

РЕЦЕНЗІЯ
на дисертаційну роботу
Клюзка Олексія Івановича
на тему «Моделювання задач купівлі-продажу електроенергії компаніями-
постачальниками в ринкових умовах»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна робота присвячена моделюванню задач прогнозування електроспоживання та оптимізації портфеля купівлі-продажу електроенергії компанією-постачальником в умовах функціонування ринку електричної енергії України. Актуальність теми зумовлена високою волатильністю цін, невизначеністю попиту, необхідністю зменшення небалансів та потребою у підтримці прийняття рішень постачальником електроенергії.

Особливого значення ця задача набуває в умовах воєнного стану, коли профілі електроспоживання суттєво змінюються через аварійні та стабілізаційні відключення, пошкодження енергетичної інфраструктури та інші зовнішні чинники. За таких умов стандартне прогнозування на основі лише календарних, часових та метеорологічних ознак може бути недостатнім. Тому розроблення моделей, які враховують обмеження електропостачання і пов'язують прогнозний контур з оптимізацією закупівельного портфеля, є актуальним науково-практичним завданням для спеціальності 122 Комп'ютерні науки.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Метою дисертаційної роботи є розроблення моделей, методів та інформаційної системи підтримки прийняття рішень компанією-постачальником

електричної енергії в умовах конкурентного ринку, невизначеності попиту, цінової волатильності та зовнішніх обмежень функціонування енергосистеми.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у розробленні моделі прогнозування погодинних обсягів електроспоживання з використанням алгоритму Random Forest та введенням LS-фактора як додаткового параметра для врахування аварійних і стабілізаційних відключень; у побудові оптимізаційної моделі формування портфеля купівлі-продажу електроенергії компанією-постачальником з урахуванням прогнозних обсягів споживання, цінових параметрів і ринкових обмежень; у створенні інтегрованої моделі системи підтримки прийняття рішень, що поєднує прогнозування та оптимізацію; а також у програмній реалізації запропонованих підходів у системі Energy AI.

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується використанням методів системного аналізу, статистичної обробки часових рядів, методів машинного навчання, зокрема алгоритму Random Forest, методів формування ознак, а також методів лінійного програмування для оптимізації закупівельного портфеля. Достовірність результатів підтверджується обчислювальними експериментами, порівнянням прогнозних і фактичних значень, апробацією результатів на наукових конференціях, публікаціями здобувача та практичним впровадженням розробленої програмної системи.

Наукові дослідження були виконані здобувачем у відділі математичного та економетричного моделювання Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України під керівництвом члена-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сауха Сергія Євгеновича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо розроблення моделей і методів прогнозування електроспоживання та оптимізації портфеля купівлі-продажу електроенергії компанією-постачальником виконано повністю. Здобувач продемонстрував здатність застосовувати методологію наукової

діяльності, формалізувати прикладну задачу, будувати математичні та комп'ютерні моделі й перевіряти їх за допомогою обчислювальних експериментів.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота Ключка О. І. відповідає спеціальності 122 Комп'ютерні науки. Робота має прикладний характер, але містить необхідну для цієї спеціальності математичну та алгоритмічну складову: постановку задач прогнозування, формування вектора ознак, використання алгоритму машинного навчання, введення додаткового LS-фактора, формалізацію оптимізаційної моделі та реалізацію цих підходів у програмній системі.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. У межах проведеного аналізу ознак порушення принципів академічної доброчесності не виявлено. Використані в роботі ідеї, результати та тексти інших авторів супроводжуються посиланнями на відповідні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріал викладено загалом послідовно: від опису ринку електроенергії та ролі постачальника до аналізу існуючих методів прогнозування й оптимізації, побудови власних моделей та їх програмної реалізації. Структура роботи логічна і відповідає поставленій меті.

Разом з тим у тексті трапляються окремі неточності у математичних позначеннях, термінологічні неузгодженості та місця, де формалізацію доцільно зробити більш акуратною. Ці зауваження наведено нижче.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінок, обсяг основного тексту – 162 сторінки. Робота містить 17 рисунків, 14 таблиць, 5 додатків. Список використаних джерел налічує 113 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

У першому розділі досліджено особливості функціонування ринків електричної енергії Європейського Союзу та України, розглянуто роль компанії-постачальника на ринку електроенергії та сформульовано задачі управління такою компанією.

У другому розділі проаналізовано методи математичного моделювання ринкової поведінки постачальника електроенергії, зокрема статистичні моделі часових рядів, методи кластеризації, машинного та глибинного навчання, а також методи лінійного, нелінійного та стохастичного програмування у задачах оптимізації портфелів купівлі-продажу електроенергії.

У третьому розділі подано основні моделі дисертаційної роботи: модель погодинного прогнозування електроспоживання на основі алгоритму Random Forest, підхід до врахування LS-фактора в умовах аварійних і стабілізаційних відключень та оптимізаційну модель закупівельного портфеля постачальника.

У четвертому розділі описано програмну систему Energy AI, наведено результати обчислювальних експериментів і проаналізовано ефективність запропонованих моделей у різних сценаріях функціонування енергосистеми.

У висновках узагальнено основні результати дисертаційного дослідження.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до загальних вимог до кваліфікаційних наукових праць. Окремі неточності у формулах і позначеннях не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, але потребують урахування під час подальшого розвитку дослідження.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлено у 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України та 5 тез доповідей на науково-практичних конференціях. Практичне значення результатів

підтверджується реалізацією програмної системи Energy AI та свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір, наведеними у дисертації.

Публікації відповідають темі дисертації та відображають основні результати дослідження. У публікаціях зі співавторами особистий внесок здобувача пов'язаний з побудовою моделей, підготовкою даних, аналізом впливу факторів на електроспоживання та виконанням обчислювальних експериментів.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, належним чином оприлюднені у наукових публікаціях здобувача та апробовані на наукових заходах.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У підрозділі 3.1 при описі розщеплення вузла дерева рішень при записі правої підмножини D_{right} допущена технічна описка: там має бути протилежна нерівність, тобто $X_{ij} > s$ замість $X_{ij} \leq s$.

2. У формулі (7) потрібно в знаменнику написати N замість n .

3. В описі процедури поділу даних на навчальну і тестову вибірки, потрібно також зазначити, як відбувається відбір даних для навчання та для тестування. Оскільки розглядається часовий ряд, важливо, щоб тестування здійснювалося за хронологічним принципом, тобто щоб у навчання моделі не потрапляла інформація з майбутніх періодів, а дані для тестування брались з більш пізніх періодів, ніж для навчання.

4. Бажано уточнити, які саме значення температури використовуються при тестуванні прогнозової моделі: фактичні значення (відомі постфактум) чи прогнозні значення, які має постачальник на момент формування торгової позиції?

5. У підрозділі 3.2 незрозуміло, як визначені компоненти LS-фактора. Наприклад, друга компонента $l_2(t)$ у різних місцях описується то як рівень черги обмежень, то як кількість знеструмлених фаз; третя компонента $l_3(t)$ – то як кількість населених пунктів, то як кількість споживачів без електроживлення.

Оскільки LS-фактор є одним із ключових елементів прогнозної моделі, його компоненти мають бути визначені однозначно.

6. Після нормалізації (ділення на максимальне значення) третьої компоненти LS-фактора величина $l_3(t)$ належить відрізку $[0, 1]$ і вже не може дорівнювати кількості споживачів, а є безрозмірним нормованим показником. Якщо під цією величиною мається на увазі частка споживачів без електропостачання, то потрібно пояснити, відносно якої загальної кількості ця частка обчислюється.

Також у формулі нормалізації $l_3(t)$ бажано уточнити, за якою множиною моментів часу обчислюється максимум, чи не виникає при цьому витоку інформації?

7. Потрібно уточнити, яким чином значення LS-фактора визначаються для майбутніх періодів, на які будується прогноз. Якщо у тестових розрахунках використовувались фактичні значення відключень, які стали відомими лише постфактум, це може покращувати ретроспективну якість моделі, але не повністю відображає умови реального прогнозування.

8. Формула (14), яка використовується для оцінювання економічного ефекту від коригування торгової позиції, потребує уточнення: чи не потрібно окремо розглядати різні типи відхилень, які відповідають позитивному і негативному небалансу? Чи враховуються у моделі тип відхилення? З математичної точки зору це можна зробити, розглядаючи окремо додатну та від'ємну частини похибки прогнозування.

9. Є певна неузгодженість стосовно того, яка саме задача розглядається і вирішується у роботі – MILP чи все ж таки LP. У підрозділі 3.3 сформульована модель містить лінійну цільову функцію та лінійні обмеження і описується як задача лінійного програмування. Водночас в інших місцях використовується термін MILP. Якщо цілочисельні або бінарні змінні не використовуються, то тоді це LP. А якщо це все ж таки MILP, то потрібно було явно ввести відповідні дискретні змінні та обмеження.

10. У формалізованій постановці задачі бажано було явно додати умови невід'ємності для змінних рішення, зокрема $H_g \geq 0$, $B_t \geq 0$, $S_t \geq 0$, які хоч і видаються очевидними, але в формальній моделі мають бути присутні.

11. У формулі (19) незрозуміла сутність величин $h_{g,t}$: якщо вони характеризують частки від сумарного обсягу закупівлі, то було б бажано це уточнити, наприклад додати, що їх сума дорівнює 1. Якщо це щось інше – теж треба було пояснити.

12. Формула (16) фактично описує фінансовий результат від операцій купівлі-продажу електроенергії на врахованих ринкових сегментах, але не повний прибуток компанії-постачальника, оскільки в ній явно не враховано мережеві, операційні та інші можливі витрати. Доцільно уточнити економічний зміст величини W .

13. Оптимізаційна модель у підрозділі 3.3 використовує прогнозні обсяги споживання як детерміновані входні параметри. Але залишається незрозумілим, як саме враховані (якщо враховані) похибки прогнозування.

14. На початку підрозділу 3.3 зазначено, що постачальник формує портфель на сегментах РДД, РДН, ВДР та БР. Але далі враховуються лише РДД та РДН. Тому згадка про ВДР та БР трохи заплутує, хоча можливо їх було згадано просто для повноти картини.

15. У формулі (21) незрозуміло, звідки береться множник саме 0.1. Бажано було б хоч якось прокоментувати, чому він вибраний саме так.

Зазначені зауваження переважно стосуються уточнення математичної формалізації, позначень, меж застосовності моделей та інтерпретації окремих результатів. Вони не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість дисертаційної роботи і не впливають на її позитивну оцінку.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ключка Олексія Івановича на тему «Моделювання задач купівлі-продажу електроенергії компаніями-постачальниками в ринкових умовах» виконана на

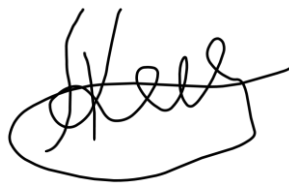
належному науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних і практичних результатів якого розв'язує актуальне науково-практичне завдання в галузі інформаційних технологій.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені пунктами 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Ключко Олексій Іванович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Рецензент:

Провідний науковий співробітник
Інституту проблем моделювання
в енергетиці ім. Г.Є Пухова
НАН України,
доктор технічних наук,
професор



Людмила КОВАЛЬЧУК

«21» серпня 2026 року