

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.

Однією з ключових проблем розвитку ринку електроенергії у багатьох країнах світу є вирішення проблеми прогнозування попиту на електроенергію в умовах конкурентного середовища та широкомасштабного впровадження у традиційні енергетичні системи генеруючих об'єктів і устаткування, які використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Ця обставина призводить до стрімкого зростання числа учасників торговельно-економічних відносин у тому числі електропостачальників, яким дозволено здійснювати купівлю, продаж, включаючи перепродаж, електричної енергії на ринку. Серед них постачальники універсальної послуги, постачальники допоміжних послуг, не пов'язаних з регулюванням частоти (агрегатори), постачальник «останньої надії», трейдери та інші, що відрізняються функціональними особливостями призначення на ринку. Це призводить до змін у структурі виробництва, попиту та споживання електроенергії, та ускладненню вирішення задач прогнозування попиту и прийняття рішень щодо обсягів купівлі електроенергії.

Таким чином, тему дисертаційної роботи Клюзка О.І., метою якої є вирішення комплексу задач розроблення моделей, методів та інформаційної системи підтримки прийняття рішень компаніями-постачальниками щодо купівлі/продажу електричної енергії на конкурентному ринку та їх всебічного дослідження можна вважати актуальною.

Підтвердженням актуальності теми дисертації може бути те, що тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України та виконувалась відповідно до плану наукових досліджень Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. Зокрема, у рамках науково дослідної роботи «Розвиток розподіленої енергетики в умовах ринку електричної енергії України з використанням технологій та систем цифровізації. Розділ 1. Організаційні та математичні моделі взаємодії учасників децентралізованого ринку електроенергії», 2025-2026 рр. (номер державної реєстрації 012SU000237.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. У дисертаційній роботі, відповідно до мети та задач дослідження, вирішено наукове завдання розроблення моделей, методів та інформаційної системи підтримки прийняття рішень компаніями-постачальниками, щодо купівлі-продажу електричної енергії на конкурентному ринку в умовах високої невизначеності попиту, цінової волатильності, зовнішніх обмежень функціонування енергосистеми та Правил ринку.

Наукова новизна основних результатів дисертаційної роботи полягає в наступному.

1. Вперше розроблено модель прогнозування погодинних обсягів електроспоживання, в якій, на відміну від існуючих, використано переваги алгоритму Random Forest (випадковий ліс) та враховано додаткові обмеження шляхом додавання LS-фактору (коефіцієнт обмеження навантаження, індикатор відключення/зниження споживання електроенергії для стабілізації частоти та балансу в енергосистемі) інтегрованого до вектора ознак прогнозної моделі, як екзогенного параметра. Що дозволило запропоновану модель застосувати до умов аварійних та стабілізаційних відключень, впливу воєнних атак на енергетичну інфраструктуру, Це дає змогу підвищити чутливість моделі до екстремальних режимів роботи енергосистеми та забезпечити якість прогнозування погодинних графіків споживання у періоди масованих збурень, коли похибка прогнозу є найбільш критичною для фінансових результатів постачальника.

2. Вперше розроблено оптимізаційну модель формування портфеля купівлі-продажу електричної енергії компанією-постачальником, яка на відміну від існуючих, одночасно враховує прогнозні погодинні обсяги споживання, цінові параметри та ринкові обмеження України, що дозволяє зменшити витрати на закупівлю електричної енергії.

3. Вперше розроблено комп'ютерну модель підтримки прийняття рішень компанією-постачальником електричної енергії – Energy AI, яка на відміну від існуючих забезпечує комплексне вирішення задач прогнозування погодинних обсягів електроспоживання та оптимізації портфеля купівлі-продажу електроенергії, що дозволяє підвищити продуктивність та ефективність процесу прийняття рішень системою управління компанією-постачальником.

Обґрунтованість отриманих наукових положень підтверджується коректністю математичних постановок задач, застосуванням апробованих методів математичного моделювання і програмування, сучасних засобів штучного інтелекту задля їх розв'язання. Важливим етапом обґрунтованості прикладних результатів є розрахунково-експериментальне підтвердження достовірності результатів, відтворюваністю наведених експериментальних результатів, їх відповідності до критерія якості прогнозування. Що

забезпечується використанням сучасного програмного забезпечення при побудові комп'ютерної моделі підтримки прийняття рішень щодо купівлі-продажу електричної енергії компанією-постачальником.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ключка О. І. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Комп'ютерні науки.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям комп'ютерні науки. Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Ключка О.І. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів. Дисертаційна робота написана українською мовою. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів, списку використаних джерел, що містить 94 найменування та 5 додатків. Дисертаційна робота має 17 рисунків, 14 таблиць. Загальний обсяг дисертації 180 сторінок, обсяг основного тексту – 162 сторінки.

У вступі наведено розгорнуте обґрунтування актуальності теми дисертації на основі проведеного аналізу наукової літератури. Що дало автору можливість виділити, як основне та актуальне науково-практичне завдання розроблення інтегрованої змішаної моделі підтримки прийняття рішень компанії постачальника, задля вирішення задач оптимізації портфелю обсягів купівлі-продажу електроенергії з урахуванням обмежень на ринку електроенергії України. А також урахування непередбачуваних змін в короткострокових прогнозах споживання електроенергії через вплив військових дій на енергосистему. Сформульовано мету, завдання та задачі дослідження. Визначено об'єкт та предмет дослідження. Наведено опис застосованих методів дослідження, обґрунтовано їх вибір. Викладено основні положення теоретичної наукової новизни отриманих результатів та їх практичного значення.

У першому розділі досліджено особливості функціонування ринку електричної енергії у країнах Європейського Союзу та України, а саме його структури, механізмів ціноутворення у контексті висвітлення ролі електропостачальника на ньому. Визначено особливу роль компанії-постачальника, як комерційного суб'єкта ринку. У розділі обґрунтовано, що

постачальник є центральною ланкою, яка поєднує оптовий та роздрібний сегменти ринку. Він виступає покупцем електроенергії на різних оптових сегментах ринку та продавцем для кінцевих споживачів.

Окремо підкреслено, що діяльність постачальника нерозривно пов'язана зі значними невизначеностями, насамперед із прогнозуванням споживання. Похибки прогнозу призводять до небалансів, які врегульовуються на балансуєчому ринку за цінами, що можуть істотно відрізнятися від цін ринку на добу наперед, генеруючи додаткові витрати. В умовах війни додається принципово новий тип невизначеності: аварійні відключення внаслідок ракетних ударів, руйнування генерації й мереж, тривалі стабілізаційні графіки обмежень. Це робить традиційні підходи до прогнозування недостатніми. А ризик небалансів – критичним для фінансової стійкості постачальника.

У другому розділі проведено аналіз сучасних методів прогнозування електроспоживання, включаючи статистичні методи, моделі машинного навчання та глибинні нейронні мережі та їх класи. Його призначення у дисертаційній роботі визначається необхідністю обґрунтування вибору методу дослідження поставленого завдання. У результаті огляду досить великої кількості робіт автор дійшов висновку, що жоден із розглянутих класів моделей не забезпечує самостійно повного циклу підтримки прийняття рішень постачальником – від формування погодинного прогнозу споживання його портфеля до оптимізації закупівель на різних сегментах ринку з урахуванням ризиків, регуляторних вимог та поведінкових особливостей клієнтів.

Поєднання у її структурі модулів прогнозування, кластеризації та оптимізації дозволяє подолати виявлену фрагментарність існуючих підходів, забезпечити більш точний та робастний прогноз, трансформувати його у конкретні рішення щодо закупівель і управління ризиками та, зрештою, підвищити ефективність і стійкість діяльності постачальника в умовах волатильного та ризикованого ринку електроенергії.

Таким чином постає об'єктивна потреба у розробленні інтегрованої змішаної моделі підтримки прийняття рішень, орієнтованої саме на підтримку оперативних і тактичних рішень енергопостачальної компанії. Така модель має поєднувати модулі короткострокового прогнозування погодинних обсягів споживання електроенергії, а також оптимізаційний блок для формування портфеля закупівель на сегментах ринку двосторонніх договорів (РДД), ринком «на добу наперед» (РДН), внутрішньодобовим ринком (ВДР), і балансуєчого ринку. Врахування особливостей української моделі ринку електроенергії, механізмів небалансів і додаткових ризиків воєнного часу є критично важливим елементом такої системи.

Саме в цьому контексті обґрунтовується доцільність створення змішаної моделі Energy AI, як інтегрованого інструменту підтримки прийняття рішень

для компанії-постачальника. Поєднання у її структурі модулів прогнозування, кластеризації та оптимізації дозволяє подолати виявлену фрагментарність існуючих підходів, забезпечити більш точний та робастний прогноз та трансформувати його у конкретні рішення щодо закупівель. Зрештою, зменшити вплив ризиків, підвищити ефективність і стійкість діяльності постачальника в умовах волатильного та ризикованого ринку електроенергії.

У третьому розділі представлені основні теоретичні результати дисертації, відповідно до мети та задач дослідження, щодо розроблення інтегрованої моделі системи підтримки прийняття рішень постачальником електричної енергії у складі моделі прогнозування електроспоживання та оптимізаційну моделі формування портфеля обсягів купівлі-продажу електроенергії в умовах високої невизначеності та структурних збурень, зумовлених повномасштабною війною в Україні. Модель також містить, суттєві для отримання достовірних результатів, компоненти підготовки масивів вихідних даних задля вирішення задач прогнозування обсягів споживання, оптимального формування портфеля обсягів купівлі-продажу електроенергії з урахуванням впливу наявних обмежень обумовлених високою невизначеністю та структурних збурень функціонування енергосистеми та ринку електроенергії. В тому числі режимів вимушеного відключення навантаження, на формування необхідних обсягів електропостачання. В цілому реалізовано інтеграцію трьох основних взаємопов'язаних компонентів. А саме моделі короткострокового погодинного прогнозування споживання, оптимізаційної моделі формування портфеля закупівель на основних сегментах оптового ринку, механізмів урахування впливу режимів вимушеного відключення навантаження.

Прогностична модель побудована на основі алгоритму Random Forest. Вона забезпечує короткостроковий погодинний прогноз сукупного навантаження портфеля споживачів постачальника за умов обмеженої доступності до даних комерційного обліку. У моделі запроваджено LS-фактор як агрегований показник, що описує вплив воєнних атак на енергетичну інфраструктуру, аварійних і стабілізаційних відключень споживачів на профілі навантаження задля формалізації режиму вимушеного розвантаження.

Оптимізаційна модель ринкової поведінки постачальника, сформульована у вигляді задачі лінійного програмування. На основі прогнозованого погодинного споживання, скоригованого з урахуванням LS-фактора, визначається раціональний розподіл обсягів закупівель між РДД, РДН, ВДР та балансуючим ринками. У моделі враховано цінові параметри, технічні та регуляторні обмеження, а також механізм відповідальності за небаланси. Така модель системи управління компанією-постачальником дає можливість безпосередньо поєднати результати прогнозування з процесом прийняття

рішень щодо портфеля закупівель і мінімізувати сукупні витрати постачальника за заданих умов ринку.

Суттєвим результатом є не лише окремі моделі прогнозування чи оптимізації, а саме їх інтеграція в рамках єдиної системи інформаційно-методичного забезпечення системи підтримки прийняття рішень щодо формування портфелю обсягів купівлі-продажу електроенергії, яка відображає специфіку українського ринку електроенергії в умовах воєнних дій. Інформаційно-методичне забезпечення покладено в основу розроблення програмного комплексу Energy AI.

У четвертому розділі наведено опис програмної системи Energy AI, яка реалізує запропоновані методи прогнозування та оптимізації портфеля купівлі-продажу електроенергії. Представлено результати розрахунково-експериментальних досліджень, що підтверджують спроможність запропонованих автором засобів математичного та інформаційно-технологічного забезпечення розв'язувати складні задачі підтримки прийняття рішень компанією-постачальником щодо купівлі-продажу електричної енергії з прийнятною для практики точністю прогнозування та вимогам мінімізації витрат. Що дозволяє постачальникам електроенергії досягти кращих фінансових результатів.

Підтвердження цього висновку служить наведений приклад розрахунку в рамках проведеного дослідження згідно з яким, використання програмному комплексу моделювання Energy AI дало змогу зменшити витрати постачальника на закупівлю електроенергії майже на 5 млн грн за місяць ($\approx 5\%$) порівняно з базовою стратегією закупівель, а також значно скоротити обсяги небалансів при участі компанії на спотовому ринку.

В цілому результати експериментів, проведених на фактичних даних українського енергоринку, підтверджують адекватність запропонованих моделей, надійність розроблених алгоритмів короткострокового прогнозування погодинних графіків попиту на електроенергію, адекватність.

Дисертація є цілісною завершеною науковою працею, яка демонструє належний рівень самостійності та компетентності автора в обраному напрямку досліджень.

Мова та стиль. Робота виконана українською мовою. Матеріал дисертації подано чітко, науковою мовою з дотриманням точності формулювань.

Оформлення дисертації. Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи. Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір. Також результати дисертації були апробовані на 6 наукових фахових конференціях. Основні наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Дисертаційна робота має чітку структуру і логіку викладення матеріалу. У кожному розділі простежується логічний зв'язок із попереднім. Простежується логічна взаємопов'язаність теоретичних та практичних результатів дослідження. Поставлене автором наукове завдання реалізовано повністю, здобувач показав високий рівень володіння інструментами наукової роботи. Дисертація доведена до завершеного вигляду і подана з дотриманням норм академічної доброчесності. Зміст роботи узгоджується зі Стандартом вищої освіти за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» та цілями освітньо-наукової програми підготовки фахівців відповідного рівня.

Дисертація є оригінальним дослідженням з комп'ютерного моделювання та прогнозування. Аналіз звіту про перевірку дисертації на текстові запозичення підтвердив, що дисертаційна робота виконана самостійно (плагиату чи фабрикації не виявлено).

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Наведені в таблиці 11 параметри допускають досить глибоке розгалуження дерев, а з опису в підрозділі 4.1 випливає, що процедура порівняння версій моделі (`compare_and_save_if_better`) виконує оцінювання на останніх 1000 спостереженнях навчального набору. Бажано було б пояснити, як за таких умов забезпечується коректна оцінка узагальнювальної здатності моделі, та зазначити, чи розглядалося використання вбудованої в Random Forest out-of-bag-оцінки, яка для ансамблевих методів є природним інструментом контролю перенавчання.

2. У другому розділі ґрунтовно проаналізовано моделі ARIMA/ARIMAX, методи градієнтного бустингу та глибинні нейронні мережі, а вибір ансамблевого методу Random Forest обґрунтовано за результатами цього аналізу. Водночас у розділі 4 наведено метрики якості лише для однієї моделі. Порівняння з наївним (сезонним) прогнозом та однією-двома альтернативними моделями на тому самому наборі даних дало б змогу підкріпити зроблений вибір власними кількісними результатами.

3. Алгоритм Random Forest забезпечує вбудовану оцінку важливості ознак, і відповідне співвідношення (5) наведено у підрозділі 3.1, а в програмній

реалізації передбачено функцію журналювання цих оцінок. Проте в четвертому розділі результати ранжування ознак не наведено. Їх включення було б доречним, оскільки саме кількісна оцінка внеску компонент LS-фактора порівняно з календарними та метеорологічними змінними стала б прямим підтвердженням доцільності введення цього фактора до вектора ознак.

4. Load-shedding-фактор є одним із ключових власних результатів здобувача, проте в тексті він послідовно позначається англomовним скороченням (LS-фактор, load-shedding-фактор), а його компоненти в таблицях 4 і 9 подано лише англomовними ідентифікаторами (blackout, phases, deenergized). Хоча у переліку умовних позначень наведено переклад «фактор обмеження електропостачання», у самому викладі українomовний термін практично не вживається. Бажано було б запровадити й послідовно використовувати українську назву фактора та українomовні позначення його складових, залишивши англomовні відповідники в дужках — це відповідало б вимогам до термінології кваліфікаційних наукових праць і полегшило б сприйняття результату українськомовним читачем.

5. Обчислювальний експеримент виконано для портфеля споживачів, площадки яких віднесено до групи «Б», тобто не обладнаних системами погодинного комерційного обліку. Такий вибір цілком обґрунтований, оскільки саме для цієї групи задача прогнозування є найскладнішою. Проте бажано було б прокоментувати, наскільки запропонований підхід переноситься на портфелі з іншою структурою — зокрема на споживачів групи «А» з наявними погодинними даними обліку або на змішані портфелі, де частина навантаження відома фактично, а частина потребує прогнозування.

6. Обмін даними між прогнозним і оптимізаційним контурами реалізовано через уніфіковані Excel-файли, а взаємодія з користувачем — через інтерфейс командного рядка, що є цілком прийнятним для дослідницького прототипу. Разом з тим, з огляду на перспективу промислового застосування системи в умовах жорстких часових меж подання заявок, доцільно було б навести орієнтовні оцінки тривалості повного обчислювального циклу та масштабованості оптимізаційної задачі при зростанні кількості продуктів РДД, а також окреслити підходи до інтеграції комплексу з обліковими системами постачальника.

7. У тексті трапляються поодинокі технічні неточності оформлення та наявні окремі описки («електрeнергії», «елoектpоeнергії», «погодиних», «експеремент»). Ці зауваження мають суто редакційний характер і не впливають на розуміння змісту роботи.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

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 високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням. Представлена у дисертації сукупність теоретичних та практичних результатів розв'язує поставлене наукове завдання, та має істотне значення для розвитку Інформаційних технологій на етапе цифровізації енергетичної галузі. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.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 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Рецензент:

головний науковий співробітник відділу
математичного та економетричного
моделювання Інституту проблем
моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова
НАН України, д.т.н., с.н.с.



Зелімхан БОРУКАЄВ