

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 тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки стосується однієї з ключових проблем сучасних інформаційних технологій – забезпечення стабільної взаємодії та узгодженості компонентів у розподілених обчислювальних системах. Зі зростанням складності інфраструктур, які об'єднують велику кількість автономних вузлів, виникає потреба у нових моделях управління, здатних підтримувати цілісність даних без централізованого контролю. Розробка підходів, що базуються на неконфліктних реплікованих структурах даних, відкриває можливість створення самовідновних і масштабованих архітектур, які залишаються функціональними навіть у разі втрати зв'язку між окремими елементами системи. У контексті розвитку інтелектуальних енергетичних мереж це набуває особливого значення, адже забезпечує надійність, безперервність і кіберстійкість критично важливих процесів у мінливих та потенційно нестабільних умовах.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у створенні та теоретичному обґрунтуванні нового підходу до узгодження станів у мультиагентних системах, який використовує механізми неконфліктних реплікованих структур даних для забезпечення стабільності роботи розподілених енергетичних мереж. Запропонований підхід усуває потребу у централізованих чи консенсусних механізмах керування, забезпечуючи передбачувану збіжність станів навіть за умов обмеженого зв'язку між агентами.

У роботі реалізовано агентну модель високоінтелектуальної енергетичної мережі, в якій синхронізація даних здійснюється асинхронно за допомогою CRDT, що дозволяє досягти високої відмовостійкості, масштабованості та стабільної поведінки системи за значних навантажень і мережевих коливань.

Вперше проведено експериментальне дослідження динаміки поширення станів у розподіленому середовищі з урахуванням мережевих затримок, результати якого підтвердили лінійну масштабованість та ефективність запропонованої архітектури. Крім того, обґрунтовано доцільність використання акторної моделі для моделювання інтелектуальних енергетичних мереж, що забезпечує незалежність агентів у прийнятті рішень, зменшує потребу у глобальній синхронізації та покращує керованість процесів у системі.

Достовірність результатів підтверджується поєднанням теоретичного аналізу, формалізованого опису запропонованих моделей і результатами експериментального моделювання, які узгоджуються з висунутими гіпотезами та очікуваними властивостями системи.

Таким чином, у дисертаційній роботі наукове завдання реалізовано в повному обсязі, а здобувач продемонстрував глибоке володіння методологією проведення наукових досліджень.

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.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Пучка Івана 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 характеризується чіткою структурою та логічною організацією матеріалу, що забезпечує цілісне сприйняття наукового дослідження. Кожен розділ плавно продовжує попередній, послідовно висвітлюючи мету, завдання, методологію та отримані результати, що відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових робіт. Матеріал викладено таким чином, що він є доступним для спеціалістів у галузі комп'ютерних наук завдяки точним і зрозумілим визначенням ключових понять, наукових тверджень та використанню загально прийнятої термінології. Мовний стиль відповідає академічним стандартам, відзначається точністю, об'єктивністю та відсутністю двозначностей. Загалом текст відзначається високим рівнем наукової культури, логічністю викладу та коректністю термінології.

Дисертаційна робота складається з наступних структурних елементів: вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків, двох додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 115 сторінок, з яких 98 сторінок відведено на основний текст. У роботі наведено 12 рисунків і 5 таблиць, а бібліографія містить 109 джерел і розміщена на 13 сторінках.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність дослідження, що полягає у необхідності розробки нових механізмів управління для високоінтелектуальних енергетичних мереж, які характеризуються розподіленою генерацією та високою мінливістю. Наголошено на обмеженнях класичних підходів забезпечення узгодженості станів у таких розподілених системах, які не можуть одночасно гарантувати доступність і стійкість до мережових розділень. Визначено об'єкт (процеси синхронізації станів агентів) та предмет (моделі та методи агентного моделювання BIEM), а також сформульовано наукову новизну та практичне значення результатів, які полягають у розробці підходу синхронізації станів агентів на основі CRDT у BIEM. У вступі також наведено короткий огляд сучасного стану задачі, окреслено зв'язок теми з науковими програмами Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України та сформульовано положення, що виносяться на захист.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проведено аналітичний огляд існуючих підходів до агентного моделювання BIEM та методів забезпечення узгодженості станів у розподілених системах. Розглянуто основні принципи

агентного підходу (автономність, реактивність, комунікабельність) та архітектурні засади мультиагентних систем. Детально проаналізовано концепції сильної та остаточної узгодженості, а також алгоритми консенсусу, обґрунтовуючи їхню недостатню ефективність у реальних умовах ВІЕМ через залежність від мережевої стабільності (теорема CAP). На противагу цьому, обґрунтовано доцільність використання CRDT як механізму, що забезпечує сильну остаточної узгодженість без блокування та глобальної координації, що є ключовим для підвищення стійкості та доступності системи. На завершення розділу обґрунтовано вибір моделі акторів та функціональної парадигми програмування як інструментальної основи для імплементації запропонованої агентної моделі, зважаючи на їхню природну підтримку асинхронності, ізоляції стану та високої масштабованості.

У другому розділі дисертаційної роботи викладено теоретичні основи та здійснено формалізацію агентної моделі розподіленої енергетичної мережі. Визначено структуру агента як ключового елемента системи, що включає статичні та динамічні характеристики, а також множини його станів і правил переходів між ними. Розроблено формальний підхід до синхронізації станів агентів, де кожен агент формує власне уявлення про загальний стан мережі на основі реплікованих даних. Запропоновано узагальнене подання ВІЕМ як множини агентів, що використовують CRDT реплікатор для поширення змін

станів та детерміноване злиття конкурентних оновлень. Показано, що таке представлення створює надійну основу для подальшої реалізації агентної моделі, яка гарантує узгодженість станів у розподіленому середовищі, навіть за наявності мережевих затримок і розділень.

У третьому розділі дисертаційної роботи розроблено симуляційну модель розподіленої енергетичної мережі та її архітектуру. Обґрунтовано вибір мови Scala та фреймворку Akka для імплементації моделі акторів у поєднанні з функціональною парадигмою, що забезпечує необхідну асинхронність, відмовостійкість та масштабованість. Детально описано архітектуру симулятора, де кожен енергетичний об'єкт змодельований як актор, який функціонує на основі скінченного автомата з основними режимами роботи. Ключовим елементом імплементації є використання LWWMap як конкретного типу CRDT для зберігання та синхронізації інформації про стан системи, що гарантує узгодженість станів. Наведено детальний опис ключових сценаріїв роботи агента (дефіциту, надлишку, виходу з ладу), що дозволяє верифікувати

коректність функціонування агента в умовах розподіленого керування та асинхронної взаємодії.

У четвертому розділі дисертаційної роботи представлено результати експериментальної перевірки запропонованої моделі та підходу. Сформульовано постановку та методику експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку ефективності та стійкості моделі в умовах різного профілю мережевих затримок. Експерименти проводилися з використанням розробленого програмного комплексу Vigilant Hawk. Результати експериментів підтвердили ефективність запропонованого підходу, показавши масштабованість моделі та її високу стійкість до мережевих відмов і нестабільності. Проведено аналіз впливу параметрів мережі на час поширення станів і встановлено оптимальні налаштування для коректної та швидкої синхронізації. Таким чином, експериментальні дані довели коректність теоретичних положень, підтвердили практичну доцільність використання CRDT для забезпечення надійної роботи BIEM та довели, що запропонований підхід є життєздатним для верифікації децентралізованих алгоритмів керування.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати здобувача, покладені в основу дисертаційної роботи, представлені у шести наукових публікаціях, серед яких дві статті у наукових періодичних виданнях України, включених на момент публікації до переліку фахових видань (категорія Б), чотири статті у міжнародних журналах, що індексуються у базах Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких три видання належать до першого–третього квартилів (Q1-Q3) за класифікацією SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Результати дисертаційного дослідження також були представлені та апробовані на двох наукових конференціях: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Резильєнтність динамічних систем», Київ, 2024 р., та міжнародній конференції 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Афіни, 2024 р.

Наукові публікації відповідають тематиці дисертації та сучасним напрямкам розвитку комп'ютерних наук, мають високий науковий рівень і опубліковані у фахових виданнях України за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки», а також у міжнародних журналах, індексованих у Scopus та Web of

Science (квартилі Q1–Q3 за SCImago Journal and Country Rank / Journal Citation Reports).

Усі публікації здобувача відповідають принципам академічної доброчесності: коректно зазначено авторські права та джерела інформації, відсутній плагіат, а результати є оригінальними й отримані в ході самостійного дослідження.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні та структуризації методичних рекомендацій щодо застосування функціональної парадигми програмування в мові Scala, розробленні високорівневого дизайну розподілених електроенергетичних систем на основі акторної моделі та кластерної топології, а також у створенні програмних рішень для моделювання таких систем із використанням неконфліктних реплікованих типів даних (CRDT) та інструментарію Akka. Здобувач спроектував і реалізував основні компоненти програмного комплексу Vigilant Hawk для симуляції розподілених електроенергетичних мереж, провів експериментальні дослідження, здійснив обробку та візуалізацію отриманих результатів.

Крім того, здобувач брав участь в оптимізації симуляційних алгоритмів на основі графових структур і реактивних потоків, розробці моделей керування інтелектуальними електромережами з ієрархічною структурою акторів, а також у створенні експериментальних мікросервісних систем для аналізу еволюції архітектур на основі підходів до сумісності версій API.

У співавторських роботах внесок здобувача Пучка І.В. є провідним і визначальним, що підтверджується єдністю тематики, методології та отриманих результатів із основними положеннями дисертації.

Це дозволяє зробити висновок, що наукові результати дисертаційної роботи здобувача повністю відображені у його публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Попри наукову новизну, практичну значущість та чітку логічну побудову дисертаційної роботи, окремі її положення залишають простір для подальшого удосконалення та розвитку. Серед них варто відзначити такі зауваження і недоліки:

1. Оскільки робота спрямована на збільшення стійкості розподілених енергосистем до відмов, у ній був би доцільним детальний розгляд загроз кібербезпеки, які є критичними для ВІЕМ (наприклад, протидія атакам на

цілісність даних або фальсифікація часових міток LWWMap). Також у ній не розглядається сценарій, коли один або декілька агентів скомпрометовані та передають сфабриковані дані, спрямовані на зменшення стабільності системи в цілому.

2. У першому розділі подано ґрунтовний огляд підходів до агентного моделювання високоінтелектуальних енергетичних мереж. Водночас огляд практично не охоплює суміжні напрями, що безпосередньо впливають на розвиток сучасних децентралізованих енергосистем –зокрема, методи забезпечення кіберстійкості, розподілених журналів подій (DLT, блокчейн) та інтеграції агентних систем із IoT-платформами. Включення цих аспектів дозволило б ширше представити науковий контекст дослідження.

3. У третьому розділі детально описано архітектуру симуляційної моделі енергомережі, реалізованої із використанням фреймворку Akka. Разом з тим, у ньому майже не розглянуто питання реакції системи на відмови чи втрату окремих агентів. Додатковий аналіз цих аспектів дозволив би більш повно оцінити надійність і практичну придатність розробленої моделі.

4. У роботі в цілому реалізацію симуляційної моделі виконано із використанням фреймворку Akka. Разом з тим, при масштабуванні моделі до великих мереж можливо зіткнутися з обмеженнями акторної архітектури –зокрема, високими витратами на міжвузлові комунікації та складністю збереження станів агентів після відмо. У подальших дослідженнях ці аспекти могли б бути враховані для підвищення точності й надійності симуляцій.

5. У четвертому розділі наведено результати моделювання, які демонструють ефективність запропонованої моделі високоінтелектуальної енергомережі. Водночас експериментальна частина могла б бути розширена для більшої репрезентативності результатів. Зокрема, доцільно врахувати стохастичний характер навантаження у вузлах, сценарії відмов і відновлення агентів, варіанти топологій мережевих з'єднань. Також доцільно було б виконати розширену статистичну обробку результатів декількох симуляцій із визначенням довірчих інтервалів. Це дозволило б підвищити достовірність висновків щодо стійкості та масштабованості моделі.

6. Виявлена у результаті виконання експерименту лінійна залежність між FSDT і LDK важливе спостереження. Наступними кроками могли б стати статистична валідація закономірності, аналіз порогів при зміні інших параметрів (масштаб, топологія, інтенсивність оновлень), а також розробка й

тестування механізмів пом'якшення впливу латентності (adaptive anti-entropy, батчинг, пріоритезація). Це дозволить не лише закріпити емпіричний висновок, але й запропонувати практичні інструменти для підвищення стійкості системи.

Водночас наведені зауваження мають переважно рекомендаційний і методичний характер, не знижують загального наукового рівня виконаної роботи, не впливають на її практичну цінність і не ставлять під сумнів відповідність дисертації встановленим кваліфікаційним вимогам.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Пучка Івана Вікторовича на тему «Агентне моделювання високоінтелектуальних енергетичних мереж із використанням неконфліктних реплікованих структур даних для опису станів системи» 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 Пучко Іван Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 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