

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Пучка Івана Вікторовича** на тему **«Агентне моделювання високоінтелектуальних енергетичних мереж із використанням неконфліктних реплікованих структур даних для опису станів системи»**, представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

Актуальність теми дисертації

Обрана здобувачем тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки спрямована на вирішення одного з ключових завдань сучасної комп'ютерної науки, а саме забезпечення узгодженості та надійності розподілених комп'ютерних систем.

У сучасних умовах розподілені системи становлять основу критичної інфраструктури, зокрема енергетичної. Забезпечення узгодженості, відмовостійкості та безперебійної роботи без централізованого контролю є однією з головних вимог до стійкості цифрових екосистем. Зростання кількості кіберзагроз і ризиків техногенного або людського походження збільшує потребу в технологіях, здатних самостійно відновлювати функціональність складних розподілених систем. Децентралізація, у свою чергу, зменшує вразливість таких систем, запобігаючи одночасному виведенню з ладу їхніх ключових компонентів. У цьому контексті розробка підходів, заснованих на неконфліктних реплікованих структурах даних, є кроком до створення глобально надійних, самовідновлюваних і самокерованих інформаційних систем.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. У роботі вперше запропоновано та обґрунтовано підхід до синхронізації станів агентів мультиагентної системи, що базується на неконфліктних реплікованих структурах даних. На відміну від традиційних централізованих або консенсусних методів, цей підхід забезпечує детерміновану збіжність станів без необхідності глобальної координації, що суттєво підвищує ефективність і надійність системи в умовах розподіленого середовища;
2. Вперше реалізовано агентну модель високоінтелектуальних енергетичних мереж, у якій синхронізація станів здійснюється через неконфліктні репліковані

структури даних. Така модель дозволяє підвищити стійкість системи до відмов, забезпечує масштабованість та передбачувану поведінку навіть за високого навантаження та нестабільності мережі;

3. Вперше проведено експериментальний аналіз впливу зростання мережевих затримок на час поширення станів, реалізованих за допомогою неконфліктних реплікованих структур даних (CRDT), що дозволило підтвердити лінійну масштабованість системи та передбачувану динаміку синхронізації;

4. Запропоновано застосування акторної моделі при моделюванні високоінтелектуальних енергетичних мереж, яка відрізняється від існуючих підходів відсутністю спільних структур синхронізації та локальним прийняттям рішень агентами. Така модель забезпечує передбачувану продуктивність системи, спрощує масштабування та оптимізує використання обчислювальних ресурсів.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Пучка І. В. повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям інформаційні технології.

У дисертаційній роботі Пучка І. В. не виявлено порушень принципів академічної доброчесності. Результати мають авторський характер, а використані ідеї та матеріали інших дослідників супроводжуються належними бібліографічними посиланнями.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота має продуману структуру, матеріал викладено послідовно. Кожен розділ органічно продовжує попередній, поступово розкриваючи мету, завдання, методологію та отримані результати, що відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць. Інформація подана доступно для фахівців у галузі комп'ютерних наук завдяки точним формулюванням ключових понять і визначень. Використання сучасної термінології сприяє однозначному трактуванню описаних методів і результатів. У цілому текст дисертації демонструє високий рівень наукового письма.

Структура та зміст дисертації

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, зумовлену потребою підвищення надійності та стійкості децентралізованих енергетичних систем.

Визначено мету роботи – забезпечення ефективної синхронізації станів агентів у високоінтелектуальних енергетичних мережах шляхом застосування неконфліктних реплікованих структур даних для опису станів системи. Сформульовано основні наукові завдання, що охоплюють аналіз існуючих підходів до моделювання, побудову агентної структури системи, розроблення симуляційної моделі та проведення її експериментальної перевірки. Наведено наукову новизну, практичну значущість отриманих результатів, а також відомості про апробацію дослідження, публікації та структуру роботи.

Перший розділ присвячений аналізу сучасних підходів до агентного моделювання високоінтелектуальних енергетичних мереж. У ньому розглянуто принципи побудови мультиагентних систем, типи агентів, їхню внутрішню структуру та механізми взаємодії. Окрему увагу приділено проблемам узгодженості станів у розподілених обчисленнях, традиційним методам підтримання консистентності та обмеженням централізованих і консенсусних алгоритмів. Узагальнено підходи на основі неконфліктних реплікованих структур даних та акторної моделі, які визначено як перспективні для побудови стійких і масштабованих енергетичних систем.

Другий розділ містить формалізацію агентної моделі розподіленої енергетичної мережі. Автор визначає структуру агентів, простір їхніх станів і правила переходів між ними, а також формалізує взаємозв'язки між агентами. Запропоновано новий підхід до синхронізації станів агентів на основі CRDT, що забезпечує узгодженість інформації без централізованого керування. Сформовано математичний опис моделі, який враховує властивості асоціативності, комутативності та ідемпотентності операцій.

Третій розділ присвячений розробленню симуляційної моделі запропонованої системи. Обґрунтовано вибір інструментів реалізації, а саме мови програмування Scala та фреймворку Akka, які поєднують функціональну парадигму з акторною моделлю. Описано архітектуру симулятора, що реалізує взаємодію агентів, поширення станів та обробку подій у розподіленому середовищі. Представлено алгоритми реалізації процесів синхронізації на основі CRDT, що гарантують масштабованість і передбачувану поведінку системи під високими навантаженнями.

Четвертий розділ містить результати експериментальної перевірки запропонованої моделі. Визначено постановку експериментів, сценарії моделювання, параметри симуляцій і методику аналізу результатів. На основі проведених досліджень показано вплив мережових затримок і кількості агентів на час узгодження станів. Експерименти підтвердили ефективність моделі, її лінійну

масштабованість, стійкість до відмов і стабільну роботу за умов мережевої нестабільності, що засвідчує практичну придатність запропонованого підходу.

У висновках підсумовано основні результати дослідження, які коротко полягають у наступному:

1. Розроблено новий підхід до синхронізації станів агентів у мультиагентних системах на основі неконфліктних реплікованих структур даних, що забезпечує детерміновану збіжність без централізованого керування;

2. Створено агентну модель високоінтелектуальної енергетичної мережі та її симуляційну реалізацію з використанням акторної моделі;

3. Експериментально підтверджено масштабованість, стійкість до відмов і ефективність запропонованого підходу в умовах мережових затримок і високих навантажень.

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 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 4 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 3 статті у виданнях, віднесених до першого та другого квартилів (Q1–Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Усі наукові публікації здобувача мають високий науковий рівень, відповідають тематиці дисертаційного дослідження та сучасним напрямкам розвитку комп'ютерних наук, характеризуються дотриманням принципів академічної доброчесності. Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях.

Особистий внесок здобувача полягає у структурованому формулюванні методичних рекомендацій щодо функціональної парадигми програмування, розробці високорівневого дизайну розподілених електроенергетичних систем на основі моделі акторів та кластерної топології, створенні моделей та програмного забезпечення для симуляції таких систем із застосуванням неконфліктних реплікованих структур даних і інструментарію Akka, а також у проведенні експериментальних досліджень, обробці та візуалізації отриманих результатів. Крім того, здобувач брав участь в оптимізації симуляційних алгоритмів на основі графових структур і реактивних потоків, розробці та тестуванні моделей управління інтелектуальними мережами та сервісів для дослідження еволюції мікросервісних

архітектур. У співавторських публікаціях внесок здобувача є визначальним і провідним, що підтверджується тематичною, методологічною та результативною узгодженістю з основними положеннями дисертації.

Таким чином, всі наведені в дисертаційній роботі Пучка І.В. наукові результати повністю висвітлені у його наукових публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. У дисертації недостатньо обґрунтовано вибір конкретного типу CRDT (наприклад, LWWMap), оскільки його стратегія злиття (Last-Writer-Wins) критично залежить від точності синхронізації системних годинників;
2. Слід було б провести прямий кількісний порівняльний аналіз латентності та пропускну здатності запропонованого CRDT-підходу порівняно з обраними протоколами сильної узгодженості (наприклад, Raft) в умовах відсутності мережових розділень;
3. Варто було б розглянути механізми захисту від перевантаження поштових скриньок агентів у фреймворку Akka в умовах сплеску подій або каскадних відмов у мережі;
4. У роботі недостатньо надано уваги впливу зростання розміру CRDT-повідомлень на мережовий трафік, особливо у тривалих симуляціях, де метадані CRDT можуть акумулюватися;
5. У дисертації недостатньо чітко представлені алгоритми керування агентів, які використовують CRDT-стан для прийняття рішень;
6. Доцільно було б оцінити можливість використання гібридного підходу, у якому CRDT застосовується для менш критичних (слабоузгоджених) даних, а протоколи сильної узгодженості використовуються лише для критичних керуючих команд.

Зазначені вище зауваження мають здебільшого методичний характер не знижують наукового рівня дисертаційної роботи та її практичного значення, а також не стосуються кваліфікаційних ознак та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи Пучка І. В.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, 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, а її автор Пучко Іван Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного університету «Запорізька політехніка»,

к.т.н. доцент

Равіль КУДЕРМЕТОВ

Підпис Кудерметова Р. К. засвідчую:

Вчений секретар вченої ради
Національного університету «Запорізька політехніка»,

к.соц.н. доцент



Віктор КУЗЬМІН