

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

Сучасні електроенергетичні мережі (ЕЕМ) поступово трансформуються у складні, розподілені, кіберфізичні системи. Інтеграція відновлювальних джерел енергії, Інтернету речей, цифровізація, інтелектуалізація та розвиток комплексних ринкових моделей взаємодії між виробниками та споживачами, зокрема, поява просюмерів, призводить до експоненційного зростання обсягів згенерованої інформації. Це зумовлює зростання інформаційної ентропії та неконсистентності даних, що ускладнює моніторинг, адекватну оцінку стану вузлів та прийняття управлінських рішень, знижуючи ефективність функціонування ЕЕМ. Існуючі підходи до узгодження даних, як правило, зосереджені на синтаксичному рівні, ігноруючи семантичний аспект узгодженості інформації – однакову інтерпретацію даних різними підсистемами. Ефективна оцінка та управління неможливі без синтаксично-семантичного узгодженого стану вузлів та підсистем енергосистеми, адже неузгодженість даних ускладнює координацію операційної діяльності системи та, подекути, унеможлиблює побудову інтелектуальних та інтероперабельних мереж.

З огляду на вищезазначене, вважаю, що дисертаційна робота Примушка А.М., яка присвячена вирішенню наукового завдання розроблення моделі синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів електроенергетичних мереж на основі теорії інтелектуальних систем та безконфліктних реплікованих типів даних, є актуальною.

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, зокрема в рамках 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 та новизни.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання шляхом 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.

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

Наукові дослідження були виконані здобувачем в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України у відділі математичного та комп'ютерного моделювання під керівництвом к.т.н. Кравцова Григорія Олексійовича.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:

- 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.
- 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.
- 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 CIM моделі та серії IEC стандартів.
- Вперше безконфліктно репліковані типи даних було адаптовано для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості даних про стан вузлів та підсистем ЕЕМ.
- 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.

– 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.

– Вперше дано формальні визначення таким процесам КАС, як теоретичне та практичне дослідження, теоретичне та практичне навчання.

– 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.

– 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:

– 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.

– Процес реплікації інформації на основі моделі КАС-CRDT призводить до зменшення ентропії та неузгодженості в ЕЕМ, що збільшує керованість та спостережуваність КФС.

– 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.

– Запропонований підхід може бути адаптований для потреб інших складних КФС, для яких критичною є не тільки синтаксична, а й семантична узгодженість даних.

– 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.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене 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, виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертація Примушка А.М. є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка викладена на 221 сторінках. Дисертація складається із 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, сформульовано мету, поставлено завдання, визначено предмет, об'єкт та методи дослідження, викладено основні положення наукової новизни та практичного значення одержаних результатів.

У *першому* розділі проведено системний аналіз стану, тенденцій розвитку та ключових викликів функціонування сучасних ЕЕМ. Аналізуються процеси трансформації сучасних ЕЕМ у гетерогенні, розподілені та децентралізовані кіберфізичні системи (КФС), а також їх цифровізація та інтелектуалізація, що призводить до експоненційного росту кількості інформації. Розглядаються проблеми семантичної неузгодженості даних та росту інформаційної ентропії, а також вплив на ефективність функціонування ЕЕМ. Аналізуються існуючі підходи до оцінки та узгодження даних інтелектуальних ЕЕМ, виявляються їхні обмеження та обґрунтовується необхідність розробки нової моделі здатної забезпечити гарантовану кінцеву синтаксично-семантичну узгодженість інформації про стани вузлів та підсистем ЕЕМ.

У *другому* розділі закладається теоретичний фундамент дослідження, обґрунтовується гібридна модель для вирішення завдання синтаксично-семантичного узгодження інформації в розподілених ЕЕМ. Спочатку розглядаються властивості таких систем в рамках САР-теореми. Далі вводиться поняття високорівневих топологічних об'єднань для спрощення формалізації відношень між вузлами та підсистемами ЕЕМ, описується формалізм запропонованої когнітивної алгебраїчної системи (КАС), яка дозволяє моделювати гетерогенні об'єкти, їхні дії та обмеження, а також зважене, логічне мислення системи через визначені метрики та умови узгодженості, після чого розглядаються властивості та формалізм безконфліктних

реплікованих типів даних (CRDT) різних типів. Нарешті, центральним елементом розділу є запропонована комбінована модель KAC-CRDT, що поєднує високорівневе семантичне узгодження на основі запропонованого формалізму KAC та низькорівневе синтаксичне узгодження на основі CRDT, математичні властивості яких забезпечують детерміновану збіжність стану всіх реплік. Запропонована модель KAC-CRDT надає гарантії синтаксично-семантичної узгодженості з можливістю верифікації, включаючи оцінку аномальності переходів між станами та їх корекцію. Таким чином, у розділі закладається теоретична основа для створення інтелектуальних систем, здатних до навчання, адаптації та синтезу нового знання.

Третій розділ роботи присвячено формалізації та верифікації формальних властивостей описаної структури стану вузла EEM на основі комбінованої моделі KAC-CRDT. Описано п'ятиетапний протокол синтаксично-семантичного узгодження на основі представленого стану з урахуванням аналізу допустимої траєкторії переходу між підстанами, синтаксично-семантичної валідації та корекції неузгодженого стану. Визначено та формалізовано основні операції над KAC-CRDT. Розглянуто приклад синтаксично-семантичного узгодження на основі моделі KAC-CRDT та теоретичні можливості її доповнення. Вводяться метрики для кількісної оцінки рівня узгодженості даних у розподіленій EEM, спираючись на поняття інформаційної ентропії Шеннона. Показано, що процес досягнення узгодженості на основі комбінованої моделі KAC-CRDT еквівалентний зменшенню загальної інформаційної ентропії системи, що підвищує ефективність оцінки та управління EEM.

У *четвертому* розділі представлено практичну реалізацію та експериментальне дослідження запропонованої моделі. Розроблено програмну архітектуру на основі моделі акторів та парадигми функціонального програмування, реалізовану з використанням інструментарію Akka та мови Scala. Аналіз результатів проведеного імітаційного моделювання розподіленої EEM на основі моделі KAC-CRDT продемонстрував ріст синтаксично-семантичної узгодженості, зниження рівня інформаційної ентропії системи, а також масштабованість, що виражається в лінійній залежності між локальною щільністю мережі та часом реплікації стану. Таким чином, експерименти довели гнучкість та доцільність використання моделі KAC-CRDT для вирішення завдання синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем EEM.

У *висновках* до дисертаційної роботи показано, що вирішено важливе 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 оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

В роботі відсутні порушення академічної доброчесності, оскільки в ній викладені власні результати досліджень автора, а використані результати з інших джерел мають відповідні посилання.

Дисертаційна робота написана українською мовою на високому науковому рівні, з коректним використанням фахової термінології. Стиль викладу є логічним, послідовним та зрозумілим для фахівців в галузі знань Інформаційні технології за спеціальністю 122 - Комп'ютерні науки.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 11 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 7 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 4 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, з яких 3 статей у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на 4 всеукраїнських та міжнародній науково-технічних конференціях.

Наукові публікації здобувача, зараховані за темою дисертації, свідчать про високий науковий рівень проведених досліджень. Результати роботи опубліковані у 15 наукових працях, серед яких 7 статей у фахових виданнях України категорії Б, 4 статті у виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі даних Scopus (зокрема, з квартилями Q1 та Q2), та 4 тези доповідей на конференціях, включно з міжнародною конференцією IEEE. Це підтверджує актуальність, новизну та міжнародне визнання отриманих результатів. Принципи академічної доброчесності у публікаціях дотримані повною мірою. Для кожної праці, опублікованої у співавторстві, здобувачем чітко визначено особистий внесок. Аналіз цих внесків показує, що здобувач брав безпосередню участь у формулюванні концептуальних підходів, розробці та введенні ключового поняття когнітивної алгебраїчної системи як математичного формалізму, пропонував архітектурні рішення для розподілених систем, обґрунтовував використання безконфліктних реплікованих типів даних для узгодження інформації про стани вузлів електроенергетичних мереж, а також планував та брав участь у проведенні експериментальних досліджень. Таким чином, особистий внесок здобувача є вагомим, відповідає основному

змісту та науковим положенням дисертаційної роботи і підтверджує самостійність отриманих наукових результатів.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі висвітлені у наукових публікаціях здобувача повно та ґрунтовно.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Незважаючи на високий науковий рівень та актуальність проведеного дослідження, можна виокремити кілька аспектів, які потребують додаткової уваги або могли б бути розкриті більш детально:

1. На мою думку, запропонована в підрозділі 2.3 КАС є потужним, але водночас абстрактним математичним апаратом. Для практичного впровадження цієї моделі інженерами та розробниками було б доцільно навести більше прикладних ілюстрацій та спрощених сценаріїв, які б демонстрували, як саме конкретні фізичні обмеження та операційні правила ЕЕМ відображаються на елементах КАС – носії А, операціях Л та відношеннях Р. Це полегшило б розуміння та подальше застосування розробленої моделі.
2. У розділі 3.2 згадується можливість динамічної зміни вагових коефіцієнтів w_i та w_j у метриці відстані, що дозволило б вузлам адаптуватися до змін контексту. Це перспективна ідея, однак у роботі не розкрито конкретний механізм або алгоритм такої адаптації, хоча зазначено, що відповідні коефіцієнти визначаються згідно внутрішнім та зовнішнім цілям в рамках ВТО.
3. У розділі 2.3 зазначено, що алгебраїчна система (АС) є узагальненням алгебраїчних структур. Насправді незрозуміло, чому це вважається узагальненням, бо з контексту випливає, що АС є, можливо, частковим випадком, але ніяк не узагальненням. Крім того, в загальноприйнятій літературі терміни «алгебраїчна система» та «алгебраїчна структура» вживаються як синоніми, тому не слід вживати загальноприйнятий термін для визначення якогось нового об'єкту.
4. Хоча в роботі згадується проблема кібербезпеки та візантійських збоїв, а також розглядаються напрямки досліджень у сфері безпечних CRDT, практична реалізація та експериментальне дослідження не враховують сценарії зі зловмисними вузлами, окрім визначеного алгоритму оцінки аномальності переходу між підстанами вузла. Демонстрація стійкості запропонованого семантичного шару до цілеспрямованих атак на дані значно посилила б практичну цінність отриманих результатів.
5. В роботі було описано оцінку аномальності переходу підстанів вузла на основі Марківського ланцюга, зокрема, виявлення аномалій як послідовностей переходів з надзвичайно низькою сукупною ймовірністю, але не представлено відповідних результатів досліджень або прикладів,

які би могли підтвердити доцільність використання такого підходу для організації сукупності підстанів та переходів між ними.

6. В тексті дисертаційної роботи подекуди зустрічаються стилістичні та граматичні помилки, а також некоректні переклади термінів. Наприклад, стор. 72: «спільну вузлові об'єднання», стор. 76: «кінцевоарних» замість «скінченноарних», «відносин» замість «відношень», «не пусту» замість «непорожню», тощо.

Вказані зауваження не применшують загальної наукової та практичної значущості дисертаційної роботи, а радше вказують на можливі напрямки для її подальшого розвитку. Робота є завершеним, логічно-зв'язним дослідженням, що пропонує оригінальне та обґрунтоване вирішення актуального наукового завдання.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії 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» 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 Примушко Арсентій Миколайович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Рецензент:

провідний науковий співробітник
відділу математичного та комп'ютерного
моделювання Інституту проблем
моделювання в енергетиці
ім. Г.Є. Пухова НАН України,
д.т.н., проф.

Людмила КОВАЛЬЧУК