

ВІДГУК

офіційного рецензента 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

Трансформація сучасних електроенергетичних мереж (ЕЕМ) на складні розподілені кіберфізичні системи, зумовлена інтеграцією розумних мереж, Інтернету речей та відновлюваних джерел енергії, призводить до зростання інформаційної ентропії, що проявляється у вигляді розбіжностей між даними про стан окремих вузлів та системи в цілому. Така інформаційна неузгодженість унеможливорює формування узгодженого бачення та інтерпретації інформації про стани вузлів ЕЕМ і, як наслідок, робить традиційні централізовані підходи до управління та оцінки неефективними. В умовах сучасних геополітичних викликів, прикладом яких є систематичні атаки на енергетичну інфраструктуру України, що призводять до значних пошкоджень та втрат генеруючих потужностей, забезпечення надійності, відмовостійкості та резильєнтності енергосистем є питанням національної безпеки. Відтак, розробка механізмів для забезпечення узгодженості даних в децентралізованих, інтелектуальних та розподілених ЕЕМ має не лише наукову, а й нагальну практичну цінність.

Тому наукове завдання, яке було вирішене у роботі Примушка А.М., що полягало в розробці моделі узгодження інформації про стан інтелектуальних, розподілених та децентралізованих електроенергетичних мереж та їх складових частин на основі комбінованої теорії когнітивних алгебраїчних систем та реплікованих типів даних для забезпечення гарантованої кінцевої синтаксично-семантичної узгодженості, є безумовно актуальним.

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

Робота виконувалась відповідно до плану наукових досліджень Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України:

1. НДР «Розвиток наукових засад алгебраїчної теорії сильного штучного інтелекту стосовно кібернетичної безпеки об'єктів критичної інфраструктури в галузі енергетики» (№ ДР 0123U100913, 2023-2027 рр.)
2. 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.

У дисертаційній роботі повністю виконано поставлене наукове завдання: розроблено модель узгодження інформації про стан інтелектуальних, розподілених та децентралізованих електроенергетичних мереж на основі комбінованої теорії когнітивних алгебраїчних систем та безконфліктних реплікованих типів даних. Запропонована модель забезпечує гарантовану кінцеву синтаксично-семантичну узгодженість, що дозволяє зменшити рівень інформаційної ентропії та підвищити спостережуваність і керованість сучасних ЕЕМ.

В рамках дисертаційної роботи вперше одержані такі **наукові результати:**

1. Вперше запропоновано та формалізовано модель узгодження інформації в розподілених децентралізованих ЕЕМ, що, на відміну від існуючих підходів, базується на об'єднанні когнітивної алгебраїчної системи для високорівневого семантичного моделювання і формалізації знань про стан вузлів та підсистем ЕЕМ, забезпечуючи семантичну узгодженість, та безконфліктних реплікованих типів даних для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості даних на фізичному рівні.
2. Вперше описано метод представлення стану вузлів ЕЕМ та операцій над ними в рамках КАС з урахуванням статичних та динамічних властивостей, внутрішнього та зовнішнього контекстів високорівневих топологічних об'єднань та формалізму моделі КАС-CRDT, що може бути використаний для синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем ЕЕМ. Це дозволило забезпечити формальну верифікованість логіки узгодження та надійність її розподіленого виконання для ефективної оцінки стану та функціонування ЕЕМ.
3. Вперше запропоновано підхід до реалізації функції синтаксично-семантичного узгодження інформації про стан вузлів та підсистем ЕЕМ, описаних в CRDT на основі формалізму КАС, що може інтегрувати наявні підходи та стандарти для систематизації знань про електроенергетичну мережу на прикладі СІМ моделі та серії ІЕС стандартів.
4. Вперше безконфліктно репліковані типи даних було адаптовано для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості даних про стан вузлів та підсистем ЕЕМ.
5. Вперше формалізовано критерій узгодженості інформації про стани вузлів та підсистем ЕЕМ на основі моделі КАС-CRDT та розроблено метрики для його кількісної оцінки з урахуванням інформаційної ентропії системи та аномальності утворених станів.
6. Вперше введено поняття КАС та запропоновано математичний формалізм когнітивного процесу як композиції функцій, що реалізуються за певних умов з певною ймовірністю. Введено поняття функціонально логічних протиріч та протиріч суб'єктивного ставлення. Доведено, що КАС за наявних протиріч суб'єктивного ставлення не здатна до аналітичного

пошуку оптимального рішення і вимушена спиратися на комбінаторні методи.

7. Вперше дано формальні визначення таким процесам КАС, як теоретичне та практичне дослідження, теоретичне та практичне навчання.
8. Подальшого розвитку набула теорія інтелектуальних електроенергетичних мереж, що була доповнена моделлю синтаксично-семантичного узгодження, виведенням та передачі нових знань, а також оцінки аномальності стану вузлів та підсистем КФС.
9. Подальшого розвитку набуло використання принципів функціонального програмування та моделі акторів для створення програмних симуляцій розподілених, децентралізованих, асинхронних, відмовостійких та масштабованих інтелектуальних КФС, здатних відтворювати гетерогенні та динамічні середовища сучасних ЕЕМ.

Практична цінність результатів роботи полягає в наступному:

1. Розроблена модель КАС-CRDT, що може бути використана для ефективної оцінки та функціонування ЕЕМ на основі синтаксично-семантичної узгодженості інформації про стан вузлів розподілених та децентралізованих інтелектуальних ЕЕМ.
2. Процес реплікації інформації на основі моделі КАС-CRDT призводить до зменшення ентропії та неузгодженості в ЕЕМ, що збільшує керованість та спостережуваність КФС.
3. Розвиток науково-методичної бази для розробки нового покоління інтелектуальних систем функціонування розподілених та децентралізованих електроенергетичних мереж, що здатні ефективно узгоджувати на синтаксично-семантичному рівні інформацію про стан вузлів та підсистем ЕЕМ під час збурень.
4. Запропонований підхід може бути адаптований для потреб інших складних КФС, для яких критичною є не тільки синтаксична, а й семантична узгодженість даних.
5. Запропоновано підхід до побудови системи для симуляції реплікації та узгодження інформації про стан вузлів ЕЕМ на основі КАС та CRDT на рівні ВТО за допомогою моделі акторів та функціональної парадигми програмування, що може бути використаний для дослідження функціонування розподілених та децентралізованих синтаксично-семантично узгоджених систем.

Теоретичне значення роботи полягає у розвитку теоретичних основ управління складними кіберфізичними системами через розробку нової моделі, що синергетично поєднує когнітивну алгебраїчну систему та безконфліктні репліковані типи даних. Вперше формалізовано процеси інтелектуального узгодження знань про вузли ЕЕМ шляхом розділення семантичного рівня консистентності та механізмів гарантованої синтаксичної узгодженості даних. Це закладає теоретичні основи для створення нового класу верифікованих, семантично насичених і відмовостійких систем розподіленої оцінки та управління сучасними ЕЕМ.

Обґрунтованість отриманих наукових положень дисертації підтверджується використанням загальноприйнятих методів досліджень, відсутністю протиріч між результатами розрахунків, численних експериментальних досліджень та випробувань.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Структура дисертації побудована відповідно до мети та задач дослідження. Дисертація Примушка А.М. викладена на 221 сторінках та складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 171 сторінку друкованого тексту. Робота ілюстрована 2 таблицями та 3 рисунками. Список використаних джерел містить 349 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, розкрито сутність і стан науково-технічної проблеми, що досліджується, наведено обґрунтування доцільності проведення досліджень, відображено зв'язок роботи з науковими програмами та планами НДР Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено апробації роботи та публікації її результатів у наукових виданнях.

У *першому* розділі проведено системний аналіз сучасних ЕЕМ як гетерогенних кіберфізичних систем, виявлено проблеми семантичної неузгодженості даних та зростання інформаційної ентропії, а також обґрунтовано необхідність розробки нової моделі узгодження.

Другий розділ закладає теоретичний фундамент, представляючи когнітивну алгебраїчну систему як формалізм для високорівневого семантичного узгодження та моделювання логічного “мислення” системи, та безконфліктні репліковані типи даних як низькорівневий механізм для гарантованої кінцевої синтаксичної узгодженості. На основі цього обґрунтовується гібридна модель KAC-CRDT, що надає верифіковані гарантії синтаксично-семантичної узгодженості та включає функції для оцінки аномальності переходів між станами та їх корекції.

Третій розділ присвячено формалізації та верифікації властивостей моделі KAC-CRDT. Тут описано протокол синтаксично-семантичного узгодження, визначено операції над структурою KAC-CRDT та введено метрики на основі ентропії Шеннона для кількісної оцінки рівня узгодженості. Доведено, що процес узгодження за допомогою запропонованої моделі еквівалентний зменшенню загальної інформаційної ентропії системи.

У *четвертому* розділі описано практичну реалізацію та експериментальне дослідження на основі розробленого інструменту на основі моделі акторів та функціонального програмування для моделювання розподілених, гетерогенних та децентралізованих електроенергетичних мереж. Проведено імітаційне моделювання.

Висновки по дисертаційній роботі підкреслюють новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Отримані результати мають подвійне значення: теоретичне — у розвитку фундаментальних основ управління складними кіберфізичними системами, де важлива синтаксично-семантична узгодженість даних, та практичне — у вигляді конкретного інструментарію, спрямованого на підвищення ефективності функціонування сучасних електроенергетичних мереж.

Список використаної літератури із 349 найменувань охоплює сучасні публікації за метою дисертаційних досліджень.

В роботі відсутні порушення академічної доброчесності.

В цілому структура, обсяг та оформлення дисертації відповідають чинним вимогам, які ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності

Дисертація за змістом та усіма матеріалами, зокрема науковими публікаціями та виступами на науково-технічних конференціях, повністю відповідає спеціальності 122 Комп'ютерні науки.

Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Матеріал дисертації викладено логічно і обґрунтовано, усі розділи мають свою специфіку, яка у сукупності свідчить про цілісність та завершеність дисертаційної роботи. Таким чином, представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яка написана науковою мовою. Зміст, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають як темі роботи, так і затвердженим вимогам до написання дисертаційних досліджень МОН України.

Повнота публікацій матеріалів досліджень

За темою роботи опубліковано 15 наукових праць, зокрема, до цього переліку входять 7 статей у провідних фахових виданнях України категорії Б та 4 статті у міжнародних виданнях, що індексуються в наукометричній базі даних Scopus. Результати дослідження були представлені на 4 науково-технічних конференціях, серед яких є й міжнародна, матеріали якої індексуються в Scopus.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що у науково-технічних виданнях є достатньо повна інформація про результати досліджень, що викладені в дисертації здобувача.

Зауваження щодо результатів, змісту та оформлення дисертації:

1. В роботі при аналізі траєкторії переходу вводиться поріг θ для класифікації переходу як аномального. Однак, у дисертації відсутня формальна методологія для визначення цього значення. Некоректно

встановлений поріг може призвести до великої кількості хибних спрацювань або, навпаки, до пропуску реальних аномальних подій.

2. Як на мене, в першому розділі й, зокрема, у підрозділі 1.5 недостатньо приділено увагу саме семантичній складовій та глибшому порівнянню з відомими методами та підходами досягнення семантичної узгодженості інформації про стани вузлів.
3. Для більш лаконічно та змістовного викладення матеріалу було би логічно об'єднати підрозділи 3.1 та 3.2, а також 4.1 та 4.2.
4. У підрозділах 2.3 та 3.3 повторюються визначення стану вузлів, їх компонентів та узагальнених параметрів. Варто було би об'єднати їх в один логічно-зв'язний підрозділ.
5. Підрозділ 2.4, на мою думку, перевантажує роботу в цілому й міг би бути виключений, або ж об'єднаний з підрозділами першого розділу.

Зазначені зауваження не піддають сумніву вагомість отриманих результатів та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Примушка А.М.

Висновок про дисертаційну роботу

Детальний аналіз матеріалів дисертаційної роботи та опублікованих наукових праць дає змогу стверджувати, що дисертаційна робота Примушка Арсентія Миколайовича «Модель синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів електроенергетичних мереж на основі теорії інтелектуальних систем та безконфліктних реплікованих типів даних» містить усі ознаки завершеної наукової роботи. В ній отримано нові науково обґрунтовані теоретичні результати, що дають змогу вирішити актуальне наукове завдання розробки моделі узгодження інформації про стан інтелектуальних, розподілених та децентралізованих електроенергетичних мереж та їх складових частин на основі комбінованої теорії когнітивних алгебраїчних систем та реплікованих типів даних для забезпечення гарантованої кінцевої синтаксично-семантичної узгодженості, що дозволяє зменшити рівень інформаційної ентропії та підвищити спостережуваність і керованість сучасних ЕЕМ.

Дисертаційна робота Примушка А.М. є завершеною та самостійно виконаною науковою працею. Робота відзначається чіткою логічною структурою, матеріал викладено послідовно, а стиль науковою строгістю, ясністю та аргументованістю. Висновки, сформульовані до кожного розділу, органічно впливають з його змісту та повною мірою відображають ключові результати відповідних етапів дослідження. Основні наукові положення та результати, представлені в дисертації, знайшли повне відображення в опублікованих працях здобувача.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, теоретичну та практичну цінність, а також отримані наукові результати та достатню повноту висвітлення основних положень дисертаційної роботи в опублікованих працях, вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку

присудження наукового ступеня доктора філософії ...», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022 р.

Здобувач Примушко Арсентій Миколайович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 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