

ВІДГУК

офіційного опонента Скоба Юрія Олексійовича
на дисертаційну роботу **Кузенкова Олександра Олександровича**
«Динамічні задачі оптимального розбиття множин: математичні моделі,
методи, алгоритми, практичне застосування», подану на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 –
математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дисертаційної роботи визначається необхідністю розв'язання широкого спектра прикладних задач, що виникають у різних галузях економіки, техніки та управління і зводяться до задач оптимального розбиття множин. Такі задачі лежать в основі процесів класифікації, кластеризації, розміщення об'єктів, маршрутизації, покриття територій, розподілу ресурсів та оптимального керування. Залежно від характеру об'єктів дослідження, вони можуть розглядатися як дискретні або неперервні, причому останні мають особливе значення для моделювання систем, у яких об'єкти розподілені неперервно в просторі, зокрема у транспортних задачах та задачах розміщення виробництв.

Практична значущість таких задач зумовлює різноманітність їх постановок, що відрізняються складністю, типом математичних залежностей, кількістю продуктів (одно- або багатопродуктових постановках), наявністю невизначеності, а також особливостями розміщення центрів обслуговування. Це, у свою чергу, вимагає розробки ефективних методів розв'язання, здатних забезпечити точні та обґрунтовані результати. Сучасні чисельні методи демонструють високу адекватність під час моделювання таких процесів і дозволяють отримувати оптимальні рішення з кращими значеннями цільових функціоналів порівняно з евристичними підходами.

Водночас у реальних умовах функціонування систем важливу роль відіграє динаміка параметрів, таких як вартість перевезень, виробничі потужності або економічні показники. Більшість існуючих досліджень орієнтована на статичні моделі або трактує динамічність лише як керованість процесів. Проте практичні задачі вимагають урахування саме змін параметрів у часі. Це обумовлює актуальність дослідження динамічних задач оптимального розбиття множин, у яких оптимальне рішення залежить від розвитку системи у часі та її фазової траєкторії.

Дисертаційне дослідження виконувалось відповідно до планів наукових досліджень науково-дослідної лабораторії оптимізації складних систем кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара у межах таких держбюджетних тем: «Математичні моделі і методи оптимізації складних систем на основі нелінійної теорії оптимального розбиття множин» (№ держреєстрації 0112U000193, 2012–2014 рр.), «Математичні моделі та алгоритми розв'язання неперервних задач покриття на основі теорії оптимального розбиття множин» (№ держреєстрації 0115U002392, 2015–2017 рр.), «Розробка математичних моделей та алгоритмів розв'язання прикладних задач класифікації, кластеризації на основі теорії оптимального розбиття множин» (№ держреєстрації 0119U100600, 2019–2021 рр.), а також у рамках наукових тем «Математичні моделі, методи та алгоритми аналізу складних систем» (№ держреєстрації 0113U003558, 2013–2015 рр.), «Теоретичні основи математичних моделей та методів дослідження складних систем» (№ держреєстрації 0116U002214, 2016–2018 рр.), «Математичні моделі, методи та алгоритми розв'язання задач аналізу складних систем» (№ держреєстрації 0119U101302, 2019–2021 рр.) при кафедрі обчислювальної математики та математичної кібернетики відповідно до тематичних планів науково-дослідних робіт Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у докторській дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на коректних математичних постановках задач, використанні суворих математичних методів і підходів, що відповідають сучасному рівню розвитку математичного моделювання та оптимізації. У роботі коректно застосовано апарат теорії оптимального розбиття множин, методи негладкої оптимізації, а також інструментарій якісної теорії диференціальних рівнянь, що дозволило отримати теоретично виважені результати. Достовірність результатів підтверджується логічною послідовністю викладення матеріалу, узгодженістю математичних моделей, методів і алгоритмів їх розв'язання. Важливим підтвердженням є проведені чисельні експерименти, результати яких демонструють адекватність запропонованих підходів і їх відповідність реальним процесам. Отримані результати не суперечать відомим науковим

положенням та мають практичне підтвердження через реалізацію у прикладних задачах різного спрямування.

Короткий аналіз змісту дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 200 найменувань, та чотирьох додатків.

У *вступі* дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дослідження, яка зумовлена широким спектром прикладних задач, що зводяться до задач оптимального розбиття множин, зокрема в умовах динамічної зміни параметрів. Показано, що класичні підходи до розв'язання таких задач переважно базуються на статичних постановках, тоді як реальні процеси характеризуються часовою мінливістю параметрів, що обумовлює необхідність розробки нових математичних моделей та методів.

Визначено мету роботи, яка полягає у створенні теоретичних засад, математичних моделей, методів та алгоритмів розв'язання динамічних задач оптимального розбиття множин у різних постановках. Сформульовано основні завдання дослідження, що охоплюють як розробку нових моделей, так і їх алгоритмічну реалізацію та прикладне застосування. Визначено об'єкт і предмет дослідження, а також наведено методи, що використовуються, зокрема методи теорії оптимального розбиття множин, якісної теорії диференціальних рівнянь та недиференційованої оптимізації.

Окреслено наукову новизну отриманих результатів та практичне значення роботи, що підтверджується впровадженням результатів у різних галузях. Наведено відомості про апробацію результатів, публікації та структуру дисертації.

У *першому розділі* дисертаційної роботи здійснено глибокий аналіз сучасного стану досліджень у галузі теорії оптимального розбиття множин та суміжних напрямів математичного програмування. Розглянуто основні підходи до формалізації задач розбиття множин, зокрема в неперервних постановках, а також проведено їх класифікацію за ключовими ознаками, такими як типи змінних, характер обмежень, властивості цільових функціоналів та особливості прикладних інтерпретацій.

Особливу увагу приділено аналізу задач з нечіткими параметрами, що виникають у випадках недостатньої визначеності вхідних даних або їх лінгвістичного задання. Розглянуто підходи до моделювання невизначеності, зокрема із застосуванням нечіткої логіки, що дозволяє розширити клас задач, які можуть бути адекватно описані математичними моделями.

Проаналізовано існуючі методи розв'язання задач оптимального розбиття множин, включаючи варіаційні підходи, методи математичного програмування та евристичні алгоритми. Встановлено, що більшість з них орієнтована на статичні постановки задач і не враховує динамічний характер параметрів. Обґрунтовано доцільність переходу до динамічних моделей, у яких параметри системи залежать від часу або фазового стану.

Також розглянуто питання застосування біфуркаційного аналізу для дослідження динамічних систем, що лежать в основі задач оптимального розбиття множин. Визначено основні обмеження існуючих підходів та сформульовано напрямки подальших досліджень, які покладено в основу наступних розділів дисертаційної роботи.

У *другому розділі* дисертаційної роботи розроблено математичні моделі класу динамічних задач оптимального розбиття множин з фіксованими центрами підмножин. Запропоновано формалізацію задачі, в якій враховується часовий характер зміни параметрів, зокрема вартості транспортування, що дозволяє адекватно описувати процеси, характерні для виробничо-транспортних систем.

Побудовано цільовий функціонал, який інтегрує витрати на обслуговування підмножин з урахуванням їх еволюції у часі, а також введено систему диференціальних зв'язків, що описує динаміку параметрів. Такий підхід дозволяє перейти від статичної оптимізації до задач оптимального керування з урахуванням фазових траєкторій системи.

Для розв'язання поставлених задач запропоновано метод, що поєднує ідеї теорії оптимального розбиття множин, якісної теорії диференціальних рівнянь та чисельних методів. Зокрема, здійснено перехід до представлення задачі у термінах характеристичних функцій підмножин, що дозволяє спростити її чисельну реалізацію.

Розроблено алгоритм розв'язання, який включає дискретизацію просторової області та часової змінної, розв'язання систем диференціальних рівнянь у вузлах сітки, а також визначення оптимального розбиття на основі мінімізації функціоналу. Проведено серію чисельних експериментів для різних параметрів моделі, що дозволило встановити закономірності впливу динаміки параметрів на структуру оптимального розбиття та підтвердити ефективність запропонованого підходу.

У *третьому розділі* розглянуто узагальнення попереднього класу задач на випадок, коли координати центрів підмножин не є фіксованими, а

підлягають визначенню в процесі оптимізації. Сформульовано відповідні математичні моделі динамічних задач оптимального розбиття множин, у яких центри виступають додатковими змінними, що істотно ускладнює структуру задачі.

Запропоновано підхід до розв'язання таких задач, який базується на застосуванні методів недиференційованої оптимізації. Зокрема, використано r -алгоритм Н. З. Шора, що дозволяє ефективно працювати з багатоекстремальними цільовими функціями, які не є гладкими. Розроблено процедуру обчислення субградієнтів та алгоритм ітераційного пошуку оптимальних значень координат центрів.

Алгоритмічна реалізація включає побудову дискретної моделі області, розв'язання відповідних систем диференціальних рівнянь та оновлення координат центрів на кожній ітерації. Важливою особливістю є врахування обмежень на допустиму область розміщення центрів.

Проведено чисельні експерименти, результати яких свідчать про підвищення ефективності оптимального розбиття під час врахування можливості зміни координат центрів. Показано, що запропонований підхід дозволяє отримати менші значення цільового функціоналу у порівнянні з випадком фіксованих центрів, що підтверджує доцільність його застосування.

У *четвертому розділі* дисертаційної роботи досліджено клас динамічних задач оптимального розбиття множин в умовах невизначеності, що є характерними для реальних прикладних задач, у яких параметри не можуть бути задані точно. Запропоновано підхід до врахування невизначеності шляхом введення нечітких параметрів у математичні моделі, що дозволяє описувати системи з урахуванням експертних оцінок та неповної інформації.

Розроблено метод нейро-нечіткої ідентифікації параметрів, який базується на поєднанні апарату нечіткої логіки та нейронних мереж. Такий підхід дозволяє формалізувати залежності між вхідними та вихідними параметрами у вигляді системи нечітких правил типу «якщо – то», а також здійснювати їх параметричну адаптацію на основі експериментальних даних. Уведено процедури фазифікації, нечіткого логічного виведення та дефазифікації, що забезпечують побудову адекватної моделі об'єкта.

Сформульовано задачу оптимізації для налаштування параметрів нечіткої моделі, яка розв'язується з використанням методів недиференційованої оптимізації. Розроблено алгоритм розв'язання динамічної задачі оптимального розбиття множин з нечіткими параметрами, який інтегрує

процедури ідентифікації параметрів та класичний алгоритм розв'язання задачі.

Проведено чисельні експерименти, результати яких показали, що після налаштування нечітких параметрів отримані розв'язки з високою точністю узгоджуються з розв'язками задач з чіткими параметрами. Додатково досліджено питання виникнення біфуркацій у відповідних динамічних системах, що дозволило встановити умови стійкості та типи стаціонарних станів.

У *п'ятому розділі* дисертаційної роботи наведено приклад комплексного практичного застосування розроблених математичних моделей і методів у задачах підвищення ефективності реагування на повітряні загрози в умовах воєнного стану. Основна увага зосереджена на розробці системи альтернативного оповіщення, яка забезпечує оперативний збір, обробку та відображення інформації про повітряні цілі в режимі реального часу.

Здійснено аналіз предметної області та існуючих рішень, що дозволило виявити їх обмеження та визначити вимоги до розроблюваної системи. Сформульовано предметну постановку задачі, яка враховує специфіку функціонування систем протиповітряної оборони, обмеження на безпеку та передачу даних, а також необхідність оперативного прийняття рішень.

У межах математичної формалізації задачі використано апарат теорії оптимального розбиття множин для опису задачі розподілу території на зони відповідальності. Розроблено модель динамічного розміщення мобільних вогневих груп, яка дозволяє враховувати зміну обстановки, напрямків загроз та інших факторів. Запропонований підхід забезпечує адаптивність системи до умов функціонування в реальному середовищі.

Описано архітектуру програмного забезпечення, включаючи клієнтську частину та адміністративну панель, що забезпечують інтерактивну взаємодію користувачів та операторів. Проведено оцінювання ефективності системи, яке підтвердило її здатність працювати в умовах обмежених ресурсів зв'язку та забезпечувати необхідний рівень оперативності та надійності.

У *шостому розділі* розглянуто застосування методів теорії оптимального розбиття множин до задачі побудови оптимальних траєкторій у процесах тривимірного друку. Проведено аналіз сучасних програмних рішень у цій галузі, виявлено їхні основні недоліки, зокрема відсутність урахування геометричної складності об'єктів та оптимізації траєкторій руху друкарської голівки.

Сформульовано предметну та математичну постановки задачі побудови оптимальної траєкторії друку, у яких об'єкт представлено у вигляді триангуляційної моделі. Запропоновано підхід до декомпозиції об'єкта по координатним рівням та виділення окремих зон друку, що дозволяє застосувати методи оптимального розбиття множин для визначення їх структури.

Розроблено алгоритм побудови оптимальної траєкторії, який включає визначення контурів, ідентифікацію центрів зон друку, вибір початкових точок та формування послідовності переміщень. Для реалізації алгоритму використано елементи теорії клітинних автоматів, зокрема околиці Мура та Неймана, що забезпечує ефективну обробку дискретних структур.

Результати чисельних експериментів продемонстрували ефективність запропонованого підходу під час друку як простих, так і складних об'єктів. Показано, що оптимізація траєкторій дозволяє зменшити час друку та підвищити якість виготовлених виробів.

У *сьомому розділі* дисертаційної роботи запропоновано нові математичні моделі для прогнозування поширення інфекційних захворювань, зокрема COVID-19, із використанням підходів математичного моделювання складних динамічних систем. Проведено аналіз існуючих моделей, які застосовуються для опису епідемічних процесів, та визначено їхні обмеження, пов'язані з недостатнім урахуванням просторової неоднорідності та динаміки параметрів.

Розроблено дві компартментальні моделі, які дозволяють враховувати розподіл населення за різними групами та динаміку переходів між ними. Особливістю запропонованих моделей є інтеграція з підходами теорії оптимального розбиття множин, що дозволяє враховувати просторову структуру регіонів та оптимізувати розподіл ресурсів.

Проведено чисельне моделювання процесів поширення інфекції на прикладі окремих регіонів України, що характеризуються значною чисельністю населення та складною територіальною структурою. Отримано прогнозні сценарії розвитку епідемічної ситуації, які дозволяють оцінити ефективність різних управлінських рішень.

Результати ретроспективного аналізу підтвердили адекватність запропонованих моделей та їх практичну значущість для задач прогнозування та управління епідемічними процесами. Запропоновані підходи можуть бути використані для розробки систем підтримки прийняття рішень у сфері охорони здоров'я.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку теорії оптимального розбиття множин у частині динамічних постановок задач, розробці нових методів та алгоритмів розв'язання таких задач та застосуванні розроблених методів та алгоритмів для розв'язання важливого класу прикладних задач. З моєї точки зору, найбільш суттєвими науковими результатами дисертаційної роботи є наступні:

- у роботі вперше узагальнено класифікацію динамічних задач оптимального розбиття множин залежно від типів параметрів, що дозволило систематизувати підходи до їх постановки та чіткіше визначити особливості різних класів таких задач;

- автором вперше запропоновано методологію розв'язання неперервних динамічних задач оптимального розбиття множин, що дозволило сформулювати цілісний підхід до дослідження задач даного класу та забезпечити можливість їх розв'язання з урахуванням складної динамічної природи параметрів;

- у дисертаційній роботі вперше розроблено методи розв'язання динамічних задач оптимального розбиття множин з відшукуванням координат центрів підмножин із застосуванням r -алгоритму Н. З. Шора, що дозволило коректно врахувати негладкий характер цільових функціоналів, а також забезпечити ефективну реалізацію процедур оптимізації в умовах багатоекстремальності задач даного класу;

- у роботі вперше розроблено метод нейро-нечіткої ідентифікації параметрів у динамічних задачах оптимального розбиття множин в умовах невизначеності, що дозволило поєднати можливості нечіткої логіки та нейромережових підходів для формалізації та налаштування параметрів моделей, а також забезпечити підвищення адекватності їх опису під час роботи з неповною та неточною інформацією;

- набули подальшого розвитку математичні моделі задач оптимального розбиття множин, що дозволило врахувати часову змінність параметрів системи та забезпечити більш адекватне відображення динамічних процесів, характерних для реальних прикладних задач;

- у дисертаційній роботі дістали подальший розвиток методи розв'язання динамічних задач оптимального розбиття множин, що базуються на побудові відповідних чисельних схем із урахуванням аналізу якісних характеристик систем диференціальних рівнянь, що дозволило підвищити обґрунтованість отриманих результатів та забезпечити коректність їх чисельної реалізації;

- автором удосконалено математичні моделі динамічних задач оптимального розбиття множин в умовах невизначеності на основі поєднання апарату теорії оптимального розбиття множин і методів нечіткої логіки, що дозволило підвищити гнучкість моделей та забезпечити їх придатність до опису систем із неповною та неточною інформацією;

- удосконалено підходи до математичного моделювання оптимізаційних задач динамічного розбиття множин шляхом формулювання нових постановок прикладних задач за умов параметричної невизначеності, що дозволило розширити область застосування відповідного математичного апарату та забезпечити більш адекватне відображення процесів у складних системах із невизначеними характеристиками.

Практичне та теоретичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи визначається їх спрямованістю як на розвиток теоретичних засад теорії оптимального розбиття множин, так і на розв'язання актуальних прикладних задач оптимізації. Теоретичне значення полягає у розвитку математичних моделей динамічних задач оптимального розбиття множин, зокрема з урахуванням змінності параметрів у часі та умов невизначеності, а також у розробці нових методів і алгоритмів їх розв'язання, що мають належне математичне обґрунтування та розширюють можливості застосування відповідного наукового апарату.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці ефективних методів і алгоритмів розв'язання динамічних задач оптимального розбиття множин та їх реалізації у вигляді програмних комплексів. Розроблені програмні засоби застосовані для розв'язання прикладних оптимізаційних задач, що у формалізованому вигляді зводяться до неперервних задач оптимального розбиття множин. Зокрема, результати використано під час зонування територій з метою забезпечення доступу до медичних установ в умовах поширення інфекцій, що підтверджується відповідними довідками органів державної влади; під час побудови оптимальних траєкторій у процесах тривимірного друку, що підтверджено впровадженням на ТОВ «Скайрора» (Skygora UA); під час оцінювання ефективності розміщення центрів гірничого обладнання до місць видобутку корисних копалин, що підтверджується актом впровадження; а також у задачах динамічного розміщення мобільних вогневих груп, що підтверджується відповідною відзнакою Повітряних Сил Збройних Сил України.

Повнота викладення наукових положень, висновків та результатів дисертаційної роботи є високою та повністю відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій. Робота відзначається системністю, внутрішньою логічною узгодженістю та завершеністю викладення наукових результатів.

У дисертації всебічно розкрито досліджувану проблему, послідовно подано постановки задач, розроблено відповідні математичні моделі, методи та алгоритми їх розв'язання. Усі основні наукові положення належним чином обґрунтовані, підтверджені теоретичними обґрунтуваннями та результатами чисельних експериментів.

Отримані результати викладені достатньо повно, з необхідним рівнем деталізації, що дає можливість оцінити їх наукову новизну, обґрунтованість і практичну значущість, а також свідчить про завершений характер проведеного дослідження.

Важливість для науки і практики результатів дослідження. Отримані в дисертаційній роботі результати мають вагоме значення як для розвитку сучасної математичної науки, так і для розв'язання прикладних задач. З наукової точки зору робота суттєво розширює теорію оптимального розбиття множин за рахунок переходу від класичних статичних постановок до динамічних моделей, у яких враховується часовий характер зміни параметрів. Запропоновані підходи дозволяють інтегрувати методи теорії оптимального розбиття множин, якісної теорії диференціальних рівнянь та недиференційованої оптимізації, що формує новий напрям досліджень у межах нескінченновимірного математичного програмування. Розроблені методи та алгоритми є теоретично обґрунтованими, мають універсальний характер і можуть бути використані для подальшого розвитку математичних моделей складних систем.

З практичної точки зору, результати роботи орієнтовані на розв'язання актуальних задач у різних галузях. Запропоновані моделі та алгоритми дозволяють ефективно розв'язувати задачі розподілу ресурсів, оптимального зонування територій, планування інфраструктури, а також задачі, пов'язані з управлінням складними технічними системами. Особливої уваги заслуговує отримана можливість застосування розроблених підходів в умовах невизначеності, що забезпечується використанням нейро-нечітких технологій.

Практична значущість результатів дослідження підтверджується їх впровадженням у задачах охорони здоров'я, оборонної сфери та адитивних

технологій, зокрема під час побудови оптимальних траєкторій тривимірного друку. Це свідчить про високий рівень прикладної орієнтації роботи та її здатність забезпечувати ефективні рішення в реальних умовах. Таким чином, результати дослідження мають істотну наукову новизну, практичну цінність і можуть бути рекомендовані до широкого використання.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях. Результати дисертаційного дослідження достатньо повно висвітлені в 7 наукових публікаціях у виданнях, що індексуються в наукометричних базах Scopus та Web of Science Core Collection, 13 статтях у фахових виданнях України, 18 публікаціях матеріалів міжнародних конференцій.

Реферат дисертації відповідає її змісту.

Результати наукових досліджень, представлені в кандидатській дисертації, не були включені до докторської дисертації.

Оформлення дисертації та дотримання принципів академічної доброчесності. Дисертація є результатом самостійного наукового дослідження, виконаного здобувачем, та містить науково обґрунтовані висновки і рекомендації. Структура та зміст дисертації свідчать про комплексний характер проведеного здобувачем дослідження, яке повною мірою розкриває тему роботи. Дисертація характеризується цілісністю, логічною послідовністю, взаємозв'язком між розділами та підрозділами, а також оформлена відповідно до нормативних вимог та стандартів, написана з дотриманням норм наукового стилю української мови. Використання ідей та результатів інших дослідників супроводжується посиланнями на відповідні джерела.

Дисертація та наукові публікації, у яких висвітлено основні наукові результати, не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації, текстових запозичень чи інших порушень академічної доброчесності.

Оформлення дисертації відповідає вимогам Наказу МОН України «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» від 12.01.2017 № 40 зі змінами від 31.05.2019 р.

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності. Дисертаційна робота Кузенкова Олександра Олександровича «Динамічні задачі оптимального розбиття множин: математичні моделі, методи, алгоритми, практичне застосування» за змістом відповідає спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Рекомендації щодо використання результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доцільно використовувати як у подальших наукових дослідженнях, так і у практичній діяльності. Розроблені математичні моделі, методи та алгоритми можуть бути застосовані під час розв'язання задач оптимального розподілу ресурсів, зонування територій, планування інфраструктури та управління складними технічними системами в умовах динамічної зміни параметрів. Особливо перспективним є їх використання в оборонній сфері, у системах підтримки прийняття рішень, а також у сучасних виробничих технологіях, зокрема, у адитивному виробництві. Крім того, отримані результати можуть бути впроваджені в навчальний процес закладів вищої освіти під час викладання дисциплін з прикладної математики, математичного моделювання та системного аналізу, а також використані під час підготовки кваліфікаційних робіт студентів і аспірантів.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. У роботі запропоновано значну кількість математичних моделей і алгоритмів для різних постановок динамічних задач оптимального розбиття множин, однак порівняльний аналіз ефективності розроблених підходів між собою та з існуючими методами представлено обмежено, що може ускладнити оцінювання їх переваг за різних умов застосування.

2. У деяких розділах (зокрема під час викладення математичних постановок задач і алгоритмів їх розв'язання) виклад матеріалу є надто розлогим через надмірну деталізацію математичного апарату, що може ускладнити сприйняття основних ідей; доцільним було б частину допоміжних викладок винести до додатків або подати у більш узагальненому вигляді.

3. Практичне застосування отриманих результатів продемонстровано на сукупності прикладних задач (охорона здоров'я, 3D-друк, військові застосування). Вважаю, що доцільно було б детальніше розглянути питання масштабованості запропонованих моделей для систем значної розмірності.

4. У роботі використано нейро-нечіткі підходи для ідентифікації параметрів. Вважаю, що слід було б більше уваги приділити дослідженню їхнього впливу на точність отриманих результатів, у тому числі на практичних прикладах.

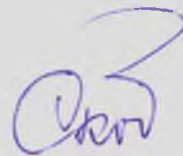
Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам. Вказані вище зауваження мають рекомендаційний характер та не знижують загальної позитивної оцінки дисертації та її високої якості загалом. У цілому дисертаційна робота Кузенкова О.О. є актуальною, завершеною та самостійною науковою працею, в якій отримано нові, достовірні результати,

що ефективно розв'язують наукову і прикладну проблему оптимального розбиття множин у динамічних постановках. Модельні задачі, що розглядаються, завершено чисельною реалізацією. Дисертація відповідає спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Результати дисертації є новими, їх цінність незаперечна, вони доповідалися та обговорювалися на національних і міжнародних конференціях. Результати досліджень достатньо повно висвітлено у наукових працях здобувача, а реферат відображає зміст роботи. Текст дисертації та автореферату викладено на належному науковому та літературному рівнях та оформлено відповідно до вимог до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Загальні висновки роботи повною мірою розкривають досягнуті результати відповідно до мети дослідження.

Підсумовуючи вищесказане, можна стверджувати, що дисертація за обсягом виконаних досліджень, новизною і науковою значимістю отриманих результатів та їх рівнем повністю відповідає вимогам п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» (Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, м. Київ, зі змінами, внесеними згідно з постановою КМ № 507 від 03.05.2024 р.), що висуваються до докторських дисертацій, а її автор Кузенков Олександр Олександрович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент,
професор закладу вищої освіти
кафедри математичного моделювання
та штучного інтелекту Національного
аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»
доктор технічних наук, професор



Юрій СКОБ

ПІДПИС *Юрій Скоба*

ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар університету



Юрій Скоба

