

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Сіроткіна Олексія Вікторовича

на тему **«Метод побудови паралельних чисельних моделей динамічних систем на базі протоколу реактивних потоків»**,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань

12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

Актуальність теми дисертації.

Тема дисертаційної роботи спрямована на вирішення актуального завдання підвищення ефективності, точності та масштабованості паралельного моделювання складних динамічних систем. Із розвитком багатоядерних процесорів, кластерних і хмарних обчислень виникає потреба в нових методах організації симуляцій, здатних ефективно використовувати розподілені ресурси без втрати узгодженості результатів. Традиційні підходи часто виявляються обмеженими через централізовану синхронізацію або надлишкову комунікацію між процесами, що ускладнює їх застосування до великих систем. Запропоноване у роботі рішення побудови паралельних моделей на основі структурованих графів переходів і реактивних потоків дає змогу подолати ці обмеження, забезпечуючи асинхронність, гнучкість і стабільну продуктивність навіть за значної кількості взаємодіючих елементів. Це визначає наукову й практичну значущість дослідження та підтверджує його актуальність для забезпечення сучасних напрямів моделювання кіберфізичних систем і високопродуктивних обчислень.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному. У дисертаційній роботі запропоновано системний підхід до побудови паралельних моделей динамічних систем, заснований на поєднанні концепції графів переходів і реактивних потоків. Розроблено новий формалізм представлення станів і переходів системи у вигляді структурованих відношень, що дозволяє здійснювати декомпозицію процесів на незалежні підзадачі та забезпечує можливість їхньої асинхронної обробки. Запропоновано метод перетворення графа переходів у паралельну обчислювальну модель, яка реалізується в середовищі реактивного програмування без централізованого керування синхронізацією. Обґрунтовано використання реактивної архітектури для забезпечення стабільної взаємодії між обчислювальними вузлами, динамічного балансування навантаження та підвищення масштабованості

моделі. Наукова новизна також полягає у введенні критеріїв узгодженості переходів у асинхронних системах та доведенні коректності отриманих результатів симуляції. Розроблений підхід формує новий напрям у теорії та практиці паралельного моделювання, що поєднує гнучкість структурного опису з високою ефективністю виконання.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача **Сіроткіна О.В.** повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Комп'ютерні науки».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям інформаційні технології.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота **Сіроткіна Олексія Вікторовича** 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.

Дисертаційна робота відзначається логічною послідовністю викладення матеріалу, чіткою структурою та науковою цілісністю. Текст побудований у відповідності до вимог до кваліфікаційних наукових праць: кожен розділ логічно продовжує попередній, забезпечуючи послідовне розкриття мети, завдань, методів і результатів дослідження. Виклад матеріалу є доступним для сприйняття фахівцями у галузі комп'ютерних наук завдяки чіткому формулюванню понять, визначень і тверджень. Мовний стиль витриманий у межах академічної наукової традиції, характеризується точністю, об'єктивністю та відсутністю двозначностей. У роботі послідовно використовується загальноприйнята термінологія сучасної обчислювальної науки, теорії моделювання та програмної інженерії, що забезпечує однозначне трактування описаних методів і результатів. Загалом, текст вирізняється високою культурою наукового мовлення, коректністю використання термінів і належним рівнем аргументованості викладу.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 162 сторінки.

У *вступі* дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету, основні завдання та об'єкт і предмет дослідження. Показано наукову і практичну значущість роботи в контексті розвитку сучасних підходів до паралельного моделювання динамічних систем і реактивних архітектур обчислень. Визначено методологічну основу дослідження, яка поєднує аналітичні, математичні та експериментальні методи, спрямовані на формалізацію структур переходів між станами складних систем. У вступі також наведено короткий огляд сучасного стану проблеми, окреслено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, вказано зв'язок теми з науковими програмами, планами й проектами, а також сформульовано положення, що виносяться на захист. Структура вступу забезпечує логічну послідовність викладу і створює цілісне уявлення про зміст, спрямованість і значення виконаного дослідження.

У *першому* розділі дисертаційної роботи проведено аналітичний огляд сучасних підходів до паралельного моделювання динамічних систем і методів синхронізації розподілених процесів. Розглянуто класичні та сучасні концепції, зокрема імперативні, подієві, акторно-орієнтовані та реактивні моделі, визначено їхні переваги, обмеження та області застосування. Особливу увагу приділено аналізу механізмів консервативної та оптимістичної синхронізації, а також сучасним підходам, заснованим на реактивних потоках і потоково-орієнтованих архітектурах. Показано, що проблема ефективної координації подій і обміну станами залишається ключовим чинником, який обмежує масштабованість паралельних симуляцій. На основі огляду сформульовано наукову проблему, яку розв'язує дисертаційна робота, та визначено основні напрями подальших досліджень, що стали підґрунтям для розробки власної моделі і методів, представлених у наступних розділах.

У *другому* розділі дисертаційної роботи викладено теоретичні основи побудови формальної моделі динамічних систем на основі структурованих відношень між станами. Визначено поняття підстану, функції переходу та графа переходів, які становлять основу для подання складних об'єктів у вигляді системи взаємопов'язаних елементів. Розроблено формалізм опису еволюції системи через множину локальних переходів, що дозволяє декомпонувати процес моделювання на незалежні підзадачі. Показано, що таке представлення створює основу для подальшої реалізації паралельного обчислення, де кожен перехід може бути інтерпретований як незалежний обчислювальний процес. У розділі також здійснено математичне обґрунтування узгодженості переходів і критеріїв стабільності моделі, що забезпечує коректність результатів при подальшій симуляції. Таким чином, другий розділ формує концептуальну та

аналітичну основу для побудови обчислювальних структур, реалізованих у наступних етапах дослідження.

У *третьому* розділі дисертаційної роботи розроблено методологію побудови паралельної моделі динамічної системи на основі графа переходів, визначеного у попередньому розділі. Запропоновано механізм перетворення формалізованої структури переходів у виконувану обчислювальну модель, що дозволяє реалізувати процес симуляції у розподіленому або багатопроцесорному середовищі. Обґрунтовано підхід до організації паралельного виконання переходів із забезпеченням узгодженості станів без потреби в централізованій синхронізації. Розроблено архітектурну схему моделі, у якій обчислювальні вузли взаємодіють за допомогою подієвого обміну повідомленнями, а послідовність переходів визначається логікою графа. У розділі також наведено формальні критерії коректності та ефективності моделювання, показано способи керування потоками даних і розподілу навантаження між процесами. Таким чином, третій розділ містить практичну основу для реалізації запропонованої теоретичної моделі в умовах паралельних обчислень.

У *четвертому* розділі дисертаційної роботи представлено практичну реалізацію запропонованого підходу до паралельного моделювання динамічних систем на основі реактивних потоків. Розроблено обчислювальну модель, у якій граф переходів використовується як основа для організації обміну подіями між компонентами симуляції. Реалізацію здійснено із застосуванням бібліотеки Akka Streams, що забезпечує реактивну взаємодію між процесами, асинхронну обробку подій та масштабованість виконання. Наведено приклади програмної реалізації окремих елементів моделі та експериментальні результати, які демонструють ефективність запропонованого методу порівняно з традиційними імперативними підходами. Проведено аналіз продуктивності, оцінено масштабованість та стійкість моделі до асинхронних збурень у системі. Результати експериментів підтверджують коректність теоретичних положень і доводять, що використання реактивних потоків забезпечує стабільне та ефективне паралельне моделювання складних динамічних процесів.

У *п'ятому* розділі дисертаційної роботи здійснено узагальнення отриманих результатів та проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованого підходу відносно існуючих методів паралельного моделювання. На основі експериментальних досліджень показано, що використання реактивної архітектури та графів переходів дозволяє суттєво підвищити продуктивність і масштабованість моделювання без втрати точності обчислень. Розглянуто приклади застосування розробленої методології до різних типів динамічних систем, зокрема фізичних, технічних і кіберфізичних, що підтверджує універсальність і адаптивність підходу. У розділі також

сформульовано практичні рекомендації щодо реалізації паралельних симуляцій у розподілених середовищах, наведено можливі напрями подальших досліджень, пов'язані з інтеграцією машинного навчання для динамічного управління потоками даних. Таким чином, п'ятий розділ підсумовує виконане дослідження, демонструє його наукову завершеність і прикладну значущість.

Дисертаційна робота оформлена згідно 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 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 1 стаття у виданнях, віднесених до першого – третього квартилів (Q1–Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях.

Наукові публікації здобувача відзначаються високим науковим рівнем, відповідністю тематиці дисертаційного дослідження та сучасним напрямом розвитку комп'ютерних наук. Результати досліджень опубліковано у фахових виданнях України за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки», а також у міжнародних журналах, що індексуються в базах даних Scopus та Web of Science, зокрема у виданнях, віднесених до квартилів Q1–Q3 за класифікацією SCImago Journal and Country Rank / Journal Citation Reports. Усі наукові праці характеризуються дотриманням принципів академічної доброчесності: авторське право та джерела інформації зазначено коректно, плагіат відсутній, результати є оригінальними та отриманими у процесі самостійного дослідження. Особистий внесок здобувача полягає у постановці наукової проблеми, розробці теоретичних моделей, реалізації обчислювальних алгоритмів, проведенні експериментів і формулюванні висновків. У співавторських роботах внесок здобувача є провідним і визначальним, що підтверджується узгодженістю тематики, методології та результатів із основними положеннями дисертації.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Попри значну наукову та практичну цінність дисертаційного дослідження, окремі аспекти роботи потребують подальшого розвитку. Зокрема, в окремих

частинах доцільно було б розширити порівняльний аналіз із відомими методами паралельного моделювання, зокрема Time Warp та HLA, з метою глибшого позиціонування запропонованого підходу у контексті існуючих наукових рішень. Також певного уточнення потребують формальні критерії оцінки продуктивності для різних конфігурацій обчислювального середовища, що дозволило б кількісно підтвердити отримані переваги у більш широкому спектрі завдань. В окремих розділах варто було б подати розгорнуті приклади промислового або інженерного застосування, що підвищило б прикладну вагомість результатів. Однак зазначені недоліки мають здебільшого технічний або методичний характер і не впливають на загальну наукову значущість, достовірність та завершеність проведеного дослідження.

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

Таким чином, дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії **Сіроткіна Олексія Вікторовича** на тему «**Метод побудови паралельних чисельних моделей динамічних систем на базі протоколу реактивних потоків**» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для інформаційних технологій. 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 **Сіроткін Олексій Вікторович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:

Завідувач відділу теоретичної електротехніки
та діагностики електротехнічного обладнання
Інституту електродинаміки НАН України,
д.т.н., с.н.с.

Євген ЗАЙЦЕВ