійснювати за наступної формулою: $C^K = (T_{ОСП} + T_{ОСР}) + C_{ЕП}^{II} + C_{ЕЕ}$, де C^K – ціна контрактації, грн./МВт год; $T_{ОСП}$ – прогнозний або встановлений Регулятором тариф ОСП на розрахунковий період, грн./МВт*год; $T_{ОСР}$ – прогнозний або встановлений Регулятором тариф ОСР на розрахунковий період, грн./МВт*год; $C_{ЕП}^{II}$ – ціна послуги

постачальника, грн./МВт*год; C_{EE} – середньозважена ціна ЕЕ, яка купується постачальником на всіх відповідних сегментах ринку ЕЕ грн./МВт*год.

Ціна послуги постачальника розраховується за наступною формулою (грн./МВт*год): $C_{EP}^I = C_{EP}^e \times K_{EP}^p$, де C_{EP}^e – ціна витрат постачальника на здійснення діяльності з постачання ЕЕ, грн./МВт*год; K_{EP}^p – коефіцієнт ризику, який збільшує ціну послуг постачальника з метою врахування відповідних ризиків 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. Середньозважена ціна ЕЕ за розрахунковий період, яка придбається постачальником на всіх сегментах ОРЕ, в тому числі за двосторонніми договорами, визначається за наступною формулою (грн./МВт*год): $C_{EE} = \frac{B_{EE}}{O_{EE}}$, де B_{EE} – ціна ЕЕ, яка придбається постачальником на всіх сегментах ринку ЕЕ, в тому числі за двосторонніми договорами; O_{EE} – обсяг ЕЕ, яка придбається постачальником на всіх сегментах ринку ЕЕ, МВт*год.

Зазначені ціна та обсяг визначаються за наступними формулами відповідно:

$$B_{EE} = \sum_1^n \left(\sum_G^P \left((C_G^D \times O_G^D) + (C_G^C \times O_G^C) + (C_G^K \times O_G^K) + (C_G^{\bar{p}} \times O_G^{\bar{p}}) \right) \right),$$

$$O_{EE} = \sum_1^n \left(\sum_r^p (O_r^D + O_r^C + O_r^K + O_r^{\bar{p}}) \right),$$

де n – кількість договорів, од.; P – кількість годин в періоді постачання; G – розрахункова година, год.; C_G^D – ціна ЕЕ у відповідній годині “Г” за договором “Д”, який підпадає під критерій довгострокового, грн./МВт*год; O_G^D – обсяг ЕЕ у відповідній годині “Г” за договором “Д”, який підпадає під критерій довгострокового, тис.кВт*год; C_G^C – ціна ЕЕ у відповідній годині “Г” за договором “С”, який підпадає під критерій середньострокового, грн./МВт*год; O_G^C – обсяг ЕЕ у відповідній годині “Г” за договором “С”, який підпадає під критерій середньострокового, тис.кВт год; C_G^K – ціна ЕЕ у відповідній годині “Г” за договором “К”, який підпадає під критерій короткострокового, грн./МВт*год; O_G^K – обсяг ЕЕ у відповідній годині “Г” за договором “К”, який підпадає під критерій короткострокового, тис.кВт год; $C_G^{\bar{p}}$ – ціна у відповідній годині “Г” на БР, грн./МВт*год; $O_G^{\bar{p}}$ – обсяг ЕЕ у відповідній годині “Г” на БР з урахуванням напрямку купівлі-продажу небалансу (+/-), тис.кВт*год.

Модель оперативного прогнозування попиту на сегменті ринку «на добу наперед». 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.

Аналіз графіків часових рядів погодинного попиту на ЕЕ 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 у 2022-2023 роки дозволяє зробити висновок про їхню нестационарність. Її прояв виявляється у тому, що практично неможливим стає визначення трендової, сезонної та циклічної складових часового ряду. Ця обставина послужила підставою розробки 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 розробки моделі прогнозування погодинних обсягів попиту ЕЕ використано комбінований метод побудови моделей часових рядів – математичні моделі прогнозування, які знаходять залежність значення обсягів споживання ЕЕ на добу наперед – день торгів (позначимо через D) від минулого всередині 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 базується на основі використання комбінації двох методів. Одним з 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 які далі називатимемо «нетиповими». Згладжування часового ряду в такому випадку часто називають фільтруванням, а перетворення ряду (оператор), за допомогою якого здійснюється фільтрування – фільтром. А як фільтр у 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 «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, помножене на кількість днів з додатною зміною попиту та від'ємною зміною попиту, віддаючи перевагу тим дням, яких більше (шляхом збільшення їхньої ваги) і які ближче до дня D . Суть алгоритму полягає в наступному: (а) визначається кількість днів з додатними та від'ємними змінами попиту; (б) якщо всі дні мають або додатну, або від'ємну зміну, то обчислюється середнє арифметичне – зваження не потрібне; (с) 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); (д) 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 з додатною зміною попиту та від'ємною зміною попиту, з надання переваги тим типам днів, яких більше (шляхом збільшення їхньої ваги). Суть алгоритму полягає в наступному: (а) визначається кількість днів з додатними та від'ємними змінами попиту; (б) якщо всі дні мають або додатну, або від'ємну зміну, то обчислюється середнє арифметичне – зваження не потрібне; (с) 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 з метою вилучення їх 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 їхнього впливу як нерепрезентативних 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 та окремо для від'ємних змін попиту; (с) коригування ваги додатних значень зміни попиту (або від'ємних; для додатних 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 (Д -1) як основи для додавання певної величини зміни попиту між відповідними днями за попередні періоди.

Дослідження варіантів моделей. Для проведення розрахунково-експериментальних досліджень із застосуванням описаних вище варіантів моделей та порівняння отриманих прогнозних розрахункових значень з 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 представлено у вигляді порівняльної таблиці 7.1. Як видно з таблиці, алгоритм 4 показав як найменше відхилення від реальних даних, так і найбільшу кількість разів, коли він був більш точним.

Таблиця 7.1 - 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

У той же час застосування алгоритму 4 дає можливість як відкидати нетипові дні (що неможливо у разі застосування алгоритму 1), так і відслідковувати нетипову поведінку учасників ринку під час подачі заявок на РДН.

Модель збирання даних динаміки розвитку альтернативної електроенергетики. Розглянемо приклад розвитку КСМ щодо розширення можливостей інформаційного забезпечення вирішення завдань управління процесом ціноутворення в умовах стрімкого розвитку застосування ГУ малої потужності в ОЕС України шляхом формування необхідного інформаційного ресурсу. Розроблено нову систему опису ГУ які використовують альтернативні джерела енергії, у тому числі і ВДЕ за допомогою розширення переліку показників їхнього 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 виробітку ЕЕ, а також характеристика їхнього приєднання до (високовольтних або розподільних) мереж передачі ЕЕ.

Для розв'язання задач важливих інформаційно-аналітичних досліджень у контексті відстеження та коригування динаміки процесу ціноутворення в складних умовах інтеграції установок альтернативної генерації у централізовану ОЕС потрібно зібрати та обробити вихідні масиви даних, а саме інформацію про наступне: 1. Об'єкти альтернативної електроенергетики; 2. Суб'єкти альтернативної електроенергетики; 3. Дані про діяльність об'єктів (фактичний відпуск ЕЕ); 4. Інша аналітична та (або) статистична інформація.

Відбудова та розвиток альтернативної електроенергетики України потребує вивчення та оцінки стану її об'єктів, створення інформаційної системи моніторингу з розвинутими засобами обробки даних включно зі створенням інформаційно-технологічної карти показників розвитку її об'єктів по регіонах за наступними показниками: 1. За видами альтернативних джерел; 2. За приєднанням до мереж; 3. За обсягами приєднання з урахуванням виду діяльності.

Створена інформаційно-моніторингова система дозволяє здійснювати збір і систематизацію актуальної інформації в КСМ про об'єкти, що використовують альтернативні джерела енергії, з необхідною дискретністю у часі та розширює можливості її подальшого використання у вирішенні наукових і практичних задач, пов'язаних з прийняттям 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.

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 поточкорозподілу 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 поточкорозподілу 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 вузлових 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 середньозважених цін на РДН за 2 півріччя 2019 року становить близько 9%, що відповідає попереднім розрахункам (6,8%), які виконані, ще у 2017 році.

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 прогнозної 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 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=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: 1757-899X Print ISSN: 1757-8981. (Scopus). DOI: <https://doi.org/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-prykladni-naukovo-tekhnichni-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 енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. С. 54-60. https://www.researchgate.net/publication/358783849_FUNKCIONALNA_SKLADOVA_VEZPEKI_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 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. 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 моделювання 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 моделювання 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 моделювання в енергетиці - «Equant Cloud». *Восьма міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання 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 моделювання 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 моделювання, 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 моделювання процесів ціноутворення на ринку електроенергії. *Кібербезпека енергетики, науково-практична конференція Інституту проблем моделювання 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. // *Енергосбережение. 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>.

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 вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу функціонування СОТС ціноутворення, програмно-апаратних засобів комп'ютерної системи моделювання задля організації

інформаційно-технологічного забезпечення всебічного дослідження процесу ціноутворення та утворення нових механізмів управління процесом ціноутворення.

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

Розроблено мультиагентне подання процесу ціноутворення, а саме: функціональний опис агентів, архітектуру агента у інтегрованій 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 та агентів зовнішнього середовища у єдиному просторі у складі системи управління і координації, системи комунікації і математичного та інформаційно-технологічного забезпечення.

Запропоновано метод аналізу вузлової трансформації процесу ціноутворення та метод оцінки результатів сполучення ринків електроенергії «на добу наперед» України з європейськими країнами. Наведено приклади їхнього застосування для вирішення завдань аналізу і дослідження особливостей процесу формування цін на ринку електроенергії.

Побудовано комп'ютерну модель вирішення оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку «на добу наперед» задля визначення рівноважної ціни електроенергії на підставі цінних заявок виробників та постачальників, процесу підготовки пропозицій ТЕС на підставі розрахунку ціни та обсягів на аукціон сегменту ринку «на добу наперед».

Розроблено засоби інформаційно-технологічного забезпечення КСМ процесу ціноутворення, запропоновано програмно-апаратне середовище, яке базується та орієнтоване на утворення в складі системи структурних програмних модулів з інформаційно-моделюючої та інформаційно-розрахункової підсистем.

Наведено приклади практичного використання теоретичних результатів з розроблення математичних моделей та КСМ.

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) with pricing, software and hardware of a computer modeling system for the organization of information technology support for a comprehensive study of the pricing process and introduction of new mechanisms for managing the pricing process.

An approach is proposed for compiling a mathematical description of the pricing process 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 the description 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, which are composed of sets of elementary nodes of different quantitative composition, formed from nodal points of energy transformation, and which simultaneously become local nodes of pricing.

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 on 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" .

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

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