

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Євдокімова Володимира Анатолійовича  
«**Методи та засоби комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу  
ціноутворення в організаційно-технічних системах**»,

представлену на здобуття ступеня доктора технічних наук за науковою спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### **Актуальність теми.**

Завдяки впровадженню в Україні нової моделі лібералізованого ринку електричної енергії, побудованого з дотриманням вимог Директиви 2009/72/ЄС стосовно загальних правил для внутрішнього ринку електроенергії, була сформована нова багаторівнева система організаційних, технічних, економічних, інформаційних взаємовідносин учасників ринку – складна організаційно-технічна система (СОТС) ціноутворення ринку електроенергії. Така конфігурація структури ринку надає можливість виробникам електроенергії реально конкурувати між собою, а постачальникам вільно обирати виробника електричної енергії. На роздрібному ринку також кардинально змінюється система взаємовідносин внаслідок появи нових учасників - постачальників електричної енергії, постачальників універсальних послуг, операторів системи розподілу, які займаються розподілом електричної енергії, а також відповідають за її комерційний облік. У результаті ринок працює за новими правилами, відповідно до яких тарифи на електроенергію залежать не тільки від умов роботи кінцевого споживача, а й ще від наданих послуг з постачання електричної енергії – ціни, умов оплати і обсягу продукції, що постачається.

Крім цього, у зв'язку з впровадженням у традиційній енергетичній системі виробників електричної енергії, які використовують відновлювальні джерела енергії, що привело до стрімкого зростання числа учасників на ринку електричної енергії призводить до змін структури виробництва та споживання електричної енергії, і як наслідок впливає на систему ціноутворення в умовах конкурентного середовища. Але особливо відчутно ці зміни проявляються в контексті ринкового ціноутворення на електроенергію, зокрема у процесі застосування регуляторних механізмів встановлення тарифів для компаній відновлюваної енергетики та енергопідприємств, віднесених до категорії природних монополій, а також у межах надання енергопідприємствами системних послуг із метою забезпечення стійкості енергосистеми, тарифів для окремих категорій кінцевих споживачів. У зв'язку з цим, у нових умовах функціонування ринку електроенергії постає проблема стосовно розроблення та дослідження методів та засобів математичного та комп'ютерного моделювання,

171ME 6x. 395  
06.12.2024



інформаційно-технологічного забезпечення процесу формування цін у СОТС ціноутворення для розробки на їх основі методичного інструментарію для розв'язання задач підготовки і прийняття рішень про ціни в торгових заявках на поставку електроенергії та наданні системних послуг та інших задач моделювання й обчислення у процесі ціноутворення на ринку електроенергії.

Тому представляється актуальною тема рецензованої дисертаційної роботи Євдокімова В.А, яка спрямована на вирішення проблеми 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 розв'язання задач моделювання й обчислення.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень та їх достовірність.**

Як впливає з представлених матеріалів, постановка наукових і практичних завдань у роботі визначалась тематикою досліджень, які проводились в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України відповідно до плану науково-дослідних робіт НАН України в межах фундаментальних і прикладних держбюджетних тем.

Отримані здобувачем і представлені в роботі наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційного дослідження достатньо обґрунтовані та достовірні, що досягнуто за рахунок системної постановки задач досліджень та належного теоретичного їх обґрунтування, послідовності виконання та інтерпретації результатів експериментальних розрахунків, деталізованого теоретичного дослідження властивостей функцій, покладених в основу нових методів та моделей.

Обґрунтованість наукових результатів і їх новизна обумовлені коректним використанням сучасних методів теорії систем організаційного управління, агентно-орієнтованого та об'єктно-орієнтованого моделювання складних багаторівневих СОТС. Достовірність підтверджується шляхом проведення розрахунково-експериментальних досліджень запропонованих математичних моделей та розв'язанням тестових і практичних задач та їх співставленням із вже існуючими науковими здобутками. Отримані висновки та рекомендації є достатніми та обґрунтованими.

## **3. Наукова новизна отриманих результатів.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

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, який відрізняється способом формалізації за рахунок подання у вигляді двох взаємопов'язаних графів поточкорозподілу товару та його вартості з різним кількісним складом локальних вузлів 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, що відрізняється наявністю у складі агентів зовнішнього середовища яке впливає на процес ціноутворення. На його основі побудовано мультиагентну імітаційну модель процесу ціноутворення у вигляді кортежу певних множин імітованих агентів та множини агентів впливу зовнішнього середовища, а також розроблено агентно-орієнтовану архітектуру комунікаційного середовища взаємодії агентів у процесі ціноутворення.

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.

5. Розроблено математичну модель оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку «на добу наперед» задля визначення рівноважної ціни ЕЕ на підставі цінових заявок його учасників. 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. Модель сформовано у вигляді оптимізаційної задачі з параметрично заданими рівноважними цінами на ринку та розроблено відповідний обчислювальний алгоритм.

6. Розроблено програмне забезпечення комп'ютерної системи моделювання 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.

#### **4. Практичні результати роботи.**

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні комплексу засобів математичного та комп'ютерного моделювання, інформаційно-технологічного забезпечення процесу формування цін у СОТС ціноутворення, комп'ютерної системи моделювання та отриманні авторських свідоцтв на комп'ютерні програми. Модель оптимізаційної задачі пошуку рівноважного стану ринку «на добу наперед» використано АТ «Оператор ринку». Учасниками ринку (Асоціація сонячної енергетики України, ТОВ «ЕнерджіПул» та ТОВ «Енергостаб») використовуються моделюючі засоби комп'ютерної системи моделювання, що підтверджується відповідними листами та актами щодо використання результатів отриманих в дисертаційній роботі.



## **5. Структура та зміст дисертації.**

Дисертаційна робота складається з анотації українською та англійськими мовами, списку публікацій здобувача, переліку скорочень, вступу, сьомі розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 310 сторінок, у тому числі 241 сторінок основного тексту, включаючи 12 таблиць та 38 рисунків.

**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 електроенергії як складної організаційно-технічної системи. Підсистему управління ціноутворенням виділено як окрему мультиагентну складну організаційно-технічну систему ринку електроенергії. Складено її формальний опис. Наведено аналіз стану сучасних досліджень математичного та комп'ютерного моделювання процесу ціноутворення та обґрунтовано актуальність науково-прикладної проблеми розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу ціноутворення.

**У другому розділі** 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 складній організаційно-технічній системі ціноутворення.

**У третьому розділі** основна увага приділяється розробці методів, призначених для вирішення як наукових, так і прикладних практичних завдань аналізу динаміки зміни цін на ринку електроенергії. Запропоновано метод аналізу вузлової трансформації процесу ціноутворення та метод оцінки результатів сполучення ринків електричної енергії «на добу наперед» України з європейськими країнами. Наведено приклади їхнього застосування для вирішення завдань аналізу і дослідження особливостей процесу формування цін на ринку України в умовах зміни в структурі виробництва і споживанні електричної енергії, сполучення ринків електричної енергії «на добу наперед» України та сполучення ринків електричної енергії «на добу наперед» України та Молдови.

**У четвертому розділі** описано математичну модель оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану сегменту ринку «на добу наперед» та на підставі цього, розроблено обчислювальний алгоритм та програму його реалізації задля розв'язання оптимізаційної задачі моделювання рівноважного стану і визначення рівноважної ціни електроенергії на підставі цінових заявок виробників та постачальників електричної енергії.

**У п'ятому розділі** роботи розглянуто теоретичні та прикладні засади розробки сучасних засобів інформаційно-технологічного забезпечення



комп'ютерної системи моделювання в електроенергетиці у вигляді інтерактивних адаптивних об'єктно- та функціонально-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень для вирішення завдань планування розвитку генеруючих потужностей на ринку електричної енергії.

**У шостому розділі** розглянуто питання побудови програмно-апаратного забезпечення комп'ютерної системи моделювання процесу ціноутворення, яку реалізовано на платформі алгоритмічного моделювання для учасників ринку електричної енергії, включаючи її структурно-функціональну організацію.

**У сьомому розділі** наведені приклади побудови комп'ютерних моделей та засобів інформаційно-методичного забезпечення комп'ютерної системи моделювання для вирішення прикладних задач аналізу та прогнозу попиту і цін на електроенергію у процесі ціноутворення.

**У загальних висновках** наведено результати, які дозволили оцінити ступінь досягнення автором мети дисертаційної роботи та повноту проведених досліджень при розв'язанні сформульованих основних теоретичних та прикладних задач. Результати показують, що поставлені завдання дисертаційної роботи вирішені і мета досліджень в повній мірі досягнута.

**Додатки** містять інформацію про наукові публікації, апробацію та документи які підтверджують використання наведених у дисертаційній роботі результатів досліджень на практиці, а також копії авторських свідоцтв, які отримано автором за результатами дисертаційної.

#### **6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.**

Аналіз тексту дисертаційного дослідження та використаних джерел, свідчить про відсутність порушення академічної доброчесності автором дослідження.

#### **7. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Наукові результати дисертації висвітлені у 40 наукових працях, у складі яких: 1 – колективна монографія, яку опубліковано у закордонних виданнях, індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus; 1 – одноосібна монографія, 19 – статей 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 з квантилем Q3; 19 – матеріалів доповідей на наукових конференціях, у тому числі 7 міжнародних, із яких 1 проіндексована у міжнародній наукометричній базі Scopus.

Аналіз публікацій та матеріалів дисертації надає можливість стверджувати, що наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

**8. Відповідність реферату текстові дисертації.** Реферат достатньою мірою відображає зміст роботи, основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи ідентичні наведеним у авторефераті. Зміст реферату базується на тексті дисертації.

#### **9. Зауваження до щодо змісту дисертаційної роботи.**

1. Тема дисертаційної роботи сформульована широко та носить дещо загальний характер. Фактично у роботі представлено результати щодо розробки методів математичного та комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу формування цін лише на ринку електричної енергії. Прикладів



застосування розроблених засобів моделювання для подібних СОТС ціноутворення в інших організаційно-технічних системах фактично не наведено.

2. У роботі стор.97-98 наведено досить докладний, хоча і не повний перелік факторів, що впливають на процес ціноутворення. У п. 3.1 присвяченому формалізації процесу введено множину формалізованих залежностей зміни динаміки зовнішніх факторів для опису цих факторів:

$$X = \bigcup_{p,k} X^{p,k}, X^{p,k} = \{x_l^{p,k}(t) | l = 1, 2, \dots, L\}$$

Але залишилося не ясним як і яким способом можна кількісно визначити ступінь впливу цих факторів.

3. В п.п. 3.2.1 наведено модель аналізу динаміки попиту на електроенергію на ціноутворюючих сегментах оптового ринку. Під час опису моделі зазначено, що розглядається тільки маржинальна ціна на РДН у системі ОЕС, як визначальна (індикативна), за якою обчислюються всі цінові показники про витрати на допоміжні послуги у процесі виробництва, постачання й розподілу електроенергії в ОЕС. Залишається незрозумілим чому не враховуються ціни в сегменті балансуєчого ринку та вплив обсягів та цін в сегменті допоміжних послуг.

4. В п. 3.4. наведено опис методу оцінки результатів сполучення ринків електричної енергії, а у висновках до розділу 3 вказано, що цей метод дозволяє здійснити аналіз впливу зовнішніх чинників на рівноважні стани сполучуваних ринків та отримати чисельні характеристики наслідків застосування відповідного регуляторного рішення про сполучення. Залишилось не зрозумілим про які регуляторні рішення про сполучення іде мова (сполучення РДН, чи РДН та БР) і чому обрано випадок об'єднання ринку електричної енергії України та Молдови, який відрізняється своєю особливою структурою у порівнянні з ринками країн ЄС.

5. В п. 4.2. запропонована комп'ютерна модель розв'язання оптимізаційної задачі з визначення рівноважних погодинних цін на сегменті ринку «на добу наперед», яка враховує різні типи простих та блочних заявок на купівлю/продаж електричної енергії.

Чи реалізовано автором моделі аналізу “парадоксально відхилених заявок” (відхилено заявку, яка повинна бути прийнята за умовою середніх рівноважних цін) та “парадоксально прийнятих заявок” (прийнято заявку, в якій вказана ціна менша за середнє рівноважних цін в охоплювані заявкою години – учасник торгів отримує гіршу за указану в заявці ціну)?

6. В п.п. 4.3.1. наведено алгоритмічну модель процесу підготовки заявок теплових електростанцій для участі в сегменті оптового ринку «на добу наперед». Як зрозуміло із тексту роботи зазначена алгоритмічна модель реалізована у відповідній комп'ютерній програмі та базується на відомих формулах розрахунків, що застосовувались для оцінки цін в відповідних заявках в ОРЕ, а також під час аналізу перспектив впровадження нової моделі ринку. При цьому підтвердження адекватності розробленої автором моделі здійснено на основі порівняння похибки відповідних моделей для даних 2016 та 2019 рр. З тексту роботи не зрозуміло виконувався порівняльний аналіз цін на



електричну енергію вироблену саме на ТЕС, які склалися на ОРЕ, з очікуваною ціною на РДН, чи порівняльний аналіз прогнозованої ціни ОРЕ з очікуваною ціною РДН.

7. Розділи 5 та 6 дисертації присвячені розробці комп'ютерної системи моделювання, призначеної для вирішення інформаційно-аналітичних задач моделювання та практичних завдань розрахункового характеру, що виникають у процесі ціноутворення на ринку електроенергії.

У дисертаційній роботі не сформульовані обмеження застосовності запропонованої комп'ютерної системи моделювання. Чи можна її в такому випадку вважати універсальною, придатною для побудови імітаційних моделей досліджуваного процесу ціноутворення.

8. В п. 7.3. наведено модель оперативного прогнозування попиту на сегменті ринку «на добу наперед» та порівняння результатів прогнозування з фактичними даними. Чи виконувалось порівняння запропонованої моделі із відомими моделями прогнозування, зокрема регресійними та штучними нейронними мережами?

Разом із тим, наведені зауваження стосуються окремих складових дисертаційної роботи та не знижують наукову і практичну цінність результатів роботи, її загальну позитивну оцінку.

#### **Висновок.**

Дисертаційна робота Євдокімова Володимира Анатолійовича «Методи та засоби комп'ютерного моделювання мультиагентного процесу ціноутворення в організаційно-технічних системах», яка спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми 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 розв'язання задач моделювання й обчислення виконана на високому рівні і є завершеною науково-дослідною працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані та достовірні результати. Структура і зміст дисертації повністю відповідають науковій спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №1197 від 17 листопада 2021 року, а її автор Євдокімов Володимир Анатолійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
заступник директора з наукової роботи  
Інституту електродинаміки НАН України



Ігор БЛІШНОВ