

## **РЕЦЕНЗІЯ**

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.**

Стійке функціонування енергетичних систем має критичне значення для України, особливо в умовах воєнних викликів, пошкоджень інфраструктури, кіберзагроз та зростаючої потреби в автономних механізмах енергозабезпечення. У цьому контексті розробка децентралізованих архітектур, здатних до самовідновлення, локального балансування та безпечного функціонування в умовах часткових відмов, є одним із пріоритетних напрямів сучасних досліджень у галузі комп'ютерних наук та енергетичного моделювання.

На світовому рівні дослідження у сфері децентралізованих енергетичних систем мають стратегічне значення, оскільки спрямовані на підвищення енергетичної безпеки, інтеграцію відновлюваних джерел енергії, підвищення ефективності керування потоками потужності та мінімізацію ризиків масштабних збоїв у мережах.

Розвиток методів агентного та розподіленого моделювання створює передумови для побудови систем нового покоління, здатних до самоорганізації, адаптації до змінних умов і прогнозування навантажень у режимі реального часу.

Дисертаційне дослідження присвячено створенню агентної моделі високоінтелектуальних енергетичних мереж, у якій механізми узгодження станів базуються на неконфліктних реплікованих структурах даних. Такий підхід відкриває можливість побудови відмовостійких і масштабованих систем управління без централізованого контролера, що забезпечує узгодженість інформації навіть за втрат зв'язку або збою окремих вузлів.

Тематика дослідження цілком відповідає глобальним тенденціям розвитку розумних і кіберстійких енергетичних мереж, де узгодженість даних у розподілених середовищах є визначальною умовою стабільності.

Робота виконувалася відповідно до плану наукових досліджень Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України в межах НДР

«Розвиток наукових засад алгебраїчної теорії сильного штучного інтелекту стосовно кібернетичної безпеки об'єктів критичної інфраструктури в галузі енергетики» (№ ДР 0123U100913, 2023–2027 рр.) та «Розвиток розподіленої енергетики в умовах ринку електричної енергії України з використанням технологій та систем цифровізації. Розділ 1. Організаційні та математичні моделі взаємодії учасників децентралізованого ринку електроенергії» (№ ДР 0125U000237, 2025–2026 рр.).

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Дисертаційне дослідження І.В. Пучка присвячено розробці підходу до агентного моделювання високоінтелектуальних енергетичних мереж із використанням неконфліктних реплікованих структур даних для опису станів системи. Основні результати, що визначають новизну роботи:

1) Розроблено новий підхід до синхронізації станів агентів у мультиагентних системах із використанням CRDT, який забезпечує передбачувану збіжність системи без необхідності глобального узгодження або централізованого контролю.

2) Створено агентну модель високоінтелектуальної енергетичної мережі, у якій взаємодія агентів реалізується через безконфліктні структури даних. Це підвищує масштабованість та забезпечує стабільність роботи системи за змінних мережевих умов.

3) Проведено аналітичне та експериментальне дослідження впливу мережевих затримок на швидкість поширення станів у системі, що дозволило підтвердити лінійну масштабованість запропонованої моделі.

4) Запропоновано використання акторної моделі для побудови високоінтелектуальних енергомереж із локальним ухваленням рішень, що уникає спільних точок синхронізації та сприяє стабільній продуктивності й гнучкому масштабуванню.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у створенні моделі, яка може бути використана для розроблення та тестування алгоритмів управління розподіленими енергетичними мережами нового покоління. Запропонований підхід на основі неконфліктних реплікованих структур даних дає змогу забезпечити узгодженість інформації між агентами без потреби у централізованому керуванні, що відкриває перспективи застосування в системах локального балансування, мікромережах та автономних енергетичних спільнотах. Розроблені механізми можуть бути використані як основа для побудови цифрових двійників енергомереж та експериментальних платформ для перевірки нових стратегій керування.

Наукові дослідження були виконані здобувачем в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України у відділі математичного і комп'ютерного моделювання під керівництвом чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. Мохора Володимира Володимировича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання розроблення підходу до агентного моделювання високоінтелектуальних енергетичних мереж із використанням неконфліктних реплікованих структур даних для опису станів системи 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 Пучка І.В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки та напрямкам досліджень відповідно до ОНП 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 співпадиння, 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.

Дисертація є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 115 сторінок.

У вступі обґрунтовано вибір теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну, практичну цінність результатів, зв'язок із науковими програмами, подано дані про апробацію та публікації.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних підходів до агентного моделювання високоінтелектуальних енергомереж, описано основи мультиагентних систем і засоби узгодження станів у розподілених обчисленнях, зокрема роль CRDT та акторної моделі.

Другий розділ містить формалізацію та проєктування агентної моделі енергомережі, визначено структуру агентів, простір станів і механізм синхронізації на основі CRDT.

У третьому розділі викладено створення симуляційної моделі системи із застосуванням мови Scala та фреймворку Akka, описано архітектуру симулятора та принципи взаємодії агентів.

Четвертий розділ містить результати експериментальної перевірки моделі, опис сценаріїв симуляцій, параметрів експериментів та аналіз ефективності розробленої системи.

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 статей у виданнях, віднесених до першого – другого квартилів (Q1–Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях, зокрема з індексацією в Scopus.

У роботі дотримано принципів академічної доброчесності: відсутні запозичення без посилань, фальсифікація чи фабрикація даних. Посилання на джерела зроблено коректно, а посилання на результати, отримані спільно з іншими дослідниками, чітко відображають особистий внесок автора.

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

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

Незважаючи на те, що в цілому робота виконана на високому науковому рівні, в ній можна відзначити певні недоліки. Зокрема:

1) Розділ 1 містить ґрунтовний аналіз сучасного стану розвитку підходів до агентного моделювання високоінтелектуальних енергетичних систем. Водночас огляд можна було б розширити, охопивши загальні підходи до моделювання складних енергетичних процесів (системну динаміку, дискретно-подійне та імітаційне моделювання, мережеві й диференціальні моделі). Таке розширення дозволило б більш повно підкреслити переваги обраного агентного підходу.

2) Наведені у 4-му розділі результати моделювання дають змогу оцінити ефективність розробленої моделі та вплив параметра LDK на стійкість системи. Водночас для підвищення наочності наведених результатів аналізу доцільно було б ввести узагальнений показник стабільності модельованої системи та

візуалізувати його залежність від LDK, що дозволило б більш чітко продемонструвати динаміку зміни стійкості.

3) Також у 4-му розділі, на мою думку, залишаються недостатньо висвітленими питання параметризації дослідів, зокрема, повністю не розкрито, як саме змінювалися характеристики агентів, рівень навантаження чи параметри зв'язку між вузлами. Більш докладний аналіз впливу цих факторів дозволив би глибше оцінити стійкість та масштабованість запропонованої моделі.

4) Більшість джерел, на які зроблено посилання в дисертаційній роботі, становлять публікації закордонних дослідників. Це свідчить про належну обізнаність автора із сучасним рівнем розвитку тематики у світі. Водночас, доцільно було б ширше висвітлити напрацювання українських науковців у сфері агентного моделювання та енергетичних систем, що дозволило б повніше відобразити стан досліджень у вітчизняному науковому просторі. Також корисно було б навести інформацію про ступінь імплементації високоінтелектуальних розподілених мереж в енергетичній системі України.

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.**

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» є актуальною завершеною науковою працею. Робота не містить плагіату чи фальсифікації. Робота відповідає стандарту спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», яка затверджена Постановою Кабінету Міністрів України № 44 (від 12 січня 2022 р.), а Пучко Іван Вікторович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

### **Рецензент:**

заступник директора з науково-технічної роботи

Інституту проблем моделювання в енергетиці

ім. Г.Є. Пухова НАН України

д.т.н., с.д.

Сергій ГОНЧАР