

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Кіндзерського Олександра Віталійовича
«Ідентифікація інтервальних моделей систем програмними агентами
бджолої колонії у середовищі NVIDIA CUDA»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Математичне моделювання посідає провідне місце в архітектурі сучасних інформаційних технологій і є основою функціонування багатьох інтелектуальних та інформаційно-аналітичних систем. В задачах підтримки та прийняття рішень широко застосовуються математичні моделі, реалізовані програмними засобами, тому створення програмного забезпечення, здатного забезпечити ідентифікацію моделей систем незалежно від предметної області, є важливою й актуальною науково-прикладною проблемою. Доцільність інтервального підходу визначається необхідністю коректно описувати невизначеність, похибки та неповноту вхідних даних, що характерно для реальних процесів і систем. Разом із тим задачі структурної та параметричної ідентифікації за інтервальними даними належать до класу NP-складних, що зумовлює потребу в застосуванні методів глобальної оптимізації, зокрема метаевристичних алгоритмів. Серед таких підходів значний інтерес становлять мультиагентні методи пошуку, зокрема алгоритм штучної бджолої колонії, ефективність якого проявляється на складних багатовимірних просторах. Однак зі збільшенням кількості агентів і розмірності задачі ідентифікації обчислювальні витрати суттєво зростають, що ускладнює практичне використання відповідних методів у наявних програмних середовищах та актуалізує потребу в підвищенні обчислювальної ефективності й масштабованості таких рішень. Таким чином, актуальним є науково-технічне завдання розроблення методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей систем програмними агентами метаевристичного алгоритму бджолої колонії у середовищі NVIDIA CUDA. Розроблення відповідних методів та програмних засобів забезпечить зниження часової складності розв'язування задач структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей систем, а створення програмного середовища надасть можливість користувачам розв'язати широкий спектр прикладних задач.

2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, представлено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, а також наведено відомості про апробацію та публікації за матеріалами дисертації із зазначенням особистого внеску автора.

У **першому розділі** дисертації виконано ґрунтовний аналіз проблематики ідентифікації інтервальних моделей систем та окреслено місце інтервального підходу в сучасному математичному моделюванні. Показано, що інтервальні моделі забезпечують явне й коректне відображення невизначеності параметрів і вхідних впливів, а також дають змогу оцінювати стійкість і працездатність системи за наявності похибок і збурень. Розглянуто методи параметричної та структурної ідентифікації, виявлено обмеження класичних підходів для дискретних моделей і підкреслено NP-складність відповідних задач. На цій основі обґрунтовано застосування метаевристичних методів колективного інтелекту та аргументовано вибір алгоритму бджолоїної колонії як базового інструмента глобальної оптимізації.

Другий розділ присвячено формальній постановці задач параметричної й структурної ідентифікації інтервальних моделей та вибору обчислювальної платформи для їх ефективного розв'язування. Обґрунтовано доцільність використання технології NVIDIA CUDA для побудови мультиагентної системи за рахунок масово-паралельних обчислень на GPU. Запропоновано гібридну схему CPU–GPU, у межах якої керувально-логічні фази алгоритму бджолоїної колонії реалізуються на CPU, тоді як GPU забезпечує паралельне обчислення функції мети для множини кандидатних рішень. Okремо представлено універсальний шаблон CUDA-ядра оцінки функції мети з динамічною спеціалізацією і компіляцією під конкретну прикладну модель, а також алгоритмічне забезпечення для обох типів ідентифікації.

У **третьому розділі** обґрунтовано архітектуру програмної системи ідентифікації інтервальних моделей на основі алгоритму бджолоїної колонії та визначено її трирівневу організацію: користувацький інтерфейс, алгоритмічна бібліотека та CUDA-бекенд. Подано UML-діаграми, що формалізують статичну структуру і динаміку функціонування системи, включно з моделями компонентів, класів, станів і послідовностей взаємодій. Реалізоване комп'ютерне середовище підтримує керування проєктами, імпорт/експорт CSV/JSON, валідацію параметрів, візуалізацію процесу пошуку та результатів у реальному

часі, а також засоби профілювання. Відокремлення графічного інтерфейсу від обчислювальної частини підвищує супроводжуваність рішення та створює передумови для подальшого переходу до кросплатформних інтерфейсів без змін алгоритмічного ядра.

У завершенні третього та в четвертому розділі наведено експериментальне підтвердження ефективності розроблених методів і програмних засобів, зокрема дослідження часової складності та продуктивності GPU-реалізації. Показано, що зі зростанням розмірності задачі ефективність застосування запропонованої технології підвищується, а добір оптимального розміру колонії (зокрема 4096 агентів) забезпечує суттєве прискорення, яке для моделей з близько 10 коефіцієнтами перевищує 45 разів порівняно з CPU-реалізацією. Водночас встановлено, що для моделей малої розмірності (2–3 коефіцієнти) використання GPU-підходу може бути нерентабельним. Апробацію виконано на прикладних задачах екологічного моніторингу, оцінювання вірогідності контенту та реабілітації пацієнтів із порушеннями рухливості верхніх кінцівок, де продемонстровано практичну цінність запропонованого підходу.

Висновки по роботі повністю висвітлюють отримані результати та за своїм рівнем відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження.

Структура дисертації повністю відповідає логіці й послідовності розв'язання поставлених задач.

Вірогідність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій забезпечується коректним використанням аналітичного та числового апарату досліджень; адекватністю теоретичних розрахункових результатів і результатів перевірки; відповідністю висновків і отриманих результатів фізичній суті досліджуваних явищ; порівнянням рішень з відомими у літературі. Отримані автором наукові результати відповідають поставленим завданням досліджень.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Основні наукові положення, результати та висновки дисертації отримані здобувачем самостійно, є новими, достатньо обґрунтованими та підтверджуються даними комп'ютерних експериментів та апробацією основних положень на всеукраїнських та міжнародних конференціях. Обґрунтованість наукових положень, висновків і результатів, отриманих здобувачем, забезпечується коректними та доцільним використанням математичного апарату, методології проектування інформаційних систем, успішною програмною реалізацією.

Отримані в дисертаційній роботі результати, які мають наукову новизну:

1) вперше розроблено обчислювальні методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей систем, що базуються на паралельному виконанні програмними агентами функцій поведінкової моделі бджолиної колонії, що забезпечило зниження часової складності ідентифікації інтервальних моделей систем;

2) вперше запропоновано та обґрунтовано застосування технології динамічної компіляції CUDA-ядра для реалізації розроблених методів структурної та параметричної ідентифікації, що забезпечує адаптацію обчислювального ядра під конкретну прикладну модель без зміни загальної логіки алгоритму і дає можливість організувати ефективне виконання агентів поведінкової моделі бджолиної колонії в середовищі NVIDIA CUDA;

3) набула подальшого розвитку агентно-орієнтована архітектура програмної системи для ідентифікації інтервальних моделей систем, що поєднує об'єктно-орієнтовану структуру компонентів із модульною організацією CUDA-обчислень, що забезпечує чіткий розподіл відповідальностей між рівнями системи та гнучке підключення GPU-бекенду і сприяє зменшенню часової складності реалізованих процедур ідентифікації;

4) набуло подальшого розвитку комп'ютерне середовище для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних, яке інтегрує інтерпретатор базисних функцій для побудови моделей і, на відміну від наявних рішень, об'єднує паралельне функціонування програмних агентів із механізмами їх динамічної компіляції, що підвищує універсальність і зручність застосування.

4. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях.

Дисертаційну роботу викладено на 218 сторінках друкованого тексту, з них 123 сторінок основного тексту, де наведено 28 рисунків та 15 таблиці, список використаних джерел складає 125 найменувань.

Дисертаційну роботу написано грамотною українською мовою, на хорошому стилістичному рівні. Застосована в роботі наукова термінологія є загально визнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Зміст дисертації дозволяє скласти уявлення про основні положення, висновки і рекомендації, запропоновані автором. Стиль викладу матеріалів досліджень і наукових положень забезпечує їх належне сприйняття. Оформлення дисертації відповідає усім необхідним атестаційним вимогам.

Проведена перевірка дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про хорошу індивідуальність роботи. По всьому

тексту дисертації простежується авторський стиль. У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела.

Основні результати дисертаційного дослідження достатньо повно викладені в 8 наукових працях, серед яких 6 робіт входять до міжнародної наукометричної бази Scopus. Загалом опубліковано 2 статті у наукових фахових періодичних виданнях України, 1 статтю у закордонних наукових виданнях, 5 публікацій у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

5. Наукове та практичне значення результатів дисертаційної роботи

Наукове значення виконаного дослідження полягає в обґрунтуванні та розробленні нових обчислювальних методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей систем. Запропонований підхід, на відміну від існуючих, ґрунтується на гібридній схемі CPU-GPU обчислень, де агенти поведінкової моделі бджолоїної колонії виконуються паралельно, що забезпечує суттєве зменшення часової складності.

Практичне значення результатів дослідження полягає у розробленні комп'ютерного середовища для математичного моделювання систем на основі аналізу інтервальних даних, що спрощує доступ користувача до модулів інтервального моделювання та знижує часову складність побудови моделей.

6. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації

Загалом дисертаційне дослідження здійснено на високому науково-прикладному рівні. Проте, оскільки деякі його положення є дискусійними, що пов'язано з складністю досліджуваної предметної області, варто зробити певні уточнення, зауваження та рекомендації з метою подальшого удосконалення досліджуваної проблематики.

1. У роботі наведено розгляд метаевристичного алгоритму на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії, проте бракує порівняння з іншими алгоритмами, що широко застосовуються у задачах ідентифікації моделей (генетичні алгоритми, PSO, DE, тощо). Доцільним було б провести експериментальне співставлення з цими підходами, що дало б можливість переконливіше продемонструвати його переваги.

2. Використання динамічної компіляції CUDA-ядра є сильним боком роботи, але бажано чіткіше описати механізми обробки помилок компіляції/виконання, стратегії відновлення та fallback на CPU у разі несумісності або дефіциту ресурсів. Крім того, корисно було б показати тестування на кількох класах GPU (наприклад, різні архітектури) або хоча б обговорити потенційні обмеження переносимості та вимоги до драйверів. Це підвищило б довіру до запропонованого програмного середовища як інженерного продукту.

3. У роботі зазначено, що для малорозмірних моделей (2–3 коефіцієнти) GPU-підхід є нерентабельним, однак варто чіткіше сформулювати критерії “порогу доцільності”: за якої розмірності, обсягу даних або вартості обчислення функції мети прискорення стає стабільним. Доцільно окремо проаналізувати накладні витрати гібридної схеми (передача даних CPU↔GPU, запуск ядра, динамічна компіляція), а також показати, як ці витрати масштабуються. Таке уточнення підвищило б практичну цінність рекомендацій щодо вибору параметрів (зокрема чисельності колонії) і сценаріїв застосування.

4. Для побудови математичної моделі «портрету користувача» та оцінювання вірогідності контенту було використано вибірку обсягом $N = 20$ випадків розміщення контенту. З точки зору статистичного аналізу соціальних мереж та задач Data Mining, така вибірка є замалою для формування стійкої моделі, здатної адекватно узагальнювати поведінку великих спільнот. Хоча інтервальний підхід дозволяє працювати з малими вибірками, для задач соціомоніторингу, де дисперсія поведінкових реакцій є вкрай високою, доцільно було б обґрунтувати достатність такої кількості спостережень або навести межі довірчих інтервалів отриманих прогнозів.

5. У тексті роботи виявлено низку граматичних, стилістичних та технічних помилок, що свідчить про необхідність ретельнішої літературної вичитки рукопису. Зокрема, у змісті та заголовках розділів допущено опіску в слові «Висновки», часто зустрічається написання «метаеврестичного», та мають місце випадки неузгодження роду та відмінків тощо. Наявність такої кількості коректорських помилок дещо знижує загальне враження від оформлення кваліфікаційної праці, хоча і не впливає на наукову цінність отриманих результатів.

Наведені зауваження не зменшують наукової новизни і практичної значущості дисертаційної роботи.

7. Висновки

Дисертаційна робота Кіндзерського Олександра Віталійовича є самостійним, оригінальним, завершеним науковим дослідженням, у якому отримано нові науково-обґрунтовані результати. У роботі розв’язано актуальне наукове завдання – розроблено обчислювальні методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей. Використання програмних агентів алгоритму бджолиної колонії у середовищі NVIDIA CUDA дозволило суттєво знизити часову складність ідентифікації таких моделей.

Одержані результати роблять вагомий внесок у теорію та практику математичного моделювання. Розроблені підходи можуть бути ефективно застосовані для створення засобів ідентифікації складних систем. Зміст роботи повністю відповідає спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Враховуючи актуальність обраної теми, обсяг та рівень виконаних досліджень, повноту розв'язання поставлених наукових та практичних задач, новизну і ступінь обґрунтованості отриманих результатів, дисертаційна робота «Ідентифікація інтервальних моделей систем програмними агентами бджолоїної колонії у середовищі NVIDIA CUDA» відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «Про затвердження 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, а її автор, Кіндзерський Олександр Віталійович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент,
старший науковий співробітник
відділу інформаційних технологій
індуктивного моделювання
Інституту інформаційних технологій
та систем НАН України,
к.т.н., с.н.с.



Сергій ЄФІМЕНКО

Підпис С. М. Єфіменка засвідчую:
вчений секретар
Інституту інформаційних технологій
та систем НАН України,
к.т.н., с.н.с.



Олександр РОДІОНОВ