

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **Лебедєва Данила Миколайовича**
**«Узагальнені алгоритми розв’язання нечітких двоетапних задач
оптимального розміщення-розбиття»,**
подану на здобуття ступеня доктора філософії за
спеціальністю 113 «Прикладна математика»

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційну роботу присвячено обґрунтуванню та розробці узагальнених алгоритмів розв’язання нечітких двоетапних задач оптимального розміщення-розбиття, що належать до класу транспортно-логістичних задач, які зводяться до задач теорії оптимального розбиття множин (ОРМ). Теорія ОРМ є сучасним апаратом розв’язання задач нескінченновимірної оптимізації.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю мінімізації витрат на транспортування ресурсів у складних системах із проміжними пунктами, обмеженою кількістю ресурсів та необхідністю розбиття території на зони. Врахування нечітких вхідних (наприклад, у формі лінгвістичних змінних) або вихідних даних дає змогу адекватно моделювати стохастичні та невизначені процеси, підвищуючи прикладну цінність чисельних розв’язків порівняно з детермінованими моделями. Сформульовані узагальнені алгоритми у вигляді псевдокоду спрощують подальше створення програмного продукту, а фінальна програмна реалізація дозволяє гнучко адаптувати параметри моделі під конкретні прикладні задачі.

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів.

Достовірність викладених у роботі результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату теорії оптимального розбиття множин (ОРМ) та надійних числових методів, зокрема r -алгоритму Шора недиференційовної оптимізації та методу потенціалів для збалансованих транспортних задач. Теоретичні положення, алгоритми та математичні моделі мають строге наукове обґрунтування, що включає введені означення, формалізовані постановки задач, доведення теорем та виведення

розрахункових формул. Посилання на допоміжні результати супроводжуються посиланнями на відповідні джерела. Коректність розроблених узагальнених алгоритмів підтверджено практично – за допомогою програмної реалізації та розв’язання модельних задач, що варіюються від простих та інтуїтивно зрозумілих до складних з нетривіальними вхідними даними. Отримані чисельні та графічні результати повністю збігаються з теоретично передбаченими.

Аналіз структури та змісту дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, основної частини з шістьма розділами, висновків, списку використаних джерел зі 128 найменуваннями та двох додатків. Загальний обсяг дисертації – 150 сторінок, обсяг основного тексту – 117 сторінок. Робота містить 23 рисунка та 1 таблицю.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету, об’єкт і предмет дослідження, зазначено зв’язок із науковими програмами. Наведено дані про наукову новизну та практичне значення результатів. Наведено інформацію про публікації, у яких висвітлено основні результати дисертаційної роботи, для кожної публікації зазначено особистий внесок здобувача та категорію фахового видання. Також наведені публікації, що підтверджують належну апробацію роботи.

Перший розділ присвячено обґрунтуванню та деталізації обраного напрямку роботи. Описано три загальних види транспортних задач, описаний зв’язок теорії ОРМ з неперервно-дискретними транспортними задачами, наведено узагальнене математичне формулювання задачі ОРМ. Детально описана класифікація задач ОРМ за їх властивостями, наведено посилання на роботи, у яких розглянуто відповідні категорії задач ОРМ. Окремо наведено список робіт, що присвячені розв’язанню задач прикладного характеру, що зводяться до задач теорії ОРМ. Окремий підрозділ присвячено розгляду задач ОРМ в умовах невизначеності – наведено базові визначення, наведено список робіт, що розглядають даний тип задач і зазначено, що кількість публікацій з

цього напрямку є невеликою. Розділ завершується підтвердженням актуальності обраної теми роботи на основі вищевикладеного оглядового дослідження.

У другому розділі викладено матеріали, що стосуються розробки узагальненого алгоритму розв'язання двоетапної чіткої задачі оптимального розміщення-розбиття з фіксованими центрами підмножин. Двоетапна задача формалізується у вигляді математичної моделі нескінченновимірної задачі оптимізації з обмеженнями, у термінах множин та у термінах характеристичних функцій. Для змінних та функцій, використаних у математичній моделі, наведено їх можливий прикладний зміст у задачах. Описано перехід від задачі умовної оптимізації до задачі безумовної оптимізації за допомогою метода множників Лагранжа, виведено узагальнені формули градієнту функціонала Лагранжа. Сформульовано узагальнений алгоритм розв'язання задачі у вигляді псевдокоду.

Для демонстрації коректності алгоритму та нюансів його роботи наведено приклади розв'язання модельних задач. Розв'язано чотири модельних задачі, для кожної задачі описано вхідні дані та параметри роботи алгоритму. Результати роботи алгоритму представлені у числовому та графічному вигляді та супроводжуються аналізом особливостей роботи алгоритму. Теоретична та практична сторони опису узагальненого алгоритму виконані у повному обсязі.

У третьому розділі викладено матеріали, що стосуються розробки узагальненого алгоритму розв'язання двоетапної чіткої задачі оптимального розміщення-розбиття з відшукуванням координат розміщення центрів підмножин. У розділі використано теоретичні та практичні напрацювання, викладені у першому розділі. Двоетапна задача формалізується у вигляді математичної моделі задачі оптимізації з обмеженнями, виконано формулювання у термінах множин та у термінах характеристичних функцій. Викладено перехід від задачі умовної оптимізації до задачі безумовної оптимізації, виведено формули градієнтів функціонала Лагранжа.

Узагальнений алгоритм розв'язання розбито на дві частини – алгоритм розв'язання зовнішньої та внутрішньої задач ОРМ.

Для демонстрації коректності алгоритму та нюансів його роботи наведено приклади розв'язання модельних задач. Розв'язано п'ять модельних задач, для кожної задачі описано вхідні дані та параметри роботи алгоритму. Результати роботи алгоритму представлені у числовому та графічному вигляді, забезпечені детальним аналізом особливостей роботи алгоритму. Таким чином, теоретична та практична сторони опису узагальненого алгоритму виконані у повному обсязі.

Четвертий розділ присвячено узагальненому алгоритму розв'язання двоетапної нечіткої задачі ОРМ із нечітко заданою функцією щільності. У постановці задачі розглядається функція щільності, що задана за допомогою лінгвістичних змінних. Для відновлення функції щільності запропоновано метод нейронечіткої ідентифікації, що включає операції з нечіткими множинами, роботу з лінгвістичними змінними та методи штучного інтелекту. Працездатність алгоритму підтверджено на модельній задачі з порівнянням чисельних та графічних результатів для функції щільності, заданій у трьох різних виглядах: аналітичному, а також відновленому до та після налаштування моделі.

У п'ятому розділі викладено процес розв'язання нечіткої двоетапної задачі оптимального розміщення-розбиття. Математична модель задачі сформульована спочатку у термінах нечітких множин, а далі у термінах функцій належності. Задача формалізується як задача нескінченновимірної оптимізації з обмеженнями. Викладено доведення теореми про існування та єдиність розв'язку задачі, доведення виконано у повному обсязі. Задачу умовної оптимізації перетворено у задачу безумовної оптимізації за допомогою метода множників Лагранжа, для її розв'язання запропоновано використання r -алгоритму Шора недиференційовної оптимізації. Описано теоретичний метод розв'язання задачі, на його основі сформульовано узагальнений алгоритм розв'язання.

Для демонстрації роботи алгоритму створено його програмну реалізацію та розв'язано ряд модельних задач. Кожен приклад має детально описані вхідні дані та параметри роботи алгоритму, результати розв'язку наведено у числовому та графічному вигляді, та супроводжуються детальним аналізом.

Шостий розділ присвячено практичній реалізації розроблених узагальнених алгоритмів у вигляді комплексного програмного продукту. Наведено список програмних бібліотек та обґрунтовано їх вибір з фокусом на надійність, дозвілну ліцензію використання, підтримку основних платформ виконання. Обґрунтовано доцільність використання паралельних обчислень під час виконання алгоритмів та прискорення обчислень за допомогою виконання їх на графічному прискорювачі комп'ютера. Висвітлено модульну структуру системи, яка забезпечує її потенційний подальший розвиток. Для створеного програмного продукту задокументовано список параметрів інтерфейсу програмного рядка, основні елементи управління графічного інтерфейсу користувача, формат файлу конфігурації, що містить вхідні дані задачі. Розроблений програмний продукт є зручним, гнучким, високоефективним та має потенціал до подальшого розширення та ускладнення.

У висновках систематизовано ключові наукові здобутки та практичні результати роботи.

Наукова новизна результатів дисертації.

Головні наукові результати дисертаційної роботи:

- *вперше* розроблено та обґрунтовано метод розв'язання нечіткої двоетапної задачі оптимального розміщення-розбиття з фіксованими центрами;
- *вперше* розроблено та обґрунтовано метод розв'язання задачі оптимального розміщення-розбиття з нейронечітким відновленням нечіткої функції щільності споживання з розміщенням центрів першого етапу.

У тому числі, *подальшого розвитку* дістали:

- метод розв'язання двоетапної чіткої задачі оптимального розміщення-розбиття з фіксованими центрами підмножин;
- метод розв'язання двоетапної чіткої задачі оптимального розміщення-розбиття з оптимальним розміщенням центрів підмножин.

З практичного боку наукових результатів слід виділити наступне:

- *узагальнено* запропоновані алгоритми введенням адитивного та мультиплікативного коефіцієнтів для центрів першого етапу, нерівномірної функції щільності споживання, окремих функцій вартості транспортування на першому та другому етапах, та обмеженнями у вигляді рівностей на кількість наявної продукції у центрах постачання;
- *розроблено* програмне забезпечення, що реалізує запропоновані узагальнені алгоритми та дозволяє задавати адитивні та мультиплікативні коефіцієнти центрів першого етапу, нерівномірну функцію щільності споживання, коефіцієнт здешевлення транспортування на другому етапі, та обмеження на наявну кількість товарів у центрах постачання; розроблено програмне забезпечення, що виконує побудову оптимального розбиття з використанням паралельних обчислень на відеокарті з метою прискорення обчислень;
- *розв'язано* ряд модельних задач з метою демонстрації роботи кожного з розроблених узагальнених алгоритмів.

Практичне значення наукових результатів дисертації.

Основні результати, що виносяться на захист, мають таке практичне значення:

1. *Алгоритмічне забезпечення*: розроблені узагальнені алгоритми дають змогу розв'язувати двоетапні неперервно-дискретні транспортні задачі. Це забезпечує більш адекватне моделювання процесів оптимальної організації діяльності в ключових галузях (виробництво, енергетика, медицина, служби екстреного реагування тощо).

2. *Програмна реалізація*: створений програмний продукт готовий до практичного застосування під час розв'язання прикладних задач на основі запропонованих у роботі моделей та алгоритмів.
3. *Впровадження в освітній процес*: отримані результати рекомендовано для використання у навчальному процесі під час підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальностями «Системний аналіз та наука про дані» і «Прикладна математика».

Повнота викладення результатів в опублікованих працях.

Результати наукових досліджень, які виносяться автором на захист, опубліковані у 5 наукових статтях: 3 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б» з фізико-математичних наук та 2 статті у міжнародних фахових виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus (у тому числі 1 стаття у журналі квартиля Q2). Зазначені публікації повною мірою відображають основні результати дисертації й відповідають чинним нормам.

Апробація наукових результатів дисертації.

Наукові результати дисертаційної роботи отримали достатній рівень апробації на трьох міжнародних науково-практичних конференціях.

Зауваження щодо змісту дисертації.

1. У розділі 1.3 при описі існуючих наукових публікацій прикладного характеру для робіт наведено прикладні галузі, яких вони стосуються, але не зазначено відповідну класифікацію за категоріями задач ОРМ з рисунку 1.1. Така інформація спростила б подальший аналіз і дала змогу визначити зв'язок категорій задач теорії ОРМ, з галузями, у яких вони зазвичай застосовуються.
2. При описі деяких прикладів і рисунків використано одне і те саме позначення « K » для опису різних величин, що може призвести до неправильного сприйняття викладеного матеріалу. У розділі 2.3 за допомогою K позначається кількість ітерацій алгоритму Шора, а у

розділі 3.3 символ K використовується для позначення коефіцієнту здешевлення транспортування на другому етапі.

3. Опису деяких вхідних параметрів алгоритмів у прикладах розв'язання модельних задач бракує систематичності. У розділах 2.3 та 3.3 відсутній опис параметрів r -алгоритму Шора, у той час як у розділах 4.4 та 5.3 цей опис присутній. При описі результатів розв'язання прикладів у розділах 2.3, 4.4 та прикладу 5.4 у розділі 5.3, наведена виконана кількість ітерацій r -алгоритму Шора, у той час як у розділах 3.3 та 5.3 цієї інформації не наведено.
4. У розділі 3.2 при описі алгоритму 3.1 вказано неправильні номери деяких формул, слід замінити: у пункті 3 «за формулами (3.2)» на «за формулами (3.14)», у пункті 10 «за формулами (3.19)» на «за формулами (3.12)».
5. У розділі 3.2 при описі алгоритму 3.2, у пунктах 3, 4 та 9, помилково використано позначення « λ^* » замість « λ_* ».

Дані зауваження є незначними та не впливають на обґрунтованість та достовірність отриманих результатів, їх наукову новизну та практичне значення.

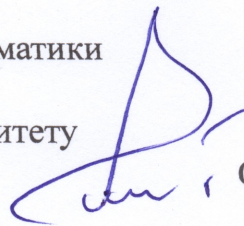
Висновок рецензента про дисертаційну роботу.

Подана до захисту дисертаційна робота Лебедева Д. М. на тему «Узагальнені алгоритми розв'язання нечітких двоетапних задач оптимального розміщення-розбиття» є завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому рівні, що демонструє професійність здобувача як науковця, математика та програміста. Матеріал викладено структуровано та послідовно, всі твердження містять обґрунтування або посилання на відповідні джерела. Тема дисертації розкрита у повній мірі – формалізація нечітких двоетапних задач, формулювання теоретичного методу розв'язання, розробка узагальненого алгоритму для подальшої програмної реалізації, демонстрація розв'язків та аналізу модельних задач.

Враховуючи актуальність теми роботи та якість проведеного наукового дослідження, вважаю, що подана до захисту дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам згідно з наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор Лебедев Данило Миколайович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Рецензент

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри обчислювальної математики
та математичної кібернетики
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара



Олександр КУЗЕНКОВ

Підпис доцента Кузенкова О. О.
засвідчую.

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара
канд. біол. наук, професор



Олег МАРЕНКОВ