

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Примушка Арсентія Миколайовича**

на тему **«Модель синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів електроенергетичних мереж на основі теорії інтелектуальних систем та безконфліктних реплікованих типів даних»**,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 12 – Інформаційні технології  
за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки

### **Актуальність теми дисертації**

Сучасні інтелектуальні електроенергетичні мережі (ЕЕМ) перебувають на етапі стрімкої трансформації, стаючи складними кіберфізичними системами (КФС), які відзначаються значною розподіленістю, динамічністю та гетерогенністю. Впровадження технологій розумних мереж, Інтернету речей, розподіленої генерації, зокрема відновлюваних джерел енергії, а також нових ринкових моделей спричиняє експоненційне зростання обсягів даних і кількості взаємодіючих вузлів.

Ключовим чинником ефективного функціонування ЕЕМ є наявність узгодженої, точної та повної інформації про поточний стан системи. Однак, розбіжності між локальними даними про стан компонентів та агрегрованою інформацією на різних рівнях управління призводять до збільшення інформаційної ентропії. Це, у свою чергу, породжує невизначеність, ускладнює адекватну оцінку стану системи та прийняття управлінських рішень, що підвищує ризик операційних помилок і знижує надійність роботи ЕЕМ. Централізовані методи управління не відповідають викликам, що постають перед сучасними децентралізованими та інтелектуальними енергосистемами.

Ефективне оперативне управління можливе лише за умови точного, повного та узгодженого бачення поточного стану системи. Відсутність такої узгодженості призводить до дестабілізації роботи мережі та критичних помилок.

Для подолання зазначених проблем у дисертаційному дослідженні пропонується застосування комбінованого підходу, що об'єднує когнітивні алгебраїчні системи (КАС) для семантичного узгодження інформації про стани вузлів та безконфліктні репліковані типи даних (CRDT) для забезпечення синтаксично-узгодженої реплікації даних. Синергія цих технологій дозволяє знизити інформаційну ентропію, підвищуючи ефективність і надійність функціонування ЕЕМ.

Тому розробка комбінованої моделі на основі формалізму КАС та CRDT є актуальним науковим завданням, спрямованим на підвищення надійності, керованості, безпеки та ефективності роботи сучасних та майбутніх електроенергетичних систем в умовах їх децентралізації, інтелектуалізації та цифровізації.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та грантами**

Дисертаційне дослідження виконувалось у межах планових науково-дослідних робіт Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, зокрема:

- НДР «Розвиток наукових засад алгебраїчної теорії сильного штучного інтелекту стосовно кібернетичної безпеки об'єктів критичної інфраструктури в галузі енергетики» (№ ДР 0123U100913, 2023-2027 рр.)
- НДР «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 та новизни.**

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробці та формалізації цілісної моделі для забезпечення синтаксично-семантичної узгодженості інформації в розподілених ЕЕМ. Обґрунтованість отриманих наукових положень підтверджується використанням загальноприйнятих методів досліджень, математичним доведенням властивостей запропонованих моделей та результатами експериментальних досліджень. У дисертації отримано такі наукові результати, що визначають її новизну:

1. Вперше запропоновано та формалізовано гібридну модель узгодження інформації в розподілених децентралізованих ЕЕМ. На відміну від існуючих підходів, ця модель базується на синергетичному об'єднанні двох рівнів: високорівневого семантичного, реалізованого на основі розробленого апарату когнітивної алгебраїчної системи для моделювання та формалізації знань про стан вузлів, що забезпечує семантичну узгодженість; низькорівневого синтаксичного, що використовує безконфліктні репліковані типи даних для забезпечення гарантованої синтаксичної збіжності даних на фізичному рівні.

2. Вперше введено та формалізовано поняття КАС, що включає математичний апарат для моделювання когнітивних процесів, таких як дослідження та навчання. В рамках КАС визначено поняття функціонально-логічних протиріч та протиріч суб'єктивного ставлення, а також доведено обмеження аналітичного пошуку оптимальних рішень за їх наявності.
3. Вперше описано метод представлення стану вузлів ЕЕМ та операцій над ними в рамках моделі КАС-CRDT. Цей метод враховує статичні та динамічні властивості, а також внутрішні та зовнішні контексти високорівневих топологічних об'єднань, що забезпечує формальну верифікованість логіки узгодження та надійність її розподіленого виконання.
4. Вперше запропоновано підхід до синтаксично-семантичного узгодження CRDT-даних на основі формалізму КАС, що дозволяє інтегрувати галузеві стандарти (CIM, IEC) для систематизації знань про електроенергетичну мережу.
5. Вперше адаптовано CRDT спеціально для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості даних про стан вузлів та підсистем ЕЕМ.
6. Вперше формалізовано критерій узгодженості інформації для ЕЕМ на основі моделі КАС-CRDT та розроблено метрики для його кількісної оцінки. Ці метрики враховують інформаційну ентропію системи та аномальність переходів між станами.
7. Подальшого розвитку набула теорія інтелектуальних електроенергетичних мереж. Вона була доповнена моделлю синтаксично-семантичного узгодження, механізмами виведення та передачі нових знань, а також методами оцінки аномальності стану вузлів та підсистем КФС.
8. Подальшого розвитку набуло використання принципів функціонального програмування та моделі акторів для створення програмних симуляцій. Це дозволяє моделювати розподілені, децентралізовані, асинхронні, відмовостійкі та масштабовані інтелектуальні КФС, відтворюючи гетерогенні та динамічні середовища сучасних ЕЕМ.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у розробці конкретних моделей та інструментів, що мають прикладний характер і можуть бути використані для вирішення актуальних завдань у сфері управління сучасними ЕЕМ. Основні практичні результати роботи полягають у наступному:

- Розроблено модель КАС-CRDT, що забезпечує синтаксично-семантичну узгодженість для ефективної оцінки стану розподілених ЕЕМ.
- Запропонований процес реплікації інформації зменшує ентропію та неузгодженість, підвищуючи керованість і спостережуваність кіберфізичних систем.
- Створено основу для розробки інтелектуальних систем, здатних ефективно узгоджувати дані про стан ЕЕМ під час збурень.
- Запропонований підхід може бути адаптований для інших складних КФС, де критичною є семантична узгодженість даних.
- Запропоновано підхід до побудови системи імітаційного моделювання, що є інструментом для дослідження та валідації функціонування синтаксично-семантично узгодження даних в розподілених та децентралізованих КФС.

Таким чином, практичне значення отриманих результатів є вагомим, оскільки вони дають конкретні інструменти для підвищення надійності, керованості та ефективності функціонування сучасних енергетичних систем.

**Теоретичне значення дисертаційної роботи** полягає у розвитку наукових основ управління складними КФС шляхом розробки нової, науково-обґрунтованої моделі, що базується на синергетичному поєднанні двох фундаментальних підходів: теорії КАС та CRDT. Ключовим теоретичним внеском є формалізація процесів інтелектуального узгодження знань про вузли та підсистеми ЕЕМ. Запропонована модель вперше дозволила концептуально та функціонально розділити семантичний рівень узгодженості, що описується алгебраїчно в рамках КАС, від механізмів гарантованої синтаксичної узгодженості даних на фізичному рівні, які реалізуються на основі CRDT.

### **Оцінка змісту, структури та завершеності роботи**

Дисертаційна робота має логічну та завершену структуру, що послідовно розкриває завдання дослідження та мету, а саме розробку моделі узгодження інформації про стан інтелектуальних, розподілених та децентралізованих ЕЕМ та їх складових частин на основі комбінованої теорії КАС та CRDT для забезпечення гарантованої кінцевої синтаксично-семантичної узгодженості. Загальний обсяг роботи становить 221 сторінку, з яких 171 сторінка припадає на основний текст. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, двох додатків та списку використаних джерел, що налічує 349 найменувань. Зміст роботи ілюстровано 2 таблицями та 3 рисунками, що доповнюють викладений матеріал.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, поставлено завдання, визначено предмет, об'єкт та методи дослідження, викладено основні положення наукової новизни та практичного значення одержаних результатів.

У *першому* розділі здійснено комплексний аналіз сучасних ЕЕМ. Досліджено процеси їх трансформації у гетерогенні, розподілені КФС, що супроводжуються зростанням обсягів інформації. Визначено ключові проблеми, що виникають унаслідок цього, зокрема семантичну неузгодженість даних та підвищення інформаційної ентропії. На основі критичного огляду існуючих підходів до узгодження даних виявлено їхні обмеження та обґрунтовано доцільність розробки нової моделі для забезпечення гарантованої синтаксично-семантичної узгодженості інформації.

У *другому* розділі формується теоретична основа дослідження. Виходячи з обмежень, що накладаються CAP теоремою на розподілені системи, вводиться дворівнева модель узгодження. На високому рівні пропонується когнітивна алгебраїчна система як формалізм для семантичного моделювання та узгодження знань про стани вузлів ЕЕМ. На низькому рівні для забезпечення гарантованої синтаксичної збіжності даних застосовуються CRDT. Для спрощення формалізації вводиться абстракція високорівневих топологічних об'єднань. Ключовим результатом розділу є обґрунтування комбінованої моделі KAC-CRDT, яка інтегрує ці підходи, надаючи верифіковані гарантії синтаксично-семантичної узгодженості та закладаючи основи для адаптивних систем управління.

*Третій* розділ присвячено формалізації та верифікації властивостей комбінованої моделі KAC-CRDT. Запропоновано п'ятиетапний протокол синтаксично-семантичного узгодження, що включає аналіз допустимих траєкторій переходу між станами, валідацію та корекцію. Введено метрики для кількісної оцінки рівня узгодженості на основі поняття інформаційної ентропії Шеннона та доведено, що процес узгодження еквівалентний її зменшенню в системі. Також у розділі визначено основні операції над структурою KAC-CRDT та розглянуто приклад її застосування.

*Четвертий* розділ присвячено практичній реалізації та експериментальному дослідженню запропонованої моделі узгодження на основі розробленого програмного забезпечення здатного імітувати розподілені та децентралізовані ЕЕМ.

У висновках наведено отримані наукові та практичні результати дослідження.

Дисертаційна робота являє собою завершену наукову працю, в якій досягнуто поставленої мети та виконано всі завдання дослідження. Висновки роботи є логічно обґрунтованими. За тематичним спрямуванням, змістом та сукупністю наукових результатів, які пройшли належну апробацію, дисертація відповідає кваліфікаційним вимогам, що висуваються до робіт за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

**Мова дисертації** є академічною, логічно вивіреною, без надмірної термінологічної складності. Використано загальноприйняті скорочення з поясненнями. Посилання на джерела оформлено коректно, плагіат відсутній, а використання матеріалів інших авторів супроводжується належними цитуваннями. Робота завершена та внутрішньо цілісна. Аналіз дисертаційної роботи підтверджує, що вона виконана з неухильним дотриманням принципів академічної доброчесності.

#### **Повнота публікацій матеріалів досліджень**

Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи повною мірою висвітлені у *15 наукових працях*. До цього переліку входять *7 статей* у провідних фахових виданнях України категорії «Б», *4 статті* у міжнародних виданнях, що індексуються в наукометричній базі даних Scopus (зокрема, з квантилями Q1 та Q2), та *4 тези доповідей* на наукових конференціях.

Особливу увагу варто приділити **особистому внеску здобувача** у працях, опублікованих у співавторстві. Аналіз цих внесків, чітко визначених для кожної публікації, підтверджує, що здобувач відігравав ключову роль на всіх етапах дослідження. Основні напрямки особистого внеску автора включають: формулювання концептуальних підходів, розробка ключового теоретичного апарату КАС, використання CRDT для узгодження інформації про стани вузлів ЕЕМ, проектування архітектурних рішень високонавантажених та розподілених електроенергетичних мереж, планування та проведення експериментальних досліджень.

Таким чином, особистий внесок здобувача є вагомим, відповідає основному змісту та науковим положенням дисертаційної роботи і підтверджує самостійність отриманих наукових результатів. Наукові публікації повно та ґрунтовно висвітлюють результати, викладені в дисертації.



**Зауваження** щодо результатів, змісту та оформлення дисертації:

1. Запропонована метрика для визначення відстані між станами  $d(SA, SB)$  використовує вагові коефіцієнти  $(w_i, w_j)$ . У дисертації недостатньо деталізовано методологію вибору чи динамічної адаптації цих коефіцієнтів, які є критично важливими для коректної роботи механізму виявлення аномалій.
2. Запропонована модель оперує набором інваріантів  $I$  для перевірки семантичної коректності стану. Однак, у роботі не розглядається можливість виникнення конфліктів між самими інваріантами, особливо у складній системі, де правила для різних операційних контекстів можуть суперечити одне одному за певних умов.
3. У роботі зазначено, що імплементовано OR-Set та LWW-Register. Проте, відсутній порівняльний аналіз, який би доводив, чому саме ці типи є оптимальними для моделювання стану вузлів EEM порівняно з іншими можливими альтернативами.
4. У дисертації вводиться параметр LNDC, що представляє кількість проміжних вузлів-ретрансляторів. Однак його визначення є нечіткими, що ускладнює відтворюваність експерименту.
5. Загалом у тексті на 221 сторінку наведено лише 2 таблиці та 3 рисунки. Особливо це помітно в частині, що стосується практичної реалізації. Зокрема, у підрозділі 4.4 бракує схематичного та графічного опису принципів та порядку роботи спроектованого програмного забезпечення, його режимів та порівняльної характеристики з існуючими рішеннями. Додавання блок-схем та діаграм могло б суттєво покращити візуальне представлення архітектури розробленого прототипу та результатів моделювання.

Варто зазначити, що наведені зауваження є дискусійними та не ставлять під сумнів обґрунтованість основних наукових положень дисертації. Вони лише вказують на перспективні вектори для майбутніх досліджень у даній галузі.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Дисертаційна робота Примушка А.М. «Модель синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів електроенергетичних мереж на основі теорії інтелектуальних систем та безконфліктних реплікованих типів даних» є завершеною, самостійно виконаною працею, в якій отримано нові теоретичні та практичні результати. За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем

виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових і практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертаційна робота відповідає вимогам, які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології», а її автор, Примушко Арсентій Миколайович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:

професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці  
навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

доктор технічних наук, професор



«21» жовтня 2025 року

Підпис професора Мусієнка А.П. засвідчую.