

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова
Національна академія наук України

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПРИМУШКО АРСЕНТІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 620:658.6:(004.77+004.62):(004.8+512)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛЬ СИНТАКСИЧНО-СЕМАНТИЧНОГО УЗГОДЖЕННЯ
ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАНИ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ТА
БЕЗКОНФЛІКТНИХ РЕПЛІКОВАНИХ ТИПІВ ДАНИХ**

122 – Комп'ютерні науки
12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 / Арсентій ПРИМУШКО

Науковий керівник:

Кравцов Григорій Олексійович, кандидат технічних наук

АНОТАЦІЯ

Примушко А.М. Модель синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів електроенергетичних мереж на основі теорії інтелектуальних систем та безконфліктних реплікованих типів даних. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп’ютерні науки. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ, 2025.

Дисертація є комплексним дослідженням з розробки, аналізу, оцінки та застосування комбінованої моделі синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів розподіленої і децентралізованої інтелектуальної електроенергетичної мережі на основі розробленої теорії когнітивної алгебраїчної системи та моделі безконфліктно реплікованих типів даних.

Інформаційну базу дослідження становили стандарти, наукові праці науковців України та світу, матеріали конференцій та виступів провідних спеціалістів. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, поділених на підрозділи, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Об’єктом дослідження є процеси передачі, обробки, зберігання та узгодження інформації про стан вузлів в розподілених, децентралізованих та інтелектуальних електроенергетичних мережах.

Предметом дослідження є модель та інформаційні технології узгодження даних про стан розподілених, децентралізованих та інтелектуальних електроенергетичних мережах на основі когнітивної алгебраїчної системи та безконфліктних реплікованих типів даних.

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.

В 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.

В другому розділі закладається теоретичний фундамент дослідження. Розглядаються властивості розподілених та децентралізованих інтелектуальних ЕЕМ в рамках CAP теорема. Вводиться поняття високорівневих топологічних об'єднань (ВТО) для спрощення формалізації процесів оцінки стану та відношень між вузлами ЕЕМ. ВТО інкапсулює фізичні та інформаційні гетерогенні характеристики низькорівневих компонентів, представляючи для зовнішнього спостерігача спрощену модель стану та поведінки системи.

Представлено когнітивну алгебраїчну систему (КАС) як формалізм для моделювання інтелектуальних КФС та вирішення завдання семантичного узгодження інформації про стани вузлів ЕЕМ. Завдяки своїй структурі, КАС дозволяє представити сукупність гетерогенних суб'єктів та об'єктів ЕЕМ як елементи носія A , їхні можливі дії як набір операцій Λ , а фізичні та логічні обмеження як систему відношень R . Взаємозв'язок між операціями, умовами їх виконання та ймовірностями реалізації визначає семантику в КАС, дозволяючи моделювати зважене, логічне “мислення” системи. Визначені метричні функції дозволяють кількісно оцінити відмінність між станами та контекстами, а умови консистентності забезпечують логічну несуперечливість суб'єктивної оцінки. Запропонований формалізм визначає основу для семантичного узгодження інформації, синтезу нового знання та представлення когнітивної діяльності в рамках ЕЕМ.

Розглянуто безконфліктні репліковані типи даних (CRDT) як низькорівневий, неблокуючий механізм реплікації інформації в розподілених системах, що відповідає AP моделі згідно CAP теорема та реалізує модель сильної кінцевої синтаксичної узгодженості. Математичні властивості операцій над CRDT (комутативність, асоціативність, ідемпотентність) гарантують, що стани всіх реплік з часом детерміновано збігатимуться. У дослідженні розглядаються CvRDT з дельта-реплікацією, CvRDT та CmRDT.

Для вирішення завдання синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем EEM обґрунтовується комбінована модель KAC-CRDT, що об'єднує високорівневе семантичне узгодження на основі KAC з низькорівневим синтаксичним узгодженням на основі CRDT. Запропонований формалізм надає гарантії синтаксично-семантичної узгодженості інформації з можливістю формальної верифікації, що включає оцінку траєкторії переходу між підстанами системи на основі визначеної функції, що оцінює аномальність переходу, та відповідну функцію корекції неузгодженого стану. На основі запропонованого формалізму було сформульовано та обґрунтовано ключові твердження щодо узгодженості. Це дозволило формалізувати основу для систем, що здатні до навчання та адаптації, що досягається за допомогою узгодженого переходу між підстанами системи на основі знань про підсистеми та їх співвідношення.

В третьому розділі формалізовано та верифіковано формальні властивості 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 розподілених 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 ЕЕМ.

В четвертому розділі розроблено програмну архітектуру програмного забезпечення на основі моделі акторів та парадигми функціонального програмування для моделювання розподілених та децентралізованих ЕЕМ. Для реалізації запропонованої архітектури використано інструментарій Akka та мову програмування Scala. Імплементовані CRDT типу OR-Set та LWW-Register з підтримкою дельта-реплікації для зменшення мережевого трафіку. Описано методику експериментальних досліджень та проведено імітаційне моделювання розподіленої ЕЕМ з урахуванням ВТО та моделі KAC-CRDT.

Аналіз результатів експериментів підтвердив ефективність запропонованої моделі KAC-CRDT, ріст синтаксично-семантичної узгодженості мережі та її підсистем а також зниження рівня інформаційної ентропії системи. Результати продемонстрували лінійну залежність між локальною щільністю мережі та часом реплікації стану вузла ЕЕМ, що свідчить про масштабованість підходу. Експерименти підтвердили гнучкість запропонованої моделі та доцільність її використання для вирішення завдання синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем ЕЕМ.

У висновках наведено отримані наукові та практичні результати дослідження.

Результати, отримані у дисертаційній роботі, можуть бути використані в існуючих системах оперативно-диспетчерського управління у вигляді окремого модуля узгодження даних для підвищення ефективності оцінки та управління в інтелектуальних мережах для зменшення інформаційної ентропії та неконсистентності даних в ході комунікації між підсистемами мережі. Доцільним є розширення та адаптація запропонованого підходу для інших класів складних кіберфізичних, розподілених систем, де висувуються високі вимоги до синтаксично-семантичної узгодженості даних. Отримані результати сприятимуть розвитку теорії та практики побудови інтелектуальних систем

оцінки та управління критичними інфраструктурами, зокрема, в електроенергетиці, шляхом створення науково обґрунтованого інструментарію для забезпечення інформаційної узгодженості.

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження підтверджується результатами експериментального дослідження, проведеного в рамках дисертаційного дослідження на основі розробленого застосунку, що дозволяє моделювати розподілені, децентралізовані інформаційні системи, їх комунікацію та процес синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем ЕЕМ.

Ключові слова: кіберфізичні системи, інформаційні системи, інтелектуальні системи, когнітивна алгебраїчна система, електроенергетична мережа, математична модель, виявлення аномалій, семантика, семантичне узгодження інформації, кластерна топологія, безконфліктно репліковані типи даних, реплікація, оцінка стану, ентропія інформаційних систем.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. G.O. Kravtsov, **A.N. Prymushko**, and V.I. Koshell, 'Koshell Combined Autoregressive-Neural Network Method for Predicting Time Series', *Elektron. model.*, vol. 42, no. 4, pp. 3–14, Aug. 2020, doi: 10.15407/emodel.42.04.003. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у формулюванні концептуального підходу та визначенні ключових вимог до комбінованої моделі, зокрема умови її побудови без залучення фахівця з машинного навчання).
2. G.A. Kravtsov, V.V. Levitin, V.I. Koshel', V. V. Nikitchenko, and **A.N. Primushko**, 'Strong Artificial Intelligence: Background Precondition', *Elektron. model.*, vol. 41, no. 5, pp. 35–58, Oct. 2019, doi: 10.15407/emodel.41.05.035. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробці теоретичних передумов створення сильного ШІ, провів аналіз застосовності онтологій як алгебраїчних структур та брав участь у проведенні натурних експериментів для валідації гіпотез).
3. G.A. Kravtsov, N.V. Kravtsova, O.V. Khodakovskaya, V.V. Nikitchenko, and **A.N. Prymushko**, 'Brain Mathematics and Language. I', *Elektron. model.*, vol. 43, no. 3, pp. 87–108, June 2021, doi: 10.15407/emodel.43.03.087. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – дослідив можливість розробки уніфікованої онтології, що описує предмети, дії, якості і відношення; провів дослідження природи контексту і подання його однозначними концептами уніфікованої онтології).
4. G.A. Kravtsov, N.V. Kravtsova, O.V. Khodakovskaya, V.V. Nikitchenko, and **A.N. Prymushko**, 'Brain Mathematics and Language. II', *Elektron. model.*, vol. 43, no. 4, pp. 69–88, Aug. 2021, doi: 10.15407/emodel.43.04.069. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь в розробці формальної моделі для опису предметів, дій та відношень у рамках розробки уніфікованої онтології, а також в описі механізму суб'єктивного

вибору семантичних категорій на основі їх релевантності в заданому контексті).

5. І.В. Пучко, **А.М. Примушко**, Г.О. Кравцов, ‘Розробка методичних рекомендацій використання функціональної парадигми програмування в мові Scala’, Електрон. моделювання, Т. 43, № 6, с. 95–106, 2021, doi: 10.15407/emodel.43.06.095. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у структуруванні та написанні методичних рекомендацій, зокрема в частині, присвяченій використанню операцій високого рівня для побудови декларативних програм).
6. Г.О. Кравцов, С.М. Гречко, В.В. Нікітченко, **А.М. Примушко**, ‘Когнітивна алгебраїчна система’, Електрон. моделювання, Т. 44, № 3, с. 14–30, 2022, doi: 10.15407/emodel.44.03.014. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробці та введенні поняття КАС як математичного формалізму для моделювання когнітивних агентів. Дослідив та описав механізм оцінки міри толерантності між контекстами когнітивної діяльності та об’єктами носія в рамках КАС).
7. **А.М. Примушко**, І.В. Пучко, М.С. Ярошинський, Д.П. Сінько, ‘Програмний дизайн розподіленої високонавантаженої системи електроенергетичної мережі на базі моделі акторів із застосуванням смарт-контрактів’, Електрон. моделювання, Т. 46, № 3, с. 57–72, 2024, doi: 10.15407/emodel.46.03.057. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – запропонував високорівневий дизайн розподіленої електроенергетичної системи на основі моделі акторів та кластерної топології. Провів аналіз типового навантаження на вузли кластерної системи, що стало основою для подальшої формалізації. Вивів формулу, що формалізує відношення між вузлами кластера на основі аналізу навантаження).
8. **A. Prymushko**, I. Puchko, M. Yaroshynskyi, D. Sinko, H. Kravtsov, and V. Artemchuk, ‘Efficient State Synchronization in Distributed Electrical Grid Systems Using Conflict-Free Replicated Data Types’, IoT, vol. 6, no. 1, p. 6,

Jan. 2025, doi: 10.3390/iot6010006. **Indexed in Scopus Q1.** (Особистий внесок – запропонував загальну структуру для розподілених електроенергетичних систем, що базується на безконфліктних реплікованих типах даних. Обґрунтував використання моделі конвергентних реплікованих типів даних з поширенням дельти-станів для оптимізації комунікації в системі. Брав участь у розробці фреймворку “Vigilant Hawk” на базі моделі акторів та інструментарію Akka для симуляції асинхронної природи DEGS. Спланував серію експериментів для дослідження впливу мережевих умов на ефективність синхронізації стану).

9. O. Sirotkin, **A. Prymushko**, I. Puchko, H. Kravtsov, M. Yaroshynskyi, and V. Artemchuk, ‘Parallel Simulation Using Reactive Streams: Graph-Based Approach for Dynamic Modeling and Optimization’, *Computation*, vol. 13, no. 5, p. 103, Apr. 2025, doi: 10.3390/computation13050103. **Indexed in Scopus Q2.** (Особистий внесок – брав участь в розробці математичної моделі для динамічного моделювання і оптимізації симуляції на основі графів та реактивних потоків з урахуванням попередньо визначених функцій переходу. Приймав участь у формалізації процесу переходу між станами системи на основі визначеної множини підстанів та ймовірностей переходу між ними).
10. M. Yaroshynskyi, **A. Prymushko**, I. Puchko, O. Sirotkin, and D. Sinko, ‘Akka as a tool for modelling and managing a smart grid system’, *J. Edge Comp.*, vol. 4, no. 1, pp. 105–115, May 2025, doi: 10.55056/jec.822. **Indexed in Scopus.** (Особистий внесок – проаналізував ключові виклики в управлінні інтелектуальними мережами та брав участь в розробці моделі управління інтелектуальною мережею на основі ієрархічної структури акторів Akka).
11. M. Yaroshynskyi, I. Puchko, **A. Prymushko**, H. Kravtsov, and V. Artemchuk, ‘Investigating the Evolution of Resilient Microservice Architectures: A Compatibility-Driven Version Orchestration Approach’, *Digital*, vol. 5, no. 3, p. 27, July 2025, doi: 10.3390/digital5030027. **Indexed in Scopus Q2.**

(Особистий внесок – брав участь в аналізі існуючих стратегій управління еволюцією API. Запропонував високорівневу концепцію зворотної сумісності мікросервісів за допомогою версіонування в контексті хеш функцій).

12. **А.М. Примушко**, ‘Конкурентне укладання та виконання умов смарт контрактів представлених у вигляді високорівневих функцій переходу між станами контракту за допомогою детонаційної семантики’, ХІІІ науково-технічна конференція молодих вчених Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, с. 69–72, Київ, Україна, 2023.
13. **A.M. Prymushko**, ‘The use of artificial intelligence methods for analyzing risk factors in the formation of smart contracts’, Матеріали круглого столу ‘Meaningful Artificial Intelligence’ Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, с. 4–6, Київ, Україна, 2024.
14. І.В. Пучко, **А.М. Примушко**, М.С. Ярошинський, Г.О. Кравцов, ‘Підвищення резильєнтності динамічних систем при синхронізації станів за допомогою CRDT’, Матеріали науково-практичної конференції ‘Резильєнтність динамічних систем, с. 50–52, Київ, Україна, 2024 URL: <https://ipme.kiev.ua/konferencii/naukovo-praktichna-konferenciya-rds-2024/>
15. **A. Prymushko**, M. Yaroshynskyi, and I. Puchko, ‘Representation and synchronization of states of distributed electrical grid systems based on conflict free replicated data types’, in 2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece: IEEE, Oct. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/DESSERT65323.2024.11122143.
Indexed in Scopus.

ANNOTATION

Prymushko A.M. A model for syntactic-semantic consistency of node state information in electrical power grids based on the theory of intelligent systems and conflict-free replicated data types. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis on receipt of doctor of philosophy (PhD) scientific degree of the specialty 122 “Computer science”. – G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2025.

This dissertation is a comprehensive study covering the development, analysis, evaluation, and application of a hybrid model for ensuring syntactic-semantic consistency of node state information within a distributed and decentralized intelligent electric power grid. The model is based on a newly developed theory of cognitive algebraic systems and the principles of conflict-free replicated data types.

The theoretical and informational basis of this research includes academic standards, scientific publications by Ukrainian and international scholars, conference proceedings, and materials from leading experts. The dissertation is composed of an introduction, four chapters divided into sub-sections, a conclusion, a list of references, and an appendix.

The object of this study is the processes of transmission, processing, storage, and reconciliation of node state information within distributed, decentralized, and intelligent electric power grids.

The subject of this research is the model and the associated information technologies for reconciling state data within distributed, decentralized, and intelligent electric power grids, founded on the principles of a cognitive algebraic system and conflict-free replicated data types.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the aim of the study, sets the research objectives, and defines the subject, object, and methods of investigation. Furthermore, it outlines the scientific novelty and the practical significance of the obtained results.

Chapter One provides a systematic analysis of the current state, development trends, and key operational challenges of modern electric power grids (EPG). The chapter examines the transformation of these grids into heterogeneous, distributed, and decentralized cyber-physical systems, along with their increasing digitalization and intellectualization, which results in an exponential growth in the volume of information. It addresses the problems of semantic data inconsistency and rising information entropy, as well as their impact on the operational efficiency of EPGs. Finally, the chapter analyzes existing approaches to data evaluation and reconciliation in intelligent EPGs, identifies their limitations, and substantiates the need for a new model capable of ensuring guaranteed eventual syntactic-semantic consistency of information regarding the states of nodes and subsystems within the EPG.

Chapter Two establishes the theoretical foundation for the research. It examines the properties of distributed and decentralized intelligent EPGs within the framework of the CAP theorem. The concept of High-Level Topological Aggregations (HLTAs) is introduced to simplify the formalization of state estimation processes and the relationships between EPG nodes. The HLTA encapsulates the heterogeneous physical and informational characteristics of low-level components, presenting a simplified model of the system's state and behavior to an external observer.

A cognitive algebraic system (CAS) is introduced as a formalism for modeling intelligent cyber-physical systems and for solving the problem of semantic reconciliation of node state information within EPGs. Due to its structure, the CAS allows for the representation of the heterogeneous subjects and objects within an EPG as elements of a carrier set A , their possible actions as a set of operations Λ , and the physical and logical constraints as a system of relations P . The interrelation between the operations, their execution conditions, and their implementation probabilities defines the semantics within the CAS, enabling the modeling of the system's weighted, logical "reasoning". Defined metric functions allow for the quantitative assessment of the difference between states and contexts, while consistency conditions ensure the logical coherence of a subjective assessment. The proposed

formalism provides the basis for semantic information reconciliation, the synthesis of new knowledge, and the representation of cognitive activity within the EPG framework.

Conflict-free replicated data types (CRDTs) are examined as a low-level, non-blocking mechanism for information replication in distributed systems. This approach aligns with the AP (Availability and Partition Tolerance) model of the CAP theorem and implements a model of strong eventual syntactic consistency. The mathematical properties of CRDT operations (commutativity, associativity, and idempotence) guarantee that the states of all replicas will deterministically converge over time. This research considers delta-replicated Convergent Replicated Data Types, standard CvRDTs, and Commutative Replicated Data Types (CmRDTs).

To address the challenge of syntactic-semantic consistency for node and subsystem state information in EPGs, a hybrid CAS-CRDT model is substantiated. This model integrates high-level semantic reconciliation based on CAS with low-level syntactic consistency based on CRDTs. The proposed formalism provides guarantees of syntactic-semantic information consistency with the capability for formal verification. This includes assessing the transition trajectory between system sub-states using a defined function that evaluates transition abnormality, along with a corresponding function to correct inconsistent states. Based on this formalism, key propositions regarding consistency have been formulated and substantiated. This has enabled the formalization of a foundation for systems capable of learning and adaptation, achieved through consistent transitions between system sub-states based on knowledge of the subsystems and their interrelations.

Chapter Three formalizes and verifies the formal properties of the described structure for an EPG node state, based on the combined CAS-CRDT model. This chapter describes a five-stage protocol for syntactic-semantic consistency, which incorporates an analysis of permissible transition trajectories between sub-states, syntactic-semantic validation, and the correction of inconsistent states. The core operations on the CAS-CRDT are defined and formalized. An example of syntactic-semantic reconciliation using the CAS-CRDT model is examined, and the

theoretical possibilities for its extension are discussed. Metrics are introduced for the quantitative assessment of data consistency in a distributed EPG, drawing upon the concept of Shannon's information entropy. It is demonstrated that the process of achieving consistency via the combined CAS-CRDT model is equivalent to reducing the system's total information entropy, which enhances the efficiency of EPG evaluation and control.

Chapter Four details the development of a software architecture based on the actor model and the functional programming paradigm for modeling distributed and decentralized EPGs. The Akka toolkit and the Scala programming language were used to implement the proposed architecture. CRDTs of the OR-Set and LWW-Register types were implemented with support for delta-replication to reduce network traffic. The methodology for the experimental research is described, and a simulation of a distributed EPG, incorporating HLTAs and the CAS-CRDT model, was conducted.

Analysis of the experimental results confirmed the effectiveness of the proposed CAS-CRDT model, demonstrating an increase in the syntactic-semantic consistency of the network and its subsystems, as well as a reduction in the system's information entropy. The results showed a linear relationship between local network density and the replication time of an EPG node's state, indicating the scalability of the approach. The experiments validated the flexibility of the proposed model and its suitability for solving the problem of syntactic-semantic consistency of state information for EPG nodes and subsystems.

The conclusions section presents the scientific and practical results obtained from the research.

The results obtained in this dissertation can be applied in existing operational dispatch and control systems as a separate data consistency module to enhance the efficiency of evaluation and control in intelligent grids by reducing information entropy and data inconsistency during communication between network subsystems. The extension and adaptation of the proposed approach to other classes of complex cyber-physical, distributed systems with high requirements for syntactic-semantic

data consistency is also advisable. The obtained results will contribute to the development of the theory and practice of building intelligent systems for the evaluation and control of critical infrastructures, particularly in the electric power sector, by creating a scientifically grounded toolkit for ensuring information consistency.

The practical value of the dissertation's findings is confirmed by the results of the experimental study, which was conducted using a custom-developed application. This application allows for the modeling of distributed, decentralized information systems, their communication processes, and the syntactic-semantic consistency of state information for EPG nodes and subsystems.

Keywords: cyber-physical systems, information systems, intelligent systems, cognitive algebraic system, electrical power grid, mathematical model, anomaly detection, semantics, semantic information consistency, cluster topology, conflict-free replicated data types, replication, state estimation, entropy of information systems.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ	28
1.1. Сучасний стан та тенденції розвитку ЕЕМ: перехід до кіберфізичних систем.....	28
1.2. Ключові особливості розвитку ЕЕМ: гетерогенність та розвиток технології інтелектуальних мереж.....	33
1.3. Ключові виклики узгодження стану в сучасних ЕЕМ.....	37
1.4. Проблеми інформаційної ентропії та неконсистентності даних в ЕЕМ..	44
1.5. Аналіз існуючих підходів до моніторингу та узгодження станів та їх обмеження.....	50
Висновки до першого розділу.....	60
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОГНІТИВНОЇ АЛГЕБРАЇЧНОЇ СИСТЕМИ ТА CRDT ДЛЯ СИНТАКСИЧНО-СЕМАНТИЧНОГО УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ.....	62
2.1. CAP: кінцева узгодженість в ЕЕМ.....	62
2.2. ВТО: високорівневі топологічні об'єднання.....	67
2.3. КАС: семантичне узгодження.....	74
2.4. CRDT: синтаксичне узгодження.....	90
2.5. Об'єднання КАС та CRDT в рамках ВТО.....	99
Висновки до другого розділу.....	114
РОЗДІЛ 3. СИНТАКСИЧНО-СЕМАНТИЧНЕ УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАНИ ВУЗЛІВ ТА ПІДСИСТЕМ ЕЕМ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ КАС-CRDT.....	116
3.1. Представлення станів компонентів (вузлів і підсистем) в розподіленій та	

децентралізований EEM.....	116
3.2. Преставлення стану EEM на основі формалізму KAC та CRDT.....	123
3.3. Операційна модель та формальна верифікація властивостей KAC-CRDT	128
3.4. KAC-CRDT: доповнення.....	136
3.5. Метрики для кількісної оцінки рівня узгодженості та інформаційної ентропії в системі.....	141
Висновки до третього розділу.....	147
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ KAC-CRDT.....	148
4.1. Застосування моделі акторів та принципів функціонального програмування для побудови системи узгодження.....	148
4.2. Застосування Akka та Scala для побудови системи узгодження.....	150
4.3. Застосування дельти стану KAC-CRDT для реплікації в системі узгодження.....	152
4.4. Методика проведення експериментальних досліджень на основі моделі KAC-CRDT в розподіленій EEM.....	154
4.5. Аналіз результатів експериментального дослідження.....	159
Висновки до четвертого розділу.....	166
ВИСНОВКИ.....	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	172
ДОДАТОК А.....	213
ДОДАТОК Б.....	218

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

ЕЕМ – електроенергетична мережа

КФС – кіберфізична система

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ІІІ – штучний інтелект

АС – алгебраїчна система

РЕ – розумна/інтелектуальна енергосистема/мережа (Smart Grid)

ML – Machine Learning (машинне навчання)

P2P – Peer-To-Peer (однорангові *в контексті мереж)

IoT – Internet of Things (інтернет речей)

CIM – Common Information Model (загальна інформаційна модель)

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасні інтелектуальні електроенергетичні мережі стрімко трансформуються у складні кіберфізичні системи (КФС), що характеризується високим ступенем розподіленості, динамічності та гетерогенності. Інтеграція технології розумних мереж (РЕ), IoT, розподілених потужностей генерації електроенергії (РГЕ), зокрема відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), популяризація нових, гнучких моделей ринково-економічних відносин, як от ринок на добу наперед та використання смарт-контрактів, розгалуженість топології генеруючих та споживчих потужностей, а також високі вимоги до безпеки, резильєнтності, адаптивності та спостережуваності, призводять до експоненційного зростання обсягів даних та кількості взаємодіючих вузлів, кожен з яких має свою пропрієтарну технологію, протоколи, способи інтеграції та взаємодії з мережею. Наявність узгодженої інформації про поточний стан системи та здатність до її оперативної обробки є фундаментальною передумовою для забезпечення ефективного функціонування, надійного управління та координації таких систем.

Розбіжності між детальними даними про стан окремих компонентів та агрегованою інформацією про мережу на різних ієрархічних рівнях управління електроенергетичними мережами (ЕЕМ) призводять до зростання інформаційної ентропії. Це, в свою чергу, підвищує загальну невизначеність щодо актуального стану системи та ускладнює його адекватну оцінку. Це суттєво ускладнює процеси моніторингу, адекватної оцінки стану та прийняття виважених управлінських рішень, що, в свою чергу, може призвести до операційних помилок, зниження надійності та економічної ефективності функціонування ЕЕМ. Централізовані методи управління не в змозі впоратися з цими викликами в умовах децентралізації, високосокої динаміки процесів, частотої зміни кон'юнктури мережі та необхідності обробки даних в режимі наближеному до реального часу.

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 актуальним науковим завданням. В таких умовах здатність системи до ефективної адаптації є питанням національної безпеки. Проте, ефективне оперативне управління, спрямоване на компенсацію виведених з ладу вузлів системи за рахунок маневрових потужностей, включаючи розподілену генерацію, неможливе без точного, повного та, що найважливіше, узгодженого бачення поточного стану як окремих вузлів так і енергосистеми в цілому. Неузгодженість та неоднорідність даних унеможлиблює координацію управлінських дій та динамічну реорганізацію топології системи, що може призвести до дестабілізації та критичних помилок в роботі енергомережі.

Застосування формалізму когнітивної алгебраїчної системи (КАС) дозволяє розробити нові, більш ефективні моделі для вирішення зазначеного завдання. КАС, як формальний апарат для моделювання інтелектуальних кіберфізичних систем, представлення знань, моделювання станів та визначення операцій над ними, а також правил їх семантичного узгодження, знаходить своє застосування для обґрунтованого та високоефективного проектування семантично насичених ЕЕМ. Це дозволяє об'єднати наявні та попередити появу нових децентралізованих форм організації й управління ЕЕМ на місцевому та державному рівнях, що відповідають сучасним викликам та орієнтуються на передові тенденції технологічного розвитку.

КАС, що визначає семантику та теорію узгодження знань, та безконфліктно реплікованих типів даних (CRDT), що забезпечують механізми узгодженої реплікації даних, в синергії дозволять глибше зрозуміти природу процесів функціонування КФС, забезпечити синтаксично-семантичну узгодженість інформації про стани вузлів та підсистем ЕЕМ, що веде до зниження інформаційної ентропії в ході міжвузлової комунікації. Це дозволить оцінювати діяльність та прогнозувати поведінку енергосистеми, що, в підсумку, підвищує ефективність функціонування ЕЕМ.

Практичне значення досліджуваної проблеми та її недостатнє науково-теоретичне опрацювання обумовили актуальність проведення дисертаційного дослідження.

Таким чином, розробка комбінованої моделі синтаксично-семантичного узгодження інформації про стан вузлів та підсистем ЕЕМ, що базується на поєднанні формалізму КАС та моделі CRDT, є актуальним науковим завданням. Вирішення поставленого завдання спрямоване на підвищення надійності, керованості, безпеки та ефективності функціонування як сучасних, так і майбутніх електроенергетичних систем в умовах їх поступової децентралізації, інтелектуалізації та цифровізації.

Мета й задачі дослідження. Метою дослідження є розробка 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. Можна виділити наступні **задачі дослідження:**

1. Провести аналіз проблем узгодження інформації про стани вузлів в сучасних ЕЕМ та існуючих підходів до їх вирішення.
2. Виділити формальну основу для визначення процесів когнітивної (інтелектуальної) діяльності системи оцінки та функціонування ЕЕМ шляхом розробки математичного формалізму когнітивної алгебраїчної системи для моделювання інтелектуальних КФС.
3. Адаптувати CRDT для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості даних про стан вузлів та підсистем ЕЕМ.
4. Розробити комбіновану модель на основі КАС та CRDT, що об'єднує високорівневе семантичне узгодження на основі КАС з низькорівневим синтаксичним узгодженням на основі CRDT.

5. В рамках запропонованої моделі KAC-CRDT визначити критерій та формалізувати процес синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем EEM.
6. Описати метод представлення стану вузла EEM з урахуванням статичних та динамічних властивостей, що може бути використаний для розробленої комбінованої моделі узгодження на основі KAC-CRDT.
7. Розробити метрики для кількісної оцінки рівня синтаксично-семантичної узгодженості інформації в контексті запропонованої моделі KAC-CRDT та інформаційної ентропії в EEM.
8. Дослідити доцільність використання принципів функціонального програмування та моделі акторів для реалізації експериментального дослідження процесу узгодження інформації про стан вузлів EEM визначеного в термінах формалізму KAC-CRDT.
9. Провести експериментальне дослідження моделі KAC-CRDT на прикладі сценаріїв функціонування розподіленої EEM під час збурення.

Об'єктом дослідження є процеси передачі, обробки, зберігання та узгодження інформації про стан вузлів в розподілених, децентралізованих та інтелектуальних електроенергетичних мережах.

Предметом дослідження є модель та інформаційні технології узгодження даних про стан розподілених, децентралізованих та інтелектуальних електроенергетичних систем на основі когнітивної алгебраїчної системи та безконфліктних реплікованих типів даних.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі при розв'язанні поставлених наукових задач використовувалися методи системного і функціонального аналізу, математичного моделювання, теорії алгебраїчних систем, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії алгоритмів, теорії розподілених систем, теорії баз даних і багатовимірному аналізу даних, методи

штучного інтелекту, методи дослідження операцій, об'єктно-орієнтованого програмування, планування наукового експерименту та обробки його результатів тощо.

Наукова новизна. В дисертаційній роботі отримано наступні 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.

Теоретичне значення роботи полягає у розвитку теоретичних основ управління складними кіберфізичними системами шляхом розробки нової науково-обґрунтованої моделі, що базується на синергетичному поєднанні когнітивної алгебраїчної системи (КАС) та безконфліктних реплікованих типів даних (CRDT). Запропонована модель дозволила вперше формалізувати процеси інтелектуального узгодження знань про вузли та підсистеми ЕЕМ, розділивши семантичний рівень консистентності, що описується алгебраїчно в

рамках КАС, від механізмів гарантованої синтаксичної узгодженості даних на фізичному рівні, що реалізуються на основі CRDT. Це закладає теоретичні основи для створення нового класу верифікованих, семантично насичених та відмовостійких систем розподіленої оцінки та управління сучасними ЕЕМ.

Практичне значення отриманих результатів 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і

техніки в Україні. 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.).

Особистий внесок здобувача. Наукові результати дослідження, які виносяться на захист, одержані автором самостійно.

Публікації. Наукові результати та висновки дисертаційного дослідження підтверджуються публікаціями у наукових виданнях та їх апробацією на науково-практичних конференціях. Опубліковано 15 наукових праць. У тому числі 7 наукових статей опубліковано у фахових виданнях України, 4 статті індексовані в міжнародній науково-інформаційній базі Scopus, 4 тез доповідей на всеукраїнських і міжнародній науково-технічних конференціях.

Апробація результатів дослідження. Результати дисертаційного дослідження доповідались на науково-практичних конференціях:

1. **А.М. Примушко**, ‘Конкурентне укладання та виконання умов смарт контрактів представлених у вигляді високорівневих функцій переходу між станами контракту за допомогою детонаційної семантики’, XLI науково-технічна конференція молодих вчених Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, с. 69–72, Київ, Україна, 2023.
2. **A.M. Prymushko**, ‘The use of artificial intelligence methods for analyzing risk factors in the formation of smart contracts’, Матеріали круглого столу

‘Meaningful Artificial Intelligence’ Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, с. 4–6, Київ, Україна, 2024.

3. І.В. Пучко, **А.М. Примушко**, М.С. Ярошинський, Г.О. Кравцов, ‘Підвищення резильєнтності динамічних систем при синхронізації станів за допомогою CRDT’, Матеріали науково-практичної конференції ‘Резильєнтність динамічних систем, с. 50–52, Київ, Україна, 2024 URL: <https://ipme.kiev.ua/konferencii/naukovo-praktichna-konferenciya-rds-2024/>
4. **A. Prymushko**, M. Yaroshynskyi, and I. Puchko, ‘Representation and synchronization of states of distributed electrical grid systems based on conflict free replicated data types’, in 2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece: IEEE, Oct. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/DESSERT65323.2024.11122143.

Indexed in Scopus.

Обсяг та структура роботи. Дисертаційне дослідження складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 221 сторінки (основний зміст роботи викладено на 171 сторінках). Дисертація містить 2 таблиці, 3 рисунки, 2 додатки. Список використаних джерел включає 349 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Сучасний стан та тенденції розвитку ЕЕМ: перехід до кіберфізичних систем

Сучасний етап розвитку ЕЕМ характеризується переходом від традиційних, ієрархічно централізованих інфраструктур [1] з односпрямованими потоками енергії до децентралізованих, розподілених та гетерогенних КФС [2–4]. Цей перехід відображає взаємозв'язок обчислювальних алгоритмів та фізичних процесів, що формують цикл “вимірювання-управління-реакція”. Модель, що базувалася на прогнозованості керованих генераторів та відносно пасивного навантаження підходить для управління магістральними мережами за допомогою систем управління енергією та оцінювання стану, проте, не відповідає тенденціям розвитку сучасних розподілених мереж [5, 6], що з пасивних, радіальних структур, трансформуються в активні, сітчасті та стохастичні системи, поведінка яких визначається мільйонами незалежних агентів [7].

Процес зумовлений конвергенцією фізичного світу енергетики з цифровими технологіями, що виражається в інтеграції мільйонів інтелектуальних пристроїв. Серед них:

- Інфраструктура розширеного обліку (AMI) [8], що забезпечує двосторонній потік даних (показання споживання, інформація про якість напруги, сповіщення про збої) та дозволяє реалізовувати динамічні тарифи [9] і програми управління попитом [10]. Це перетворює облік на інструмент активного управління мережею.
- Векторні вимірювальні блоки (PMU), які є основою широкомасштабних систем моніторингу (WAMS) [11]. Вони надають високоточні, синхронізовані за часом (завдяки GPS) вектори напруги та струму з високою частотою, дозволяючи ідентифікувати джерело коливань та верифікувати динамічні моделі системи в реальному часі. Це підвищує

рівень "ситуаційної спостережуваності мережі", дозволяючи виявляти міжсистемні коливання потужності та проводити точний післяаварійний аналіз. Наприклад, аналіз даних PMU дозволяє з точністю до мілісекунд визначити послідовність подій під час каскадної аварії, що раніше було неможливо.

- Розподілені енергетичні ресурси (DER) [12, 13], такі як сонячні панелі на дахах, вітрові турбіни, та стаціонарні системи накопичення енергії (BESS) [14], що інтегруються на рівні низької та середньої напруги. Їхні інвертори можуть функціонувати як у режимі "слідування за мережею", так і в режимі "формування мережі", що дозволяє їм, за потреби, створювати локальну стабільну напругу, наприклад, у островному режимі роботи мікромережі, забезпечуючи живлення критичних навантажень під час блекауту. Ця важливо для підвищення резильєнтності на локальному рівні.
- Електромобілі з технологією Vehicle-to-Grid (V2G) [15, 16], що перетворюють пасивних споживачів на просяumerів [17, 18]. Мільйони електромобілів являють собою величезний, хоч і географічно розподілений, мобільний ресурс для зберігання енергії. Для їх ефективної інтеграції необхідні інтелектуальні системи управління зарядкою, які враховуватимуть як потреби водія, так і потреби мережі.

Ця насичена сенсорами інфраструктура у поєднанні зі значними обчислювальними потужностями (хмарними та периферійними), дозволяє генерувати безпрецедентні обсяги даних. Важливим інструментом для роботи з такою складною системою стають цифрові двійники (Digital Twins) [19, 20] – “копія” мережі в спеціалізованому програмному забезпеченні, що наповнене даними про електромережі, їхні характеристики, потужності та категорії надійності клієнтів. Вони дозволяють проводити симуляції та оптимізувати режими роботи без ризику для реальної мережі. Цифровий двійник трансформатора, наприклад, може використовувати дані з датчиків температури

та вібрації для прогнозування його залишкового ресурсу та планування обслуговування, враховуючи стан, а не фіксований графік.

Каталізаторами таких змін виступають синергетичний розвиток програмного забезпечення [21], технологій хмарних та периферійних обчислень, IoT [22] та мереж комунікації (оптоволокну, 5G). Периферійні обчислення відіграють важливу роль, дозволяючи виконувати аналітику та приймати рішення на локальному рівні (наприклад, контролер на підстанції може за мілісекунди ізолювати пошкоджену ділянку, не чекаючи команди з центрального диспетчерського пункту), що мінімізує затримки. Такі системи оперують обладнанням на основі складних алгоритмів штучного інтелекту та нечіткої логіки. Однак інтеграція розподіленої енергогенерації та ресурсів [23], особливо ВДЕ [24, 25], створює низку технічних викликів:

- Двонаправлені потоки потужності, що порушують селективність традиційних систем релейного захисту, розрахованих на те, що струм короткого замикання завжди тече в одному напрямку – від джерела до споживача. Це може призвести до помилкових спрацьовувань або, навпаки, до відмови захисту, що загрожує пошкодженням обладнання. Вирішення цієї проблеми вимагає переходу до адаптивних схем захисту, що використовують комунікації для обміну даними між пристроями [26, 27].
- Неконтрольоване зростання струмів короткого замикання, що може перевищувати вимикаючу здатність існуючого комутаційного обладнання, вимагаючи його дорогої заміни [28, 29].
- Деградація якості електроенергії через гармонійні спотворення, що вносяться силовими інверторами, які перетворюють постійний струм від сонячних панелей чи батарей на змінний. Це може спричиняти перегрів нейтральних провідників та збої в роботі чутливого електронного обладнання [30, 31].

- Висока стохастичність та мінливість генерації, що ускладнює прогнозування та вимагає наявності значних гнучких резервів для балансування системи [32–34].

Активне впровадження технології інтелектуальних мереж (Smart Grid) [35] виступає концептуальною основою для агрегації всіх цих елементів у єдину, адаптивну екосистему, здатну до самовідновлення через автоматизовані процедури локалізації ушкоджень та пере конфігурації мережі (FDIR) [36, 37]. Це підвищує вимоги до надійності, резильєнтності та кібербезпеки. Розширення поверхні атак через мільйони IoT-пристроїв створює нові загрози, від маніпуляції даними [38], що можуть зкомпроментувати систему управління та спричинити перевантаження елементів ЕЕМ, до скоординованих атак на критичні вузли системи [39]. У КФС будь-який збій чи зловмисне втручання в кібернетичному домені може мати руйнівні фізичні наслідки.

Описана трансформація є не просто технологічною, а й соціотехнічною. Зміна ролі споживача на активного просюмера [18] створює нові поведінкові моделі та ринкові механізми:

- Однорангова P2P торгівля енергією дозволяє домогосподарствам безпосередньо торгувати надлишками енергії, минаючи традиційних посередників [40].
- Транзакційна енергія використовує ринкові сигнали (динамічну ціну) для децентралізованої координації мільйонів пристроїв, які автономно оптимізують свою роботу [41].
- Віртуальні моделі просюмерів для торгівлі енергією та допоміжними послугами (наприклад, регулювання частоти) на ринку [42].

Для автоматизації таких ринкових взаємовідносин все частіше застосовуються технології розподіленого реєстру та смарт-контрактів [43], [44]. Це зумовлює появу бізнес моделей, що фокусуються на наданні послуг [45, 46], коли споживач платить за фактом спожитої енергії. Як наслідок, дані стають настільки ж важливими, як і енергія, відповідно, енергетичні компанії

трансформуються у компанії з обробки даних, створюючи цінність завдяки аналітиці та інтелектуальному управлінні.

Однією з проблем залишається забезпечення інтероперабельності між обладнанням та платформами від різних виробників. Це стосується створення єдиного семантичного простору на основі стандартів, як-от CIM [47, 48], для однозначної інтерпретації даних. Без цього інтеграція систем перетворюється на дорогий та тривалий процес індивідуальної розробки, що гальмує впровадження інновацій.

Перехід до КФС змінює підходи до забезпечення стійкості системи. В новій парадигмі стійкість стає функцією програмних алгоритмів. Сучасна ЕЕМ проявляє властивості адаптивних систем [49], де глобальна поведінка виникає емерджентно з локальних взаємодій мільйонів автономних агентів. Управління такими системами вимагає переходу від спеціалізованих до адаптивних алгоритмів на основі когнітивних підходів [50, 51], а поняття “стабільності” еволюціонує до резильєнтності [52] – здатності системи адаптуватися, поглинати збурення, зберігати критичні функції, швидко відновлюватися та самоорганізовуватися.

Таким чином, увесь комплекс зазначених змін свідчить про перехід від централізованих та монолітних фізичних структур до складних, адаптивних КФС, що оперують великими масивами даних у режимі реального часу. Це, у свою чергу, вимагає розробки нових, міждисциплінарних науково-методологічних підходів до їх аналізу, моделювання та синтезу, що лежать на перетині теорії управління, кібернетики, науки про дані та соціально-економічних наук, і навчання нового покоління фахівців, що однаково вільно володіють енергетикою та інформаційними технологіями.

Отже, дослідження та розробка нових методів та моделей оцінки та узгодженості складних, інтелектуальних КФС в контексті ЕЕМ є актуальним науковим завданням.

Бачимо, що сучасні електроенергетичні системи еволюціонують у напрямку складних кіберфізичних екосистем. Цей процес пов'язаний з двома

взаємодоповнюючими аспектами. По-перше, це зростання гетерогенності системи, зумовлене впровадженням мільйонів різнорідних інтелектуальних пристроїв та розподілених, зокрема й відновлювальних, енергетичних ресурсів. По-друге, це розвиток технології РЕ як концептуальної та інструментальної відповіді на виклики, породжені цією складністю. Розуміння цих особливостей є необхідною умовою для розробки ефективних методів функціонування сучасних ЕЕМ, про що йтиметься в наступному підрозділі.

1.2. Ключові особливості розвитку ЕЕМ: гетерогенність та розвиток технології інтелектуальних мереж

Як було зазначено у попередньому підрозділі розвиток сучасних ЕЕМ визначається переходом від централізованих, передбачуваних систем до значно складніших, гетерогенних та подекуди де організованих структур. Ріст кількості джерел та обсягів інформації, ускладнення автоматизації та взаємодії між програмним і апаратним рівнями системи призводять до її високої неоднорідності. Інтеграція ВДЕ та IoT, а також перехід до функціонування у просторі кіберфізичних, взаємопов'язаних систем, зумовлює появу гібридних моделей організації та вимагає активного впровадження технології інтелектуальних мереж для відповідності сучасним вимогам до функціонування розподілених та децентралізованих систем [53–55]. Інтелектуальні мережі є результатом послідовної еволюції сучасних ЕЕМ, надаючи інструменти аналізу, оцінки та управління складними вузловими з'єднаннями, враховуючи стохастичну природу інтегрованих джерел енергії та соціально-економічні потреби суспільства. Тому розвиток ЕЕМ має розглядатися в розрізі інтелектуальних мереж з високою гетерогенністю, яка, в свою чергу, є наслідком зростання інтеграційно-реалізаційної складності [56].

Для повного розуміння цієї еволюції важливо розрізняти поняття “розподіленості” та “децентралізованості” систем. Децентралізована система є специфічним підкласом розподіленої системи, головною характеристикою якої є відсутність єдиного центру управління та прийняття рішень [57–59]. У той час

як у багатьох розподілених системах може існувати центральний координатор, який керує роботою вузлів, у децентралізованій системі контроль та повноваження розподілені між усіма учасниками мережі. Кожен вузол у такій системі є рівноправним і бере участь у підтримці мережі та верифікації транзакцій без необхідності довіряти третій стороні. Таким чином, система може бути розподіленою без децентралізації і навпаки, хоча багато децентралізованих систем є розподіленими за своєю природою. Розподіленість вирішує задачі організації та координації, тоді як децентралізація вирішує задачі контролю та довіри [60]. Завдання досягнення узгодженості в децентралізованому середовищі є причиною розробки складних алгоритмів консенсусу [61, 62], що лежать в основі сучасних децентралізованих мереж. Будь-який консенсус неможливий без узгодженого бачення елементами мережі усієї мережі, тому процеси інтелектуального узгодження на основі складних синтаксично-семантичних структур відіграють ключову роль в процесах оцінки та ефективного функціонування інтелектуальних мереж.

ЕЕМ створена за централізованою моделлю може бути ефективною в умовах стабільного попиту, але має суттєві недоліки, такі як висока залежність від централізованої комунікації, низька масштабованість та висока вартість інтеграції нових елементів. Сьогодні ця модель зазнає кардинальних змін через зростання гетерогенності [63], що проявляється на всіх рівнях. Головною причиною є впровадження розподілених енергетичних ресурсів [64, 65], зокрема ВДЕ, таких як сонячні та вітрові електростанції [66]. Ці джерела є децентралізованими, масштабованими та нестабільними, оскільки їхня генерація залежить від погодних умов і не завжди збігається з піками споживання. Це призводить до двонаправлених потоків енергії, коли споживачі можуть продавати надлишки в мережу, створюючи технічні виклики для стабільності напруги, частоти та роботи систем захисту.

Керування такою складною мережею неможливе без цифровізації та збору даних у реальному часі, що призвело до експоненційного зростання обсягів інформації [67–69]. Ключовими технологіями тут є розширена

інфраструктура вимірювання з розумними лічильниками [70], PMU [71] для високошвидкісного моніторингу стану мережі та мільйони IoT датчиків, що дозволяють перейти до прогнозного обслуговування обладнання. Цей потік даних є занадто об'ємним для поширених систем автоматизації, як-от SCADA [72–74]. У відповідь з'явилися системи управління розподілом (ADMS)[75] – інтегровані програмні платформи, що використовують дані з AMI та PMU, а також алгоритми ШІ та ML для автоматичного виявлення та усунення несправностей, оптимізації напруги, прогнозування навантаження та генерації ВДЕ, а також координації розподілених енергетичних ресурсів.

Інтелектуальна мережа [76–81] є загальною концепцією, що об'єднує всі ці технології для створення саморегульованої, стійкої та ефективної енергосистеми. Ідея полягає у відокремленні специфікації, створення та контролю послуг від фізичних комутаційних мереж, що дозволяє операторам швидко впроваджувати нові сервіси у відповідь на ринкові потреби. Інтеграція програмних рішень та апаратного забезпечення від різних виробників породжує дві проблеми. По-перше, це функціональна сумісність – відсутність “спільної мови” між обладнанням. Для її вирішення розроблені міжнародні стандарти, як от IEC 61850 [26], який визначає об'єктно-орієнтовану модель даних та стандартизовані протоколи зв'язку, дозволяючи пристроям різних виробників взаємодіяти.

По-друге, це кібербезпека. Підключення мільйонів нових пристроїв до мережі створює величезну поверхню атаки, роблячи систему вразливою до зловмисних дій, як от відключення споживачів через злом SCADA та маніпуляцією ринком через ін'єкцію хибних даних. Забезпечення безпеки вимагає комплексного підходу, що базується на принципах конфіденційності, цілісності та доступності, включаючи шифрування, автентифікацію, моніторинг мережі за допомогою систем виявлення вторгнень та сегментацію.

При цьому, зростання попиту на інструменти на основі штучного інтелекту є потужним соціо-економічним каталізатором, що прискорює трансформацію сучасних ЕЕМ. Підвищена потреба у дешевій та стабільній

електроенергії для живлення енергоємних обчислювальних процесів стимулює фундаментальні зміни в структурі генерації та зберігання енергії. Це призводить до реінтеграції та модернізації складних об'єктів ядерної генерації як надійного базового джерела [82], а також до розгортання масивних батарейних систем зберігання [83] для акумулювання надлишкової енергії та згладжування піків навантаження. Одночасно відбувається розбудова потужних дата-центрів, необхідних для обробки величезних обсягів даних, що генеруються користувачами програмного забезпечення, особливо того, яке базується на алгоритмах глибокого навчання та вимагає значних обчислювальних потужностей. Кон'юнктура соціо-економічної активності користувачів напрямку впливає на морфізм сучасних ЕЕМ, перетворюючи їх на гетерогенні КФС, де інтелектуальне управління на основі технології РЕ необхідне для забезпечення стабільності та ефективності функціонування.

Таким чином, еволюція сучасних ЕЕМ є незворотним процесом переходу від централізованих гомогенних структур до складних, гетерогенних та інтелектуальних КФС. Впровадження технологій інтелектуальних мереж, мультиагентних систем та штучного інтелекту є відпоовіддю на виклики, пов'язані з масовою інтеграцією розподілених енергетичних ресурсів та експоненціальним зростанням обсягів даних. Успіх цього переходу залежить від здатності інтегрувати нові джерела даних, впроваджувати передову автоматизацію, що базується на ШІ, вирішувати фундаментальні проблеми сумісності та безпеки, а також розробляти гнучкі архітектури придатні для забезпечення стабільності, надійності та ефективності. Всі елементи системи повинні мати єдине, узгоджене та достовірне уявлення про поточний стан мережі. Саме тому, після розгляду архітектурних особливостей та рушійних сил розвитку ЕЕМ, логічним є перехід до аналізу центральної проблеми їх функціонування. Успішна координація такої складної системи неможлива без ефективних механізмів досягнення спільного бачення стану, що робить узгодження інформації про стан вузлів ЕЕМ актуальним науковим завданням.

Відтак, наступний підрозділ буде присвячено дослідженню ключових викликів, пов'язаних із процесом узгодження стану в сучасних гетерогенних ЕЕМ.

1.3. Ключові виклики узгодження стану в сучасних ЕЕМ

Відповідно до висновків попереднього підрозділу, ключовою особливістю розвитку сучасних ЕЕМ є їхня трансформація в інтелектуальні мережі, що потребують узгодженості та інтеперабельності всіх підсистем. Вищезазначені тенденції та перетворення ЕЕМ на КФС породжують низку викликів, які концентруються навколо багатовимірного завдання узгодження стану. Проблема полягає в тому, що узгодженість має досягатися одночасно на двох рівнях [84]: семантичному (узгодження концептуальних моделей та підходів до управління) та синтаксичному (узгодження протоколів та форматів даних між фізичними пристроями).

На найвищому, семантичному рівні, ключовий виклик полягає у фундаментальній несумісності моделей, необхідних для опису ЕЕМ [85, 86]. В одній системі змушені співіснувати моделі з неперервним часом для фізичної динаміки, з дискретними подіями для логіки захисту та економіко-поведінкові моделі для ринку. Ці підходи, по суті, говорять різними “концептуальними мовами”, і їх інтеграція в єдину структуру мережі залишається невирішеною проблемою. Цей семантичний розрив означає, що навіть за наявності повних даних від усіх вузлів, не існує єдиного способу інтерпретувати їх у цілісну та несуперечливу картину стану всієї системи. Семантична узгодженість є фундаментальною основою ефективних інтелектуальних мереж, адже семантичність, по суті, виражає інтелектуальну зв'язність [87]; відповідно, без семантичної узгодженості неможливо будувати зв'язні інтелектуальні системи. Ця проблема поглиблюється надмірною сфокусованістю сучасних методів обробки інформації на вузькоспеціалізованих завданнях, що не супроводжується створенням взаємопов'язаних інтерфейсів чи узагальнених архітектур, здатних інтегрувати напрацювання вчених із суміжних напрямків. Така фрагментація є прямим наслідком стрімкого, проте нерівномірного

розвитку ЕЕМ, під час якого окремі технологічні рішення для прогнозування, управління чи безпеки розвиваються паралельно, але ізольовано.

У контексті даного дослідження, інтелектуальність розглядається крізь призму когнітивної діяльності людини та, відповідно, функцій, які здатні виконувати вузли, підсистеми та система в цілому. Поняття штучного інтелекту слід трактувати як процес надання функціоналу, співставного з результатом когнітивної діяльності людини. Таке трактування дозволяє виділити рівні інтелектуальності системи, де система є тим більш інтелектуальною, чим більшою є потужність множини її функцій, що знаходять когнітивне відображення у процесах мислення людини.

Розвиток сучасних енергомереж зумовлений необхідністю вирішення проблем, що виникають внаслідок глобальної декарбонізації та інтеграції відновлюваних і розподілених енергетичних ресурсів [88]. Оснащені “розумними” трансформаторами, лініями електропередач, розподіленими підстанціями тощо, ЕЕМ динамічно генерують величезну кількість даних у реальному часі. Складні перехресні зв’язки між підмережами та багаторівнева інтеграція з іншими сферами роблять управління енергомережею складним завданням, особливо при використанні ручних операцій.

Використання методів ШІ, зокрема алгоритмів ML, потенційно може підвищити ефективність функціонування ЕЕМ, дозволяючи автоматизувати процеси оцінки та управління. Вважається, що ШІ може симулювати, розширювати та збагачувати когнітивні функції людського мозку. До таких функцій належать навчання, прийняття рішень і вирішення проблем [89]. Також слід зазначити, що традиційні методи, які ґрунтуються на припущеннях щодо майбутніх викликів нашого суспільства, вже не будуть ефективними. Тому інтелектуальна система є природним прогресом для обробки складних вхідних даних та виконання ефективних вихідних операцій [90, 91].

В останні роки застосування ШІ в енергетичних системах набуло більшої уваги [92, 93]. Новітні дослідження з використання ШІ для розв’язання конкретних проблем у розвитку енергомереж приносять значні успіхи в різних

сферах енергетичного сектору, таких як оцінка стабільності енергосистеми [92], захист системи [94], прогнозування навантаження [95], прогнозування відновлюваної енергії [96], кібербезпека, управління енергією та оптимізація енергоспоживання [97]. ШІ став життєво важливим для вирішення та усунення проблем, пов'язаних з аналізом і контролем генерації в контексті оцінки перехідної стійкості електроенергетичної системи [98].

Башир та інші [99] досліджували застосування різних алгоритмів ML для прогнозування стабільності РЕ. Ці алгоритми включали метод опорних векторів, K-найближчих сусідів, логістичну регресію, наївний байєсівський класифікатор, штучні нейронні мережі та класифікатор дерева рішень. Ши та інші [100] запропонували метод прогнозування на основі згорткової нейронної мережі для розв'язання задачі онлайн-аналізу тимчасової стійкості для управління енергосистемою. Лю та інші [101] представили фреймворк для онлайн-оцінки стабільності напруги.

Широке застосування методів ШІ [102–104] розглядається в галузі відновлюваних джерел енергії завдяки нелінійній залежності стану енергосистеми від значної кількості зовнішніх факторів, що мають багато джерельну інформаційну взаємодію [105, 106].

Ще одне застосування методів ШІ включає класифікацію та регресію для ефективного використання накопичувачів енергії в енергомережі, щоб забезпечити нерозривне використання наявних ресурсів [107]. Також використовується інтегровані датчики для зниження витрат на енергетичну логістику та мінімізації споживання задля збільшення енергопостачання [108, 109]. В останні роки широкого поширення набули моделі на основі штучних нейронних мереж та нечіткої логіки [110–112].

Ашкан та інші [92], разом із численними дослідженнями [113–117], надають повний огляд найбільш вживаних методів і підходів ML в енергетичній сфері: штучні нейронні мережі (ANN), добування даних (DM), глибоке навчання (DL), дерева рішень, метод опорних векторів (SVM), регресійний аналіз, байєсівські мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка (FL), навчання з

учителем, навчання без учителя, навчання з підкріпленням (RL), самонавчання, вивчення ознак (feature learning), виявлення аномалій та багатоцільова оптимізація.

Сабаратінам та інші [118] представили деякі з основних дослідницьких питань, що лежать в основі функціонування та моніторингу енергомереж, а також головні підходи до моделювання, які включають динамічні системи, байєсівський висновок, стохастичні диференціальні рівняння, ML, DL та RL.

Абдулла та інші [119] представляють систематичний огляд сучасних технологій інтелектуальних мереж із застосуванням ШІ для безпечної автоматизації розподілу електроенергії. У роботі пропонується фреймворк для єдиного аналізу простору станів, що дозволяє боротися зі зловмисними атаками, приділяючи основну увагу аналізу фізичного рівня інтелектуальної мережі в режимі реального часу.

Ібрагім та інші [120] роблять висновок, що використання ШІ є доцільним для підвищення ефективності, стабільності, безпеки та надійності мікромереж. У статті представлений огляд різних застосувань методів на основі ШІ в мікро мережах, зокрема в управлінні енергією, прогнозуванні навантаження та генерації, захисті, керуванні силовою електронікою та кібербезпеці. Обговорюються різні задачі ШІ в мікромережах, такі як регресія та класифікація, з використанням методів, що включають ML, ANN, FL, метод SVM тощо. Автори наголошують, що застосування ШІ допомагає розробляти системи, які є такими ж інтелектуальними, як люди, і здатні навчатися, приймати рішення та вирішувати проблеми.

Однак ці підходи часто залишаються на етапі симуляції та вимагають реальних вимірювальних даних для ефективного навчання, складних етапів верифікації й автоматизації, а також нетривіальних підходів для інтеграції та швидкої реконфігурації моделей, оскільки сучасні системи постійно розвиваються. Крім того, традиційне моделювання, оптимізація та існуючі обмеження в обробці даних призводять до багатьох невідповідностей у практичних реалізаціях і навіть у формальних визначеннях згаданих підходів.

Дослідники посиляються на концепцію, що “основна мета – розробка систем із людським рівнем інтелекту, здатних до навчання, прийняття рішень, сприйняття, розуміння комунікації та вирішення проблем” у контексті застосувань ШІ та інтелектуальних мереж [121–123].

Судячи з наведеного аналізу, майже всі дослідження стосуються інтеграції конкретних моделей в енергосистеми. Це означає виконання операцій на широкому спектрі обладнання на основі синтетичного програмного забезпечення або узагальнених підходів. Крім того, поточні дослідження все більше зосереджені на таких напрямках, як прогнозування розподілу енергії, ефективне використання ресурсів, аналіз загроз і локалізоване управління енергосистемою, розпізнавання образів для систем навчання, а також управління та логістика енергетичних джерел. Однак більшість із цих підходів слабо враховують взаємозалежності між соціально-економічними перехресними зв'язками, дотримуючись локального оптимуму попиту та пропозиції на основі обладнання (датчиків) і приблизних вимірювань.

Жоден із цих методів не дозволяє розглядати ЕЕМ як інтелектуальну систему за допомогою високорівневих абстрактних підходів заснованих на цілісному програмному коді, що слабо враховують або навіть нехтують структурними (апаратними) особливостями мережі. Ці методи спираються на синтаксичну узгодженість даних, відкидаючи семантичну, що ускладнює або й унеможлиблює розробку інтероперабельних та когерентних ЕЕМ. Крім того, актуальні дослідження працюють з мікро мережами та інтелектуальними мережевими системами, що є надзвичайно важливим, оскільки мережі з різною організаційною структурою стикаються з різними проблемами та обробляють однакові набори даних по-різному. Наразі не існує універсального підходу, який можна було б ефективно застосовувати до всіх топологій інтелектуальних мереж. Тому такі системи лише частково здатні імітувати деякі когнітивні здібності людського мозку [123]. Крім того, величезний спектр багатовимірних, мінливих у часі даних з непередбачуваними зв'язками ускладнює або навіть

унеможливиює активне управління розподіленими енергосистемами за допомогою складних моделей.

Це підкреслює центральну проблему відсутності єдиної формальної бази, що дозволила б формувати інтелектуальні мережі, де узгоджені не тільки дані від вузлів, але й самі підходи, що ними оперують. Як бачимо, формальна база, в рамках якої “інтелектуальність” підсистем могла би співіснувати в одній, загальній системі, відсутня, що є загальною проблемою, яка потребує ґрунтовного вивчення. Однак спроби сформувати базис сильного штучного інтелекту призвели до висновків про аксіоми, на якій має і може формуватися реалізація інтелектуальної системи співставної з когнітивною потужністю мозку людини [123–126]. З результатів роботи також впливає потреба узгодженої та координованої взаємодії вузлів та підсистем, для дій, що були би не суперечливими в рамках деякої заданої цілі. Це важливо, адже ефективне функціонування системи в цілому можливе у тому випадку, коли всі підсистеми узгоджені, що дозволяє реалізувати функцію направленого управління системою.

Ця семантична проблема дзеркально відображається на практичному, синтаксичному рівні у вигляді викликів функціональної сумісності. Перехід до нових парадигм управління підтримується технологічним розвитком та експоненціальним зростанням обсягів даних від інфраструктури вимірювання, векторних пристроїв та IoT-сенсорів. На зміну застарілим системам SCADA приходять просунуті платформи ADMS, що використовують ІІІ. Однак інтеграція обладнання від різних виробників створює потребу не просто в обміні даними, а в їх одночасному семантичному та синтаксичному узгодженні. Відсутність “спільної мови” та спільного розуміння контексту є проблемою. Стандарти, як-от ІЕС 61850, успішно вирішують синтаксичну частину проблеми, надаючи спільний словник і граматику для пристроїв. Проте їхня ефективність на пряму залежить від того, чи закладено в архітектуру системи спільне семантичне розуміння процесів.

Неможливість створення ідеальної моделі потребує розробки гібридних підходів, які намагаються вирішити проблему узгодження на обох рівнях. По-перше, композиційні методи (ко-симуляція, теорія категорій) спрямовані на досягнення семантичної узгодженості між підходами. Вони дозволяють формально правильно співставляти гетерогенні моделі, створюючи надійну та несуперечливу архітектуру, де різні погляди на систему гармонізовані. По-друге, в межах цієї семантично узгодженої архітектури діють індуктивні методи, як-от навчання з підкріпленням. Ці адаптивні агенти забезпечують динамічне узгодження на рівні вузлів, реагуючи на поточні дані та узгоджуючи дії, що не суперечать заданій меті. Таким чином, майбутнє управління енергосистемами лежить у створенні багаторівневої системи узгодження. Композиційні підходи гарантують семантичну цілісність на рівні моделей, що, у свою чергу, створює надійний контекст для лексичної та оперативної координації дій між вузлами мережі. Одночасно з цим наскрізною проблемою залишається кібербезпека, оскільки величезна поверхня атаки вимагає комплексних рішень для захисту цілісності та конфіденційності інформації на всіх рівнях взаємодії.

Таким чином, проведений аналіз виявляє, що ключовим викликом для сучасних ЕЕМ є досягнення узгодженості стану на семантичному та синтаксичному рівнях в умовах високої гетерогенності та технологічної фрагментації. Гібридні підходи, що поєднують композиційні та індуктивні методи, намічають шлях до вирішення цієї проблеми, створюючи багаторівневу систему управління. Однак, ефективність будь-яких моделей та архітектур управління безпосередньо залежить від якості та надійності вхідної інформації, яка слугує їхньою основою.

Саме тут виникає глибший шар проблеми, що передує самому узгодженню моделей та дій. Величезні потоки даних, що генеруються мільйонами розподілених та стохастичних джерел, за своєю природою є хаотичними та невизначеними. Ця іманентна непередбачуваність і складність інформаційних потоків може бути формалізована через поняття інформаційної

ентропії. Водночас, збір даних з різнорідних, несинхронізованих пристроїв, що оперують у різних семантичних та синтаксичних контекстах, неминуче призводить до неконсистентності даних, появи суперечливих, неповних або застарілих відомостей. Ентропія та неконсистентність виражають інформаційні бар'єри, що накладають обмеження до побудови достовірної картини стану системи. Аналізу проблем інформаційної ентропії та неконсистентності даних в ЕЕМ і буде присвячено наступний підрозділ.

1.4. Проблеми інформаційної ентропії та неконсистентності даних в ЕЕМ

Отже, еволюція ЕЕМ у складні, географічно розподілені КФС, що характеризуються високою щільністю інформаційних потоків та інтеграцією значної кількості стохастичних елементів, фундаментально змінює парадигму їх аналізу та керування. Ця трансформація вимагає переходу від детермінованих фізичних моделей до підходів, що враховують принципи теорії інформації для адекватного опису операційних викликів. На фундаментальному рівні виникає епістемологічна проблема, пов'язана із самою природою знання в ЕЕМ. У цьому контексті ключовим показником стану системи стає інформаційна ентропія, що слугує кількісною мірою іманентної невизначеності в інформаційному просторі ЕЕМ [127–129]. Водночас, агрегація даних з гетерогенних та асинхронних джерел, що функціонують у відмінних семантичних та лексичних контекстах, неминуче призводить до неконсистентності даних та появи суперечливих, неповних або застарілих знань про стани вузлів системи. Таким чином, ентропія та неконсистентність є фундаментальними епістемічними бар'єрами, що унеможливають побудову когерентної та верифікованої репрезентації стану системи. Детальному аналізу цих взаємопов'язаних факторів присвячено цей підрозділ.

Інформаційна ентропія, вперше формалізована Клодом Шенноном [130], визначається як усереднена швидкість, з якою стохастичне джерело генерує інформацію, і, по суті, є мірою непередбачуваності стану системи. У контексті ЕЕМ інформація передається в процесі взаємодії між об'єктами, наприклад, між

вимірювальним пристроєм та центром керування, де один об'єкт набуває її, а інший не втрачає. Важливо розрізнати фундаментальне визначення ентропії та джерела її виникнення в складних системах. Згідно з аксіомами Шеннона-Хінчина [130, 131], ентропія як математична величина залежить виключно від імовірнісного розподілу станів і не враховує їхній семантичний зміст. Однак у гетерогенних інтелектуальних мережах, якою є сучасна ЕЕМ, саме семантична неузгодженість стає одним із ключових чинників, що формують цей імовірнісний розподіл. Коли різні вузли мережі по-різному інтерпретують значення даних (наприклад, через відмінності у стандартах чи моделях даних), це породжує конфлікти та неоднозначність. Така семантична неконсистентність безпосередньо призводить до розширення множини можливих станів системи та збільшення невизначеності щодо її конфігурації. Таким чином, хоча формула ентропії є семантично сліпою, фактори, що спричиняють зростання ентропії в ЕЕМ, глибоко пов'язані із семантичною узгодженістю інформації та знань на вузлах мережі. Ентропія досягає максимуму [132], коли всі можливі стани є рівноймовірними, що відповідає ситуації максимальної невизначеності. Таким чином, зростання кількості можливих станів та вирівнювання їхніх ймовірностей неминуче веде до збільшення загальної інформаційної ентропії системи.

Зростання інформаційної ентропії в сучасних ЕЕМ обумовлене низкою факторів, які можна класифікувати на локальні та системні [133–135]. До локальних джерел ентропії належать невизначеності, що виникають на рівні окремих компонентів та підсистем. Це шуми та похибки вимірювань, дрейф калібрування сенсорів SCADA та PMU, що вносять невизначеність безпосередньо в точці збору даних. Додаткову ентропію генерує неоднозначність станів дискретних пристроїв, таких як перемикачі трансформаторів або батареї конденсаторів, чий точний стан не завжди є спостережуваним у реальному часі. Критично важливим фактором є комунікаційні затримки та асинхронність даних. Навіть при використанні високоточних технологій синхронізації часу, як-от PMU, ідеальна одночасність

збору даних з географічно рознесених точок є практично недосяжною. Це призводить до того, що “моментальний зріз” стану системи є радше розмитим у часі образом, що збільшує невизначеність і, як наслідок, ентропію. Системні, або глобальні, джерела ентропії мають більш фундаментальний характер. Інтеграція ВДЕ, таких як сонячні та вітрові електростанції, вносить у систему стохастичність, оскільки їхня генерація є непередбачуваною, адже залежить від погодних умов. Поведінка мільйонів споживачів, особливо з урахуванням поширення електромобілів та інших нелінійних навантажень, створює високодинамічний та важкопрогнозований профіль навантаження. У дерегульованих ринках електроенергії стратегії численних учасників ринку додають ще один шар економічної та поведінкової невизначеності, що безпосередньо впливає на диспетчеризацію генерації. Нарешті, взаємодія тисяч розподілених, часто автономних, систем керування породжує емерджентну поведінку, яка не є централізовано передбачуваною, що збільшує загальну ентропію системи. Згідно з теорією інформації [136, 137], ентропія об’єднаної системи пов’язана з умовними ентропіями її підсистем, що вказує на те, що взаємозалежності між компонентами збільшують загальну невизначеність.

Ці процеси свідчать про інверсію властивостей сучасних ЕЕМ. Централізовані енергосистеми характеризувалися високою фізичною інерцією (великі обертові маси синхронних генераторів) та низькою інформаційною складністю (централізоване керування, повільні цикли оновлення даних SCADA). Це робило їх фізично стійкими, але інформаційно простими. Натомість, сучасні РЕ мають низьку фізичну інерцію через домінування інверторних ресурсів та надзвичайно високу інформаційну складність, що зумовлена мільйонами точок даних, розподіленими алгоритмами керування та високошвидкісними комунікаціями. Ця інверсія означає, що стійкість системи тепер менше залежить від її фізичної робастності, а більше від її здатності ефективно обробляти інформацію. Відповідно, зростання ентропії є загрозою операційній стабільності ЕЕМ. “Найслабша ланка” системи перемістилася з фізичного домену в кібернетично-інформаційний.

Виникнення неконсистентності даних у розподіленій системі є прямою передумовою зростання інформаційної ентропії. Коли міра невизначеності для певного параметра стану системи перевищує критичний поріг, для розподіленої сукупності спостерігачів (наприклад, різних центрів керування, автономних агентів) стає неможливим досягти єдиного, узгодженого уявлення про цей стан. Висока ентропія означає широкий імовірнісний розподіл для стану системи. Різні спостерігачі, здійснюючи вибірку з цього невизначеного середовища, неминуче отримуватимуть різні значення, що призводить до фрагментованого, неконсистентного бачення реальності в масштабах усієї системи. Ця неконсистентність проявляється в ЕЕМ у конкретних операційних проблемах. Наприклад, два суміжні оператори системи передачі, що використовують власні алгоритми оцінки стану, можуть обчислювати суперечливі значення кутів напруги та потоків потужності на міжсистемних зв'язках, особливо якщо їхні вхідні дані є зашумленими або асинхронними. Іншим проявом є конфліктний статус обладнання, коли одна частина системи може вважати, що вимикач розімкнутий, базуючись на останніх отриманих даних, тоді як інша, отримавши новіший, але затриманий сигнал, вважатиме його замкненим, породжуючи топологічну неоднозначність. На рівні розподілених ресурсів, група акумуляторних накопичувачів може отримувати дещо відмінні сигнали частоти або напруги, що змусить їх видавати або споживати потужність неузгоджено, потенційно дестабілізуючи локальну мережу.

Ці явища в ЕЕМ є проявом проблем розподілених обчислень. Ситуація є аналогічною до проблеми когерентності кеш-пам'яті в багатопроцесорних системах [138]. Подібно до того, як кеші різних процесорів повинні мати узгоджене уявлення про спільну ділянку пам'яті, так і центри керування ЕЕМ повинні мати єдине уявлення про стан енергосистеми. Порушення протоколів когерентності в комп'ютерній системі призводить до пошкодження даних; в ЕЕМ це призводить до некоректних і небезпечних керуючих дій. Більше того, цю проблему можна розглядати як узагальнену версію задачі візантійських генералів [139]. У класичній постановці частина генералів є зловмисниками, що

свідомо надсилають неправдиву інформацію. В ЕЕМ з високою ентропією виникає аналогічна ситуація, коли компоненти системи надають суперечливу інформацію не через злий умисел, а через реальну невизначеність, похибки вимірювань та комунікаційні збої. Система втрачає здатність досягти консенсусу щодо власного стану. Метою візантійсько-стійких [140] систем є захист саме від таких збоїв, коли компоненти не можуть дійти згоди. Такий стан може бути органічно індукований високою інформаційною ентропією.

Розподілену систему керування ЕЕМ, що складається з багатьох інтелектуальних агентів, можна розглядати як колективний когнітивний суб'єкт, де кожен агент має власні “переконання” про стан мережі [141–144]. Це створює стан системної напруги, коли одночасні дії на основі цих суперечливих переконань можуть призвести до осциляцій або контрпродуктивних керуючих дій (наприклад, один контролер намагається підвищити напругу, тоді як інший одночасно її знижує). В результаті збільшується комунікаційне навантаження та кількість циклів перерахунку оцінки стану, що споживає обчислювальні ресурси і може ще більше дестабілізувати систему.

Кінцевим наслідком неконсистентності даних є вибух простору станів [145–147]. Простір станів ЕЕМ визначається як множина всіх можливих комбінацій станів її складових компонентів. Потужність цього простору зростає експоненційно зі збільшенням кількості змінних стану та компонентів. Ця проблема є головною перешкодою для верифікації коректності великих паралельних систем до класу яких належать сучасні ЕЕМ. Хоча теоретичний простір станів ЕЕМ є величезним, але скінченним, неконсистентність даних спричиняє вибух ефективного, або поточного, простору станів, з яким система керування змушена мати справу в реальному часі. В консистентній системі в кожен момент часу існує лише один вектор стану, що оцінюється системою керування. У неконсистентній системі для кожної точки даних, що конфліктує, вектор стану розгалужується. Наприклад, якщо існує невідповідність щодо стану всього 10 вимикачів, система керування має справу вже не з однією топологією мережі, а з $2^{10} = 1024$ можливими топологіями одночасно. Якщо

додати аналогічну невизначеність щодо вихідної потужності 20 великих кластерів ВДЕ, кількість потенційних станів системи, породжених неконсистентними даними, зростає комбінаторно.

Цей процес посилюється накопичувальним ефектом, який діє як цикл позитивного зворотного зв'язку. Початково локальна неконсистентність даних, спричинена високою локальною ентропією, призводить до того, що керуюча система приймає субоптимальне рішення на основі свого неповного або некоректного локального уявлення про стан. Ця дія збурює фізичну систему, створюючи коливання або відхилення, які є неочікуваними з точки зору інших підсистем. Ці непередбачувані динамічні процеси збільшують загальну непередбачуваність і безлад у системі, підвищуючи глобальну інформаційну ентропію. Нові вимірювання, що характеризуються ще вищою ентропією, надходять до розподілених спостерігачів, що ще більше ускладнює досягнення згоди щодо стану системи і, таким чином, посилює початкову неконсистентність даних. Цей цикл повторюється, і кожна ітерація посилює розбіжність між сприйнятими станами різних частин системи, що призводить до комбінаторного вибуху ефективного простору станів системи. Це призводить до збоїв під час оцінки стану системою управління. Розподілені підходи до оцінки стану потребують досягнення консенсусу, коли їхні вихідні дані є суперечливими [148–150]. Оптимізаційні задачі, такі як розрахунок оптимального потоку потужності [151] та економічне розподілення навантаження [152], стають обчислювально нерозв'язними [153]. Неможливо оптимізувати систему стан якої неможливо однозначно визначити. Система втрачає здатність прогнозувати свою реакцію на збурення. Системи релейного захисту, що покладаються на точні та консистентні вимірювання, починають працювати некоректно.

Такі збої призводять до дисфункції інтелектуального рівня керування ЕЕМ. Система перестає функціонувати як єдине ціле і розпадається на сукупність некоординованих, локально діючих компонентів. Вона більше не може експлуатуватися ефективно та безпечно [154–156]. ЕЕМ стає некерованою

не через фізичний збій, а внаслідок інформаційного колапсу. Таким чином, еволюція ЕЕМ у складні КФС стимулює появу нових вразливостей на основі теорії інформації. Неконтрольоване зростання інформаційної ентропії діє як катализатор для неконсистентності даних, що через накопичувальний ефект від зворотного зв'язку призводить до комбінаторного вибуху ефективного простору станів системи. Це робить недієздатними сучасні функції моніторингу, керування та оптимізації, що підриває надійність, безпеку та ефективність електроенергетичної системи.

Отже, встановлено, що ключова вразливість сучасних ЕЕМ полягає у виникненні циклу зворотного зв'язку між інформаційною ентропією та неконсистентністю даних [157]. Цей процес неминуче призводить до комбінаторного вибуху простору станів і, як наслідок, до втрати системою фундаментальних властивостей спостережуваності та керованості. Оскільки існуючі підходи здебільшого розглядають ці проблеми ізольовано, ігноруючи їхній руйнівний кумулятивний ефект, виникає нагальна необхідність у їхньому системному аналізі. Відповідно, наступний підрозділ буде присвячено критичному огляду наявних методів моніторингу та узгодження станів з метою виявлення їхніх принципових обмежень.

1.5. Аналіз існуючих підходів до моніторингу та узгодження станів та їх обмеження

Як було встановлено у попередньому підрозділі, загроза стабільності сучасних ЕЕМ полягає в інформаційному домені, де синергія інформаційної ентропії та неконсистентності даних провокує інформаційний колапс та втрату керованості. Цей підрозділ представляє критичний аналіз еволюції парадигм моніторингу та узгодження стану, що виникли як відповідь на цей комплексний виклик. Наратив аналізу простежує логічний шлях розвитку від модельно-орієнтованих методів [158] до розподілених архітектур [159], що вирішують проблему масштабованості ціною ускладнення процесу узгодження. Далі розглядається парадигмальний зсув до методів, керованих даними

(нейронні мережі, фільтри Калмана) [160, 161], які подолали неточність фізичних моделей, але є залежними від достовірності та цілісності даних. Нарешті, аналізуються спроби застосування формальних методів та протоколів реплікації (CRDT) [162] для надання математичних гарантій узгодженості. Ключова теза цього аналізу полягає в тому, що кожен еволюційний крок, вирішуючи одну проблему, неминуче призводить до іншої, часто більш складної. Це доводить, що жоден з існуючих підходів не є самодостатнім, та обґрунтовує необхідність розробки нової, гібридної моделі, що є метою даної дисертаційної роботи.

Перехід від централізованих, ієрархічних та детерміністичних ЕЕМ до децентралізованих, гетерогенних та стохастичних КФС, що було описано в попередніх розділах, ставить під сумнів ефективність існуючих парадигм оцінки та управління. Еволюція методів оцінювання стану в розподільчих мережах є прямим відображенням невпинних спроб наукової та інженерної спільноти дати відповідь на ці фундаментальні виклики. Сучасні розподільчі ЕЕМ трансформувалися у складні, динамічні інфраструктури, що робить традиційні підходи не просто застарілими, а й принципово недієздатними [163, 164]. Ця трансформація є якісним стрибком, що вимагає переосмислення підходів до оцінки та управління. Якщо раніше система була переважно пасивним об'єктом, що вимагав оптимізації, то сьогодні вона є активним, самоорганізованим суб'єктом, поведінку якого необхідно розуміти та скеровувати.

Наратив аналізу зосереджений на тому, як кожна нова ітерація методів намагається вирішити тріаду ключових проблем [165–168]: низьку спостережуваність, високу динамічність, невизначеність параметрів математичної моделі ЕЕМ. Далі буде розглянуто, як спроби вирішити ці проблеми призвели до виникнення нових, ще більш складних викликів, пов'язаних з узгодженістю, достовірністю даних та необхідністю формальних гарантій надійності в критичних інфраструктурах.

Найпоширенішим підходом моніторингу в магістральних мережах є зважений метод найменших квадратів (WLS) [169–171]. Суть методу полягає в ітераційній мінімізації зваженої суми квадратів різниць між реально вимірними значеннями та значеннями, розрахованими на основі математичної моделі мережі. Метою є знаходження найбільш імовірного вектора стану системи, який зазвичай складається з модулів та кутів напруг у всіх вузлах мережі. Формально, задача оптимізації, яку розв'язує WLS, виглядає наступним чином:

$$\hat{x} = \arg \min_x (z - h(x))^T W (z - h(x)),$$

де x – оцінений вектор невідомих змінних стану (наприклад, модулі та фази напруг вузлів), z – вектор наявних вимірювань (наприклад, потоки активної та реактивної потужності в лініях, модулі напруг), $h(x)$ – нелінійна векторна функція, що математично пов'язує змінні стану x з очікуваними значеннями вимірювань z , а W – діагональна матриця ваг, елементи якої обернено пропорційні дисперсії похибок відповідних вимірювальних приладів. Фактично, матриця W відображає ступінь довіри до кожного конкретного вимірювання. Чим точніший прилад, тим більша його вага в цільовій функції.

Застосування WLS базується на спостережуваності системи [172]. Це означає, що кількість та розташування незалежних вимірювань мають бути достатніми для однозначного визначення всіх змінних стану, що може бути складною задачею через недостатню спостережуваність. Системи, що не мають розгалуженої вимірювальної інфраструктури, не можуть ефективно використовувати WSL, адже кількість наявних реальних вимірювань часто є значно меншою за кількість невідомих змінних стану [173]. В таких умовах система рівнянь стає математично невизначеною.

Для формального подолання цієї проблеми в рамках розподіленої оцінки стану системи (DSSE) почали широко використовувати так звані псевдовимірювання [174, 175]. Це штучно згенеровані дані, які представляють очікувані значення потужностей у вузлах, де відсутні реальні вимірювальні

прилади. Зазвичай вони генеруються на основі історичних даних або короткострокових прогнозів споживання навантаження та генерації ВДЕ. Хоча такий підхід дозволяє доповнити систему рівнянь і досягти формальної спостережуваності, проте прогнози за своєю природою є неточними і, що важливіше, не відображають миттєвий, поточний стан системи, а лише його усереднене або очікуване значення [176, 177]. Це може призводити не просто до значних похибок в кінцевій оцінці стану, а й до парадоксальної ситуації, коли коректні реальні вимірювання помилково ідентифікуються та сприймаються як “погані дані” лише тому, що вони суперечать неточним псевдовимірюванням.

Як логічна відповідь на високу розмірність сучасних розподільчих мереж та пов’язане з цим обчислювальне навантаження виникли розподілені підходи до оцінювання стану [178–181]. Замість розв’язання однієї монолітної задачі для всієї мережі, ідея полягає в тому, щоб декомпонувати її на кілька менших, більш керованих зон або областей.

У рамках багатозонального оцінювання стану (MASE) [159, 181–183], локальні задачі оцінювання виконуються паралельно та незалежно в кожній окремій зоні. Після того, як кожна зона отримує власну локальну оцінку стану, запускається процес гармонізації. Під час цього процесу сусідні зони обмінюються інформацією про оцінені стани на своїх межових вузлах з метою досягнення єдиного, глобально узгодженого рішення для всієї мережі. Такий архітектурний підхід має значні переваги. По-перше, він суттєво зменшує вимоги до пропускну здатності каналів зв’язку, оскільки більша частка даних обробляється локально, і лише обмежена кількість агрегованої інформації передається між зонами. По-друге, це може значно прискорити реакцію системи на локальні події.

Проте, децентралізація, вирішуючи проблему масштабованості, породжує нову, не менш складну проблему – необхідність ефективного, точного та швидкого узгодження станів. Різні дослідники пропонують різні стратегії для цієї гармонізації. Деякі підходи базуються на ітераційному обміні даними, коли зони кілька разів обмінюються інформацією про межові вузли, доки їхні оцінки

не зійдуться [184–186]. Інші пропонують використовувати рекурсію або цикли [187], або розв’язання додаткової задачі центральним координатором або суміжними вузлами [188–190], що використовують модифікований WLS, для узгодження розбіжностей. Ефективність будь-якого MASE-алгоритму в кінцевому підсумку залежить від того, наскільки вдало було виконано розбиття мережі на зони, та від робастності й швидкості збіжності обраного алгоритму узгодження.

Останніми роками в галузі DSSE спостерігається перехід від методів, що спираються на фізичну модель мережі, до підходів, які здатні враховувати динаміку системи на основі даних [191–194]. Цей тренд зумовлений двома головними факторами. З одного боку, параметри моделей розподільчих мереж (імпеданси ліній, параметри трансформаторів) часто є недосконалими, застарілими або просто неточними. З іншого боку, це зростаюча доступність високоякісних, синхронізованих даних з нових вимірювальних пристроїв, таких як PMU, що встановлюються в розподільчих мережах. Можна виділити 3 основні методи, що є центричними по відношенню до даних:

- **Фільтри Калмана (KF)** та його нелінійні розширення [195–197] підходять для відстеження швидкої динаміки системи в реальному часі, яку роблять видимою синхронізовані векторні вимірювання з PMU. Матриці переходу стану можуть бути сформовані на основі фізичної моделі або даних отриманих даних з PMU, що робить оцінювач значно стійкішим до неточностей щодо параметрів мережі, оскільки він спирається на реальну, а не модельовану поведінку системи.
- **Штучні нейронні мережі** [198–201] продемонстрували величезний потенціал, особливо для вирішення проблем у несиметричних та неспостережуваних системах. Нейронна мережа, навчена на великому обсязі даних, здатна вивчити складне нелінійне відображення від розрідженого набору вимірювань (наприклад, даних з кількох PMU) до повного вектора стану всієї системи. Фактично, ANN виступає в ролі універсального апроксиматора функції стану, що дозволяє обійти вимоги

до спостережуваності, які є перешкодою для WLS. Такі підходи можна поєднувати з модулями ідентифікації топології, а навчені моделі ефективно адаптувати до змін у конфігурації мережі за допомогою методів трансферного навчання, що значно скорочує час на перенавчання моделі з нуля.

- **Доповнення матриць** [202–204], поширене в сфері обробки сигналів та машинного навчання, підходять для частково визначених систем. Він базується на припущенні, що матриця, рядки якої є вузлами мережі, а стовпці векторами напруг у послідовні моменти часу, має низький ранг. Це фізично обґрунтоване припущення означає, що напруги в різних вузлах мережі є сильно корельованими між собою. Завдяки цій властивості, повну матрицю напруг можна з високою точністю відновити, знаючи лише невелику, випадково розподілену кількість її елементів (тобто, маючи вимірювання лише в кількох вузлах). Таким чином, метод дозволяє “доповнити” відсутні дані, спираючись на просторові кореляції в наявних вимірюваннях.

Перехід від модельно-орієнтованих до методів керованих даними, частково вирішує проблему параметричної невизначеності, але породжує нову критичну залежність від цілісності та достовірності самих даних. Наприклад, WLS неефективний, коли модель $h(x)$ є неточною. Методи керовані даними, фактично замінюють явну фізичну модель $h(x)$ на сформовану на основі даних функцію $f(z)$, яка відображає вимірювання z у стан x . Це вирішує проблему неточності моделі, але дозволяє ефективно функціонування на основі $f(z)$ лише для тих розподілів даних, які були присутні у навчальній вибірці [205, 206].

Кібератаки, такі як ін’єкція фальшивих даних [207], або непередбачені системні події генерують дані, що виходять за межі цього вивченого розподілу. Поведінка нейронної мережі або будь-якої іншої ML-моделі на таких даних є невизначеною. Модель може видати невірну, але правдоподібну на вигляд оцінку стану, що може спровокувати невірні дії з боку автоматики або оператора [208]. Виникає потреба у розробці нового гібридного підходу на основі

формалізованого процесу міркування (зокрема, на основі когнітивних алгебраїчних систем), який забезпечуватиме попередню валідацію семантичної узгодженості та правдоподібності вихідних даних $f(z)$.

Перехід від статистично-евристичних методів оцінювання до формально обґрунтованих є необхідним еволюційним кроком для забезпечення безпеки та надійності критичних інфраструктур. КФС, такі як РЕ, характеризуються тісною взаємодією обчислювальних, комунікаційних та фізичних компонентів, що створює потенціал для непередбачуваних каскадних збоїв. За таких умов методи верифікації, що базуються на симуляції та тестуванні, є недостатніми. Тестування може виявити наявність помилок, але ніколи не може довести їх відсутність, оскільки охоплює лише обмежену підмножину можливих сценаріїв [209].

Формальні методи, натомість, використовують математично обґрунтовані моделі для специфікації, верифікації та проектування систем [210, 211]. Вони дозволяють надати математичний доказ того, що реалізація системи відповідає її формальній специфікації за всіх можливих умов. Це важливо для систем, відмова яких може мати катастрофічні соціальні, економічні та безпекові наслідки.

У галузі КФС та, зокрема, в енергетиці, для забезпечення узгодженості та надійності застосовується низка формальних методів:

- Перевірка моделей [212–214] дозволяє вичерпно дослідити простір станів моделі системи та верифікувати її відповідність певним властивостям. Наприклад, можна верифікувати, що система релейного захисту ніколи не потрапить у стан, де одночасно відключено і основне, і резервне живлення. Якщо властивість порушується, генерується контрприклад, що призводить до помилки.
- Темпоральні логіки [215, 216] дозволяють формально моделювати та перевіряти поведінку системи в часі. Замість того, щоб аналізувати стан мережі лише в певний момент, темпоральна логіка дає змогу виразити та

довести властивості, які стосуються послідовностей станів, що змінюються з часом.

- Теорія автоматів [217, 218] дозволяє моделювати поведінку системи за допомогою скінченних автоматів. Такий підхід забезпечує формально доведений шлях від високо-рівневої специфікації (наприклад, діаграми станів UML) до кінцевої апаратної реалізації, гарантуючи, що реалізований пристрій точно відповідає перевірній логіці.

Проте, застосування цих методів до задачі DSSE стикається з фундаментальною проблемою. Формальна верифікація доводить, що реалізація системи відповідає її специфікації. У розподілених системах оцінки стану вхідними даними є набір потенційно суперечливих вимірювань, а справжній стан, який є бажаною специфікацією, невідомий. Проблема полягає не у верифікації правильності алгоритму, а у визначенні того, що є правильним станом за наявності суперечливих даних. Це переформатовує задачу з верифікації на задачу інформаційного узгодження або синтезу узгодженого знання. Це не просто технічна відмінність, а перехід від перевірки відповідності до встановлення істини. Саме для вирішення таких задач і пропонується звернутися до апарату когнітивної інформатики та алгебраїчних систем [219–222].

Вибір механізму узгодження даних у розподіленій системі визначається фундаментальним компромісом між доступністю системи та строгістю гарантій консистентності. Існує два основних підходи:

1. Протоколи консенсусу (Paxos, Raft) [223–225] пріоритизують сильну узгодженість, часто лінеаризованій формі. Це створює ілюзію роботи з єдиним екземпляром даних, що досягається в результаті вибору лідера та багатофазного підтвердження, щоб усі вузли погодили єдиний порядок виконання операцій. Проте, під час мережевого розділення система може стати тимчасово недоступною для запису, оскільки досягти кворуму для узгодження неможливо, що робить систему нестійкою та централізованою по відношенню до системи оцінки стану мережі.

2. Безконфліктні репліковані типи даних (CRDT) [162, 226–229] на противагу консенсусу надають пріоритет доступності. Кожна репліка може незалежно та паралельно обробляти запити на оновлення, навіть перебуваючи в офлайн режимі. В процесі досягається сильна кінцева узгодженість шляхом асинхронного обміну оновленнями та їх злиття. В CRDT операції злиття спроектовані комутативними, асоціативними та ідемпотентними. Це гарантує, що всі репліки, які отримали однаковий набір оновлень, врешті-решт зійдуться до однакового стану, незалежно від порядку та часу їх отримання.

Завдання моніторингу та оцінювання стану в реальному часі вимагають високої доступності та низької затримки, що робить CRDT ідеальним вибором. Водночас ринкові операції, розрахунки або зміна конфігурації вимагають семантичної узгодженості та можливості аудиту, для чого краще підходять протоколи консенсусу або моделі на основі формалізму. Відповідно, найкращим рішенням буде скомбінувати гнучкість, масштабованість та низькорівневість CRDT з більш абстрактною, формальною та високорівневою моделлю.

Впровадження гібридної архітектури узгодженості, що поєднує сильні гарантії консенсусу та високу доступність CRDT, дозволить ефективно керувати станом даних у розподілених енергетичних системах. Однак, навіть якщо всі вузли гарантовано мають однакові дані, залишається відкритим фундаментальне питання: чи однаково вони розуміють їхнє значення? Ця проблема, відома як семантична інтероперабельність [230, 231], коли обладнання від різних постачальників може використовувати власні, несумісні моделі даних. Таким чином, після вирішення завдання синхронізації, наступним логічним кроком є забезпечення єдиного семантичного простору для всіх учасників системи.

Оскільки інтелектуальні мережі за своєю природою є гетерогенними, складаючись з пристроїв та систем від різних виробників, виникають семантичні розриви інтероперабельності. Для вирішення цієї проблеми розроблено загальну інформаційну модель CIM [232] в рамках якої

міжнародною електротехнічною комісією (ІЕС) [233] було прийнято та стандартизовано серію стандартів, а саме:

- ІЕС 62325-301 представляє розширення СІМ у вигляді абстрактної моделі, яка передбачає впровадження об'єктів, необхідних для функціонування ринків електроенергії.
- ІЕС 62325-450 визначає правила та методи для створення профілів і моделей контексту з використанням загальної інформаційної моделі СІМ, що є основою для комунікацій на енергетичних ринках.

На основі цих двох стандартів побудовані міжнародний стандарт ІЕС 62325-351 та серію стандартів ІЕС 62325-451-X, зокрема, для внутрішнього ринку електроенергії Європи.

Незважаючи на ці стандарти, залишаються значні виклики в їх гармонізації через різні інтерпретації постачальниками [234–236], що призводить до семантичних неузгодженостей. Для вирішення семантичних конфліктів використовуються підходи на основі топологій [237, 238]. Топології надають формальну, явну специфікацію спільної концептуалізації, а процеси зіставлення та вирівнювання онтологій дозволяють автоматично знаходити відповідності між різними моделями даних.

Відповідно, для реалізації комбінованого концепту низькорівневої синтаксичної узгодженості CRDT та високорівневої формальної семантичної узгодженості моделі має існувати деяке середовище, здатне інкорпорувати властивості суб'єктів, об'єктів, операцій над ними та взаємовідносин в одному абстрактному просторі.

Проведений аналіз показує, що не існує єдиного найкращого методу для оцінки та узгодження стану в сучасних ЕЕМ. Кожен підхід має свої сильні та слабкі сторони. Класичні методи вразливі до неточностей моделі та відсутності спостережуваності. Розподілені підходи створюють проблеми узгодження та семантичної інтеперабельності. Методи, керовані даними, вирішують проблему моделі, але створюють нову вразливість до атак на цілісність інформації підсистемної комунікації. Формальні методи дають ґрунтовні

математичні гарантії, але стикаються з проблемою вибуху простору станів та синтезом знання з суперечливих даних.

Спільним для новітніх підходів є відхід від жорсткої залежності від єдиної фізичної моделі та перехід до використання статистичних властивостей, кореляцій та формальних структур, присутніх у даних. Цей зсув, як було показано, створює нові виклики, пов'язані з довірою до даних, що вимагає розробки нових, гібридних методів для забезпечення їхньої формальної узгодженості, семантичної когерентності та доказової стійкості. Стає очевидним, що майбутнє надійних оцінки та управління критичною інфраструктурою лежить не в пошуку єдиного універсального алгоритму, а в побудові багаторівневих, комбінованих, формально обґрунтованих систем, що об'єднують переваги розглянутих підходів.

Висновки до першого розділу

Отже, проведений у першому розділі аналіз обґрунтовує, що еволюція ЕЕМ у гетерогенні КФС уособлює перехід від проблем фізичного домену до викликів в інформаційному просторі. Було встановлено, що центральною проблемою операційної надійності є узгодження стану, яке підривається синергетичним циклом зворотного зв'язку між інформаційною ентропією та неконсистентністю даних. Цей процес веде до комбінаторного вибуху простору станів і, як наслідок, до втрати системою фундаментальних властивостей спостережуваності та керованості.

Критичний аналіз існуючих підходів від класичних модельно-орієнтованих до інформаційно-центричних та керованих даними, продемонстрував їхню принципову обмеженість у комплексному вирішенні поставленого завдання, оскільки кожен з них є вузькоспеціалізованим рішенням, що ігнорує синтаксично-семантичну узгодженість інформації.

Таким чином, ефективне вирішення лежить не в оптимізації окремих алгоритмів, а в синтезі нової, гібридної моделі узгодження інформації про стани вузлів та підсистем ЕЕМ, здатної об'єднати високорівневе семантичне

узгодження з низькорівневим синтаксичним узгодженням. Ця модель повинна інтегрувати низькорівневий механізм гарантованої синтаксичної узгодженості даних, стійкий до асинхронності, та високорівневий формальний апарат для семантичного міркування та узгодження, що здатний синтезувати когерентне знання із суперечливих джерел. Обґрунтуванню та формалізації саме такого підходу і буде присвячено наступний розділ.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОГНІТИВНОЇ АЛГЕБРАЇЧНОЇ СИСТЕМИ ТА CRDT ДЛЯ СИНТАКСИЧНО-СЕМАНТИЧНОГО УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

2.1. CAP: кінцева узгодженість в ЕЕМ

Виходячи з висновку попереднього розділу, що позиціонує сучасну ЕЕМ як гетерогенну КФС, аналіз її архітектурних засад неминуче приводить до розгляду фундаментальних теорем розподілених обчислень. Ключовою серед них є теорема CAP [239], яка накладає строгі обмеження на будь-яку систему, що оперує спільними даними через ненадійну мережу. Центральна теза даного підрозділу полягає в обґрунтуванні того, що іманентні фізичні та операційні властивості ЕЕМ безальтернативно диктують необхідність архітектурного проектування, що пріоритезує доступність та стійкість до розділення на противагу суворій узгодженості. Такий підхід позиціонує модель кінцевої узгодженості (Eventual Consistency, EC) [240] як єдиний життєздатний шлях для забезпечення резильєнтності, стійкості та функціонування в реальному часі на макросистемному рівні.

Теорема CAP, сформульована як гіпотеза Еріком Брюером [241] і згодом формально доведена Сетом Гілбертом та Ненсі Лінч [239], постулює, що будь-яке розподілене сховище даних може одночасно задовольняти не більше двом із трьох гарантій: узгодженості, доступності та стійкості до розділення. Для коректної екстраполяції цієї теореми на домен ЕЕМ необхідно ввести строгі, формальні визначення кожної гарантії. Узгодженість (Consistency, C) в контексті CAP інтерпретується як лінеаризованість (або атомарність), що є властивістю безпеки, коли кожна операція читання повертає результат останнього завершеного запису або помилку, створюючи ілюзію виконання всіх операцій на єдиному централізованому сервері. Доступність (Availability, A) гарантує, що кожен запит, отриманий вузлом, що не відмовив, врешті-решт призведе до відповіді, хоча й без гарантії актуальності даних. Стійкість до розділення (Partition Tolerance, P) вимагає від системи продовжувати

функціонування, незважаючи на довільну кількість повідомлень, втрачених або затриманих мережею. Для географічно розподілених систем, якою є ЕЕМ, мережеві розділення є неминучою операційною реальністю. Більше того, в контексті ЕЕМ цей абстрактний термін набуває прямого фізичного втілення, де мережеве розділення є не просто втратою пакета даних, а обривом лінії електропередач, відмова підстанції або збій у каналі зв'язку. Такий сценарій відповідає острівному режиму роботи [242], коли частина мережі з розподіленою генерацією ізолюється, але повинна продовжувати автономне живлення локальних споживачів. Отже, вимога до ЕЕМ бути стійкою до фізичних пошкоджень є тотожною вимозі до розподіленої системи бути стійкою до розділення. Це робить властивість Р не опцією, а фундаментальною, невід'ємною характеристикою будь-якої резильєнтної архітектури ЕЕМ, зводячи вибір до дихотомії між узгодженістю та доступністю. Уточнення Брюера [243], зроблене у 2012 році, про те, що компроміс між С та А виникає лише під час розділення, є основою проектування ЕЕМ. Це означає, що система управління повинна бути спроектована для функціонування у двох режимах: нормальному (зв'язаному), де може підтримуватися високий рівень узгодженості, та аварійному (розділеному), жертвуючи узгодженістю.

Суворе узгодженість вимагає глобального впорядкування операцій, що досягається за допомогою протоколів консенсусу (див. розділ 1), які гарантують, що всі вузли погоджують стан системи перед виконанням запиту. В системі СР, під час розділення, будь-який вузол, що не може зв'язатися з необхідним кворумом, зобов'язаний стати недоступним, щоб уникнути порушення узгодженості. Забезпечення сильної, або лінеаризованої, узгодженості потребує блокуючих протоколів консенсусу [244], які неминуче вносять затримки. У випадку збоїв зв'язку система, що надає перевагу сильній узгодженості, може перестати відповідати, очікуючи на синхронізацію, що є неприпустимим. У разі фізичного пошкодження, ЕЕМ, побудована за моделлю СР, вимагала б, щоб ізольовані сегменти (мікромережі) припинили свою роботу, оскільки вони не можуть досягти консенсусу з основною мережею. Крім того,

операції в реальному часі, що вимагають реакції на рівні мілісекунд, несумісні з комунікаційними затримками та недоліками синхронних протоколів консенсусу [245]. Досягнення глобального консенсусу для системи з мільйонів гетерогенних вузлів є практично неможливим. Намагання нав'язати сувору узгодженість децентралізованим ЕЕМ є архітектурною суперечністю, що підриває саму ідею резильєнтності [246].

Отже, єдиною життєздатною архітектурною парадигмою для сучасної ЕЕМ є модель АР, що імпліцитно ґрунтується на принципі кінцевої узгодженості. Система АР свідомо обирає залишатися доступною під час розділення, допускаючи тимчасову розбіжність даних.

Формально, ЕС гарантує, що за відсутності нових оновлень, усі операції читання врешті-решт повертатимуть останнє записане значення [247]. Ця модель є основою підходу BASE, який є альтернативою традиційним гарантіям ACID [248]. Саме модель АР дозволяє ізольованим мікромережам продовжувати автономне функціонування, залишаючись доступними для обслуговування локальних навантажень, навіть якщо їхній стан тимчасово розходиться з рештою мережі.

Відмовляючись від блокуючої синхронної комунікації, локальні контури керування можуть працювати з низькою затримкою, що є критичним для стабільності. Крім того, розподілена оцінка стану (Distributed State Estimation, DSE) [248–251] в ЕЕМ, що працює з асинхронними даними, органічно вписується в модель кінцевої узгодженості, яка розроблена для злиття асинхронних оновлень з часом.

Кінцева узгодженість є необхідною умовою для справді децентралізованої та автономної системи керування, надаючи механізм, за допомогою якого незалежні агенти можуть діяти локально і з часом формувати узгоджене ціле. Систематичне порівняння двох моделей демонструє їхню різну придатність для керування ЕЕМ (Таблиця 2.1.1):

Таблиця 2.1.1. Порівняння СР та АР моделей.

Атрибут	СР	АР
Основна гарантія	Лінеаризованість – усі вузли бачать однакові дані одночасно.	Конвергенція – якщо оновлення припиняються, усі вузли з часом збігаються до однакового стану.
Вимога до консенсусу	Висока (Paxos, Raft), вимагає синхронної координації.	Низька або відсутня; вирішення конфліктів за детермінованими правилами.
Поведінка під час розділення	Блокування або відмова операцій для збереження узгодженості.	Усі вузли залишаються доступними; допускається розбіжність станів.
Системна затримка	Висока через транзакційність кворуму.	Низька, оскільки операції виконуються на локальній репліці негайно.
Складність реалізації	Висока через складність протоколів консенсусу.	Помірна, складність переноситься на рівень застосунку.
Придатність для ЕЕМ	Непридатна для макрокерування в реальному часі.	Високопридатна, пріоритезує доступність та автономну роботу.

Критика концепції кінцевої узгодженості [249, 250] традиційно апелює до того факту, що вона забезпечує лише гарантію доступності [251], проте не надає гарантій безпеки для проміжних станів, що є потенційно неприйнятним для критичної інфраструктури. Однак сучасні механізми реалізації дозволяють зробити цю модель надійною [252, 253]. Це вказує на доцільність використання таких підходів, як CRDT, що є спеціалізованими структурами даних, розробленими для забезпечення кінцевої узгодженості в розподілених системах без необхідності в дорогих протоколах синхронізації, що повністю відповідає висновкам попереднього розділу щодо потреби у низькорівневих механізмах гарантованої синтаксичної узгодженості, стійких до асинхронності. CRDT гарантують сильну кінцеву узгодженість (Strong Eventual Consistency, SEC) [229], модель, в якій репліки, що отримали однаковий набір оновлень, будуть перебувати в ідентичному стані, незалежно від порядку їх доставки. Це досягається завдяки тому, що операції над CRDT за своєю природою є комутативними, що ґрунтується на математичній теорії напівґраток, і усуває потребу в складній логіці вирішення конфліктів. У контексті розподіленої оцінки стану, система може бути змодельована як складний CRDT, де кожне вимірювання є комутативною операцією, що застосовується до вектора стану, гарантуючи конвергенцію без централізованого злиття даних. Таким чином, CRDT забезпечують детермінований і математично гарантований результат конвергенції, роблячи модель AP достатньо надійною для керування критичною інфраструктурою.

Перехід до парадигми кінцевої узгодженості слід інтерпретувати як імператив для проектування сучасних ЕЕМ. Визнання того, що стійкість до розділення є фізичною необхідністю, а сувора узгодженість операційно неможлива, змушує прийняти модель AP. Імплементація цієї моделі за допомогою математично обґрунтованих механізмів, таких як CRDT, дозволяє вирішити фундаментальну проблему синтаксичної узгодженості даних, гарантуючи, що репліки даних збігатимуться до ідентичного стану. Однак, це вирішує лише частину проблеми. Залишається відкритим питання семантичної

узгодженості: як система може інтерпретувати ці, хоч і синтаксично збіжні, але потенційно суперечливі дані для формування когерентного уявлення про фізичний стан ЕЕМ? Що саме означає “узгодженість” з точки зору операційної логіки та фізичних законів, що керують мережею? Для відповіді на ці питання необхідно піднятися на вищий рівень абстракції, перейшовши від механізмів синхронізації даних до формалізмів, здатних оперувати знаннями та їх значенням [254, 255].

Розробка нової концепції когнітивної алгебраїчної системи покликана надати формальний базис для опису та аналізу когнітивних процесів в інтелектуальних КФС, якими є сучасні ЕЕМ. КАС дозволить не лише визначити, що є “узгодженим” станом мережі на семантичному рівні, але й реалізувати механізми для досягнення цієї семантичної узгодженості, тим самим завершуючи перехід до інтелектуального керування. Саме тому, розробці КАС для семантичної узгодженості, використанню CRDT для забезпечення синтаксичної консистентності, а також комбінованому поєднанню КАС та CRDT в рамках високорівневих топологічних об’єднань, що реалізують логічне групування суб’єктів та об’єктів ЕЕМ, і будуть присвячені наступні підрозділи дисертації.

2.2. ВТО: високорівневі топологічні об’єднання

Як було обґрунтовано у попередньому підрозділі, стійкість до розділення є не просто бажаною характеристикою, а фундаментальною вимогою для забезпечення надійного функціонування сучасних ЕЕМ. Відповідно, для того, щоб будувати стійкі до відмов архітектури мереж, виникає нагальна потреба у розробці логічно-функціональної моделі, здатної інкорпорувати визначену множину гетерогенних властивостей суб’єктів та об’єктів ЕЕМ.

Для спрощення формалізації процесів оцінки та ефективного функціонування ЕЕМ вводиться абстрактне поняття високорівневого топологічного об’єднання (ВТО). ВТО визначаються як логічні, динамічно формовані угруповання фізичних або програмних вузлів мережі (таких як

генератори, споживачі, накопичувачі енергії, контролери), що функціонують як єдині, відносно автономні структурні одиниці. Кожне ВТО інкапсулює складні низькорівневі фізичні та інформаційні взаємодії, а також гетерогенні характеристики своїх дочірніх компонентів, представляючи для зовнішньої системи спрощену, агреговану модель свого стану та поведінки. Поведінка на вищому рівні є емерджентною властивістю, що виникає з нелінійних взаємодій на нижчих рівнях. Такий підхід дозволяє системі управління оперувати на вищому рівні абстракції, працюючи з меншою кількістю складних об'єктів-ВТО замість мільйонів окремих вузлів, що зменшує локальну складність системи. Склад ВТО, тобто множина вузлів, що його утворюють, може змінюватися з часом залежно від стану мережі, економічних сигналів або цілей системи управління.

У цьому дослідженні ВТО розглядаються як “слабкі топології” [256], тобто такі, для яких поняття “близькості” та “відкритої множини” визначаються не евклідовою відстанню, а абстрактними парами функціональної зв'язності та впливу, представляючи логічно-наслідкові угруповання. ВТО можуть частково або повністю відповідати ключовим критеріям, що визначають математичну топологію. Критерії для формування таких угруповань можуть бути функціональними (група генераторів, що спільно надають послугу регулювання частоти), економічними (група споживачів, що беруть участь у програмі управління попитом) або базуватися на критеріях стійкості та взаємного впливу. По суті, ВТО представляють логічне, динамічно формоване угруповання фізичних та кібернетичних вузлів мережі.

Комплексна структура сучасних ЕЕМ характеризуються складною, багаторівневою ієрархією, що охоплює різні географічні та функціональні масштаби. Ця структура не є простою вкладеністю, а являє собою систему зі складними взаємодіями, де поведінка на вищому рівні є емерджентною властивістю, що виникає з нелінійних взаємодій на нижчих рівнях.

За рівнем групування ЕЕМ поділяються на:

1. Мікромережа [257], що, зазвичай, є частиною регіональної синхронної мережі, проте, за потреби, може працювати автономно в острівному режимі [258].
2. Синхронна мережа регіонального масштабу [259].
3. Супермережа [260], здатна підтримувати глобальну енергетичну стабільність, згладжуючи локальні коливання енергії вітру та сонця.

ВТО визначаються як абстрактні сутності управління, що характеризуються набором фундаментальних властивостей, які дозволяють ефективно керувати складністю. Вузли системи, що входять до складу ВТО або є самостійними топологічними утвореннями, можуть бути представлені у вигляді певного стану. Цей стан частково або повністю описує поведінку вузла в контексті ВТО протягом заданого часового проміжку. Важливо, що стани окремих вузлів мають бути узгоджені з загальним контекстом ВТО, а також, принаймні, з більшістю внутрішніх контекстів інших вузлів, що входять до складу даного ВТО.

Завдяки своїй абстрактній природі, ВТО можуть бути ефективно використані для формалізації відношень між системними вузлами. Це, у свою чергу, уможливорює розробку комплексних моделей управління як для окремих об'єктів ВТО, так і для системи в цілому.

Слід виділити наступні властивості ВТО:

1. **Інкапсуляція стану.** ВТО діє як “чорна скринька”, що приховує свою внутрішню топологію, типи та кількість дочірніх пристроїв, а також специфічні протоколи управління, які використовуються всередині об'єднання. Зовнішній світ взаємодіє з ВТО через стандартизований інтерфейс, не вдаючись у деталі його внутрішньої реалізації.
2. **Абстракція стану.** ВТО представляє свій складний внутрішній стан у вигляді спрощеного, агрегованого набору параметрів. Цей набір може включати сумарну потужність генерації та споживання, доступний резерв потужності, сумарну кінетичну енергію та інші макропараметри, що характеризують ВТО як єдиний об'єкт.

3. **Автономність.** Кожне ВТО наділене здатністю до автономного прийняття рішень для досягнення локальних цілей. Такими цілями можуть бути максимізація економічної ефективності, забезпечення енергетичної самодостатності, підвищення надійності для критичних навантажень або надання певних послуг системі вищого рівня.
4. **Композиційність.** Властивість композиційності дозволяє будувати ієрархічні системи управління. Декілька ВТО нижчого рівня можуть бути логічно об'єднані для формування ВТО вищого рівня, яке, в свою чергу, інкапсулює їхню сукупну поведінку. Цей принцип дозволяє масштабувати систему управління, зберігаючи керованість на кожному рівні абстракції.

Внутрішня організація ВТО спроектована для забезпечення автономності та узгодженості без централізованої координації. Вузли всередині ВТО обмінюються інформацією про зміни своїх станів або операціями, що спричинили ці зміни, за допомогою децентралізованих протоколів. Кожен вузол або спеціалізований контролер всередині ВТО має доступ до локальної копії узгодженого агрегованого стану. На основі цієї інформації та локальних цілей ВТО, праймаються управляючі рішення (наприклад, змінити потужність генератора, відключити навантаження).

Внутрішній контекст описує взаємодії та відносини всередині одного топологічного об'єднання. Вузли, що належать до одного ВТО, мають високий ступінь функціональної зв'язності [261]. Управління всередині ВТО спрямоване на досягнення локальних цілей, таких як стабілізація напруги, балансування навантаження або оптимізація роботи локальних ресурсів. Стан ВТО визначається сукупністю станів його компонентів та їх взаємозв'язків.

Взаємодія між ВТО може бути реалізована через різноманітні механізми координації, такі як ринкові аукціони, двосторонні переговори або алгоритми кооперативної оптимізації. Ці механізми дозволяють ВТО узгоджувати свої дії для досягнення глобальних цілей системи, таких як підтримка балансу потужності або стабільності напруги в усій мережі.

Зовнішній контекст описує взаємодію між різними топологічними об'єднаннями. ВТО взаємодіють між собою через чітко визначені інтерфейси, обмінюючись агрегованою інформацією та енергією. Ці взаємодії можуть бути кооперативними (наприклад, спільне надання послуг системному оператору) або конкурентними (наприклад, участь у ринку електроенергії). Зовнішній контекст визначає, як ВТО впливають одне на одного та на загальний стан енергосистеми.

Високорівневе топологічне об'єднання A визначається передусім як множина фізичних вузлів мережі N_A . Це угруповання не є довільним, а формується на основі спільних функціональних характеристик, цілей управління або сильного взаємного впливу між вузлами. Наприклад, ВТО може об'єднувати всі пристрої в межах однієї мікромережі, групу генераторів, що надають послуги регулювання частоти, або сукупність споживачів, що беруть участь у програмі управління попитом. Ключовою особливістю такого підходу є його динамічність. Склад ВТО (множина N_A) може змінюватися з часом залежно від стану мережі, економічних сигналів або цілей системи управління. Це відрізняє ВТО від статичної фізичної топології мережі [262].

Взаємодія між ВТО A (з множиною вузлів N_A) та B (з множиною вузлів N_B) може бути описана за допомогою набору базових операцій та відношень:

1. Операція об'єднання $A \cup B$ – відповідає функціональному злиттю двох ВТО в одне нове, $C = A \cup B$. Нова множина вузлів N_C є теоретико-множинним об'єднанням $N_C = N_A \cup N_B$. Ця операція застосовується, коли дві раніше окремі функціональні групи починають діяти як єдине ціле, створюючи нове ВТО вищого рівня, яке інкапсулює їхні об'єднані ресурси та цілі. Наприклад, дві сусідні мікромережі можуть об'єднатися для спільного виходу на ринок електроенергії.
2. Операція роз'єднання $A \oplus B$ – відповідає функціональному роз'єднанню однієї ВТО на дві функціонально незалежні ВТО. Передбачається, що

множини їхніх вузлів не перетинаються $N_A \cap N_B = \emptyset$ і між ними відсутні будь-які значущі функціональні зв'язки. Це формально відображає їхню ізоляцію та автономну роботу в рамках більшої системи.

3. Відношення взаємодії $A \sim B$ - описує наявність значущої взаємодії між двома різними ВТО ($A \neq B$). Взаємодія може бути фізичною (потоки енергії), інформаційною (обмін даними) або управляючою (координовані дії). Формально, відношення $A \sim B$ є істинним, якщо існує непорожня множина функціональних зв'язків між вузлами N_A та N_B : $A \sim B \Leftrightarrow \exists(n_A, n_B)$, де $n_A \in N_A$, $n_B \in N_B$ та існує зв'язок $\sim(n_A, n_B)$. Це відношення моделює, наприклад, обмін потужністю між двома сусідніми регіональними мережами або координацію між споживачем A та оператором B .

Тут варто зазначити, що різні ВТО можуть мати спільну вузлові об'єднання, тобто якщо $\exists e : (e \in N_A \wedge e \in N_B) \Rightarrow A \wedge B$ – суміжні. Таке співвідношення можна представити за допомогою об'єднання та роз'єднання описаного вище: $A^\bullet = A \oplus B + A \cup B$ $\wedge B^\bullet = B \oplus A + B \cup A$, де $A \cup B = B \cup A$.

Ієрархічні відношення та взаємодії ВТО визначаються організацією та ієрархічною структурою, де взаємодії можуть відбуватися на різних рівнях. Розглянемо відношення на прикладі ВТО A , що може складатися як з одного, так і з декількох вузлів:

1. Дія на себе ($A \rightarrow A$) – це внутрішня динаміка ВТО. Взаємодія між вузлами $n_i, n_j \in N_A$ регулюється внутрішніми правилами та спрямована на досягнення локальних цілей A . A може бути тривіальною, по аналогії з групою в строго алгебраїчному сенсі, тобто $A = \{n_A\}$, де n_A - нейтральний елемент. Відповідно потужність ВТО $|A| = 1$. В такому випадку йдеться про дію нейтрального елемента на самого себе, що є формою самоуправління та виражає індивідуальні цілі ВТО.

2. Дія на високорівневу топологію ($A \rightarrow A_h$, де $N_A \subset N_{A_h}$) – це процес агрегації, ініційований в деякий момент часу t зміною стану A . ВТО A є складовою частиною високорівневої топології A_h . Стан $S(A)$ та поведінка A впливають на агрегований стан $S(A_h)$ вищого рівня. Наприклад, сумарна генерація мікромережі A враховується при балансуванні потужності на рівні регіональної мережі A_h . Тобто

$$S_t(A_h) = S_t(A) + C = \sum_{i=1}^j S_t(n_{A,i}) + C, \quad \text{де} \quad n_{A,i} \subset N_A, \quad \text{а}$$

$$C = [|A_h - A| > 0] \cdot \sum_{i=1}^j S_t(\{n_{A_h}\} - \{n_A\}).$$

3. Дія на низькорівневу топологію ($A \rightarrow A_l$, де $N_A \subset N_{A_l}$) – це процес дезагрегації, або управління, ініційований в деякий момент часу t зміною стану A . ВТО A задає цілі та обмеження для своїх підсистем. Наприклад, регіональна мережа A може надсилати управляючі сигнали (цінові стимули, команди на зміну потужності) до окремої мікромережі A_l , що

$$\text{входить до її складу } S(A_l) = f(S(A)) = \sum_{x \in A \cap A_l} f(x), \text{ де } f: x \mapsto x^*.$$

4. Дія на іншу топологію ($A \rightarrow B$, де $N_A \cap N_B = \emptyset$ і $\nexists T_h: \{A, B\} \subseteq T_h$) – це зовнішня взаємодія, що описується відношенням $A \sim B$, визначеним раніше. Враховуючи $|A|$ та $|B|$, формально така взаємодія може бути точковою ($|A| = 1$ або $|B| = 1$) або мультиплексивною ($|A| > 1$ і $|B| > 1$). При точковій взаємодії результуючий стан визначається параметрами на межі (A або B) та станом єдиного вузла (n_b або n_a). Наприклад, ВТО A (група генераторів) постачає енергію одному великому промисловому споживачу B . При мультиплексивній взаємодії результуючий стан визначається взаємодією множини вузлів N_A та N_B . Характер взаємодії

(наприклад, обсяг та напрямок потоків потужності) залежить від агрегованих станів $S_t(A)$ та $S_t(B)$ обох ВТО в деякий момент часу t .

Замість розв'язання обчислювально складних глобальних оптимізаційних задач на основі повної моделі, застосовується семантична абстракція та формально визначена структурна адаптація. ВТО декомпонують глобальну систему на керовані автономні модулі, інкапсулюючи локальну складність, що забезпечує створення масштабованої та стійкої до відмов архітектури управління. Математична формалізація операцій над ВТО (об'єднання, роз'єднання) та ієрархічних відношень створює строгий фундамент для аналізу і динамічної реконфігурації системи, призначеної для подолання експоненціальної складності сучасних ЕЕМ, що буде використаний у наступних розділах. Організаційно ВТО можуть розглядатися як незалежні кластерні угруповання, що було розглянуто в роботі [263], а ієрархічна структура ВТО як граф.

2.3. КАС: семантичне узгодження

Попередні розділи виявили відсутність єдиного формального базису для досягнення семантичної узгодженості в умовах зростаючої гетерогенності та складності сучасних ЕЕМ. Для вирішення цієї проблеми, в даному розділі розробляється та вводиться нова концепція когнітивної алгебраїчної системи (КАС), покликаної надати формальний апарат для опису та аналізу когнітивних процесів в інтелектуальних КФС. Фреймворк КАС розроблено як узагальнену модель когнітивної діяльності, що здатна інтегрувати не лише формальні логіки та теорію моделей, але й широкий спектр математичних моделей, включно з методами машинного навчання. Це позиціонує КАС як потенційну метамодель для опису та аналізу поведінки інтелектуальних або автономних систем, що діють у складних, динамічних середовищах. Завдяки цьому, КАС дозволить не лише строго визначити, що є “узгодженим” станом мережі на семантичному рівні, але й реалізувати формальні механізми для досягнення цієї узгодженості,

тим самим створюючи теоретичний фундамент для опису та аналізу поведінки інтелектуальних систем у складних, динамічних середовищах.

Для ефективної інкорпорації семантики в моделі складних систем необхідно перейти від суто якісних описів до кількісних оцінок, що вимагає побудови метричних просторів для семантичних об'єктів. Фундаментальною основою будь-якого метричного простору [264] є наявність функції відстані (міри), яка дозволяє кількісно виражати “близькість” або “відмінність” між об'єктами та суб'єктами цього простору. Маючи такий інструмент, стає можливим формально визначати та аналізувати семантичні відношення, такі як схожість, еквівалентність чи толерантність. Тому, перш ніж будувати складні семантичні структури, важливо строго визначити властивості, яким повинна задовольняти функція відстані, щоб забезпечити математичну коректність усього подальшого аналізу.

Математична строгість вимагає, щоб будь-яка функція відстані, яка використовується для визначення “близькості” чи “відмінності” між семантичними об'єктами, задовольняла чіткому набору аксіом; без цього такі операції, як кластеризація чи пошук, втрачають свою обґрунтованість і залишаються на рівні інтуїтивних метафор. Щоб подолати це ключове обмеження та побудувати математично коректний апарат для оперування семантичними структурами, в даній роботі вводиться поняття сильної (або строгої) математичної міри [220]. Основна мета введення цього терміну полягає в тому, щоб із самого початку закласти формальний аксіоматичний фундамент для побудови метричного простору семантичних об'єктів. Такий підхід, на відміну від моделей, де метричність простору лише постулюється, забезпечує низку критично важливих переваг: математичну обґрунтованість усіх подальших операцій, обчислювальну застосовність широкого класу алгоритмів, що покладаються на властивості метрики, а також верифікованість та відтворюваність результатів. Таким чином, введення поняття сильної математичної міри є необхідною для подальшої розробки КАС, гарантуючи, що всі визначення та операції в ньому будуть математично коректними.

Під сильною (або строгою) математичною мірою $f(x, y)$ розуміємо функцію відстані між двома алгебраїчними об'єктами, x та y , таку, що виконуються наступні аксіоми:

- тотожності ($f(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$);
- симетрії ($f(x, y) = f(y, x)$);
- нерівності трикутника ($f(x, y) \leq f(x, k) + f(k, y)$), де k є також алгебраїчним об'єктом.

Якщо для функції відстані $f(x, y)$ виконуються лише аксіоми тотожності та симетрії, будемо вважати це слабкою мірою.

Під алгебраїчною системою (АС) $Y = \langle A, \Lambda, P \rangle$ розуміють довільну непусту множину $A = \langle \alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots \rangle$ з визначеним набором кінцевоарних операцій $\Lambda = \langle \lambda_1: A^{n_1} \rightarrow A, \dots, \lambda_i: A^{n_i} \rightarrow A, \dots \rangle$ та кінцевоарних відносин $P = \langle \rho_1 \subseteq A^{m_1}, \dots, \rho_i \subseteq A^{m_i}, \dots \rangle$ [265]. Множину A називають носієм системи, а набір функціональних та предикатних символів з їх арностями $\langle \Lambda, P, \langle n_1, \dots, n_i, \dots \rangle, \langle m_1, \dots, m_i, \dots \rangle \rangle$ – її сигнаторію. Система $Y = \langle A, \Lambda, P \rangle$ з пустою множиною відносин $P = \emptyset$ має назву універсальної алгебри [266], а з пустою множиною операцій $\Lambda = \emptyset$ – моделлю.

Найцікавішими властивостями АС в контексті проблеми формалізації когнітивних процесів є наступні:

1. АС є узагальненням алгебраїчних структур, де під алгебраїчною структурою розуміємо не пусту множину, над якою визначено деякі операції та яким притаманні певні властивості. Прикладами таких структур є групи, кільця та поля.
2. З пустою множиною операцій $\Lambda = \emptyset$ АС $Y = \langle A, \Lambda, P \rangle$ трансформується у модель $Y = \langle A, P \rangle$, яка встановлює фундаментальний зв'язок між синтаксисом та семантикою.

3. Абстракція кінцевоарних відносин $P = \langle \rho_1 \subseteq A^{m_1}, \dots, \rho_i \subseteq A^{m_i}, \dots \rangle$ дозволяє включити до АС відношення рівності, еквівалентності та толерантності.

Під концептом АС будемо розуміти будь-який елемент з A, Λ, P елемент декартового добутку $\Lambda \times P$ або підмножину з булеану $B(\Lambda \times P)$.

Під когнітивною алгебраїчною системою (КАС) будемо розуміти таку АС, для якої виконуються наступні умови:

1. Найпростіше поле дійсних чисел $R \in$ підсистемою АС:

$$\langle R, +, * \rangle \subset Y: R \subset A, \{+, *\} \subset \Lambda, \text{ де } \{+, *\} \text{ – бінарні операції.}$$

2. Межам інтервалу $\Psi =^{def} [0, 1], \Psi \in R$ відповідають логічні значення: $true =^{def} 1, false =^{def} 0$. Будь-яке значення $\mu \in \Psi$ можна трактувати як оцінку істинності, толерантності (схожості) або ймовірності. Тоді будь-який предикатний символ з $P \in$ функцією $\rho_i: A^{m_i} \rightarrow \{0, 1\}$.

3. Задано інтервал якісних оцінок $\Omega =^{def} [-1, 1], \Omega \in R, \Omega = -\Psi \cup \Psi$, де $\omega = -1$ означає вкрай негативну оцінку, а $\omega = 1$ – максимально позитивну. Невизначеність на вказаному інтервалі сягає свого максимуму в точці $\omega = 0$ та мінімуму в точках $\omega = -1$ та $\omega = 1$, що відповідає природі інформаційної ентропії за Шенноном [130]. Наявність інтервалу якісних оцінок створює фундамент суб'єктивізму КАС.

4. Існує бінарна операція $A^2 \rightarrow \Psi$ над носієм системи $A = \langle \alpha_i, \alpha_j, \dots \rangle$, яка визначає міру відмінності двох об'єктів, де для будь-яких двох об'єктів $\alpha_i \in A$ та $\alpha_j \in A$ виконуються аксіоми сильної міри.

5. Існує бінарна операція $\lambda(P)(\rho_i, \rho_j) \rightarrow \Psi$ над множиною кінцевоарних відносин P , яка визначає сильну міру відмінності двох відносин, де для будь-яких двох відношень $\rho_i \in P$ та $\rho_j \in P$.

6. Існує бінарна операція $\lambda_{(\Lambda)}(\lambda_i, \lambda_j) \rightarrow \Psi$ над множиною кінцевоарних операцій Λ , яка визначає сильну міру відмінності двох функцій, де для будь-яких двох операцій $\lambda_i \in \Lambda$ та $\lambda_j \in \Lambda$.
7. Прямий добуток $\Lambda \times P$ утворює теоретичний функціональний простір (ТФП) КАС [267]. Кожна пара (λ_i, ρ_j) та $\Lambda \times P$ КАС має ймовірність реалізації $\mu_j, j \in \Psi$. Вочевидь, якщо для всіх можливих пар (λ_i, ρ_j) ймовірності реалізації дорівнюють одиниці, $\mu_{i,j} = 1$, то множина, утворена елементами $(\lambda_i, \rho_j, \mu_{i,j})$, збігається з теоретичним функціональним простором. В загальному випадку підмножина пар (λ_i, ρ_j) , для яких ймовірності реалізації дорівнюють одиниці, формують фактичний функціональний простір (ФФП) КАС. Якщо для всіх можливих пар (λ_i, ρ_j) ймовірності реалізації дорівнюють одиниці, то ФФП дорівнює ТФП. Всі $\mu_{i,j} \in \Psi$ утворюють матрицю ймовірностей реалізації M .

Звернемо увагу на те, що $(\lambda_i, \rho_j, \mu_{i,j})$, є частковою функцією з семантикою, що функція λ_i може бути використана з ймовірністю $\mu_{i,j}$, якщо визначено відносину ρ_j . Набір часткових функцій, що утворюють ФФП КАС є “знання” про те, які функції і при яких умовах можуть бути застосовані.

Розглянемо трійку $(\lambda_i, \rho_j, \mu_{i,j})$, в якій функція λ_i може бути використана з ймовірністю $\mu_{i,j}$, якщо визначено відносину ρ_j . Фактично $\mu_{i,j}$ – ймовірність практичної реалізації функції λ_i , а ρ_j – ймовірність теоретичної реалізації функції λ_i . Якщо $\rho_j = 0$, а $\mu_{i,j} > 0$, то це є функціонально логічні протиріччя КАС, тобто існує ненульова оцінка ймовірності реалізації того, що не може бути реалізовано принципово (теоретично). Фактично трійка $(\lambda_i, \rho_j, \mu_{i,j})$, визначає

семантику елемента носія, якщо такий елемент включено в області визначення функції λ_i та предикату ρ_j .

8. Для двох пар з прямого добутку $\Lambda \times P$ задано функцію оцінки толерантності $\lambda_{(\Lambda \times P)}((\lambda_i, \rho_i), (\lambda_j, \rho_j)) = [1 - \lambda_{(P)}(\rho_i, \rho_j)][1 - \lambda_{(\Lambda)}(\lambda_i, \lambda_j)]$, де $1 - \lambda_{(P)}(\rho_i, \rho_j)$ – оцінка толерантності відносин; $1 - \lambda_{(\Lambda)}(\lambda_i, \lambda_j)$ – оцінка толерантності функцій, яка дорівнює одиниці мінус оцінка міри відмінності. Вочевидь, $\lambda_{(\Lambda \times P)}: (\Lambda \times P)^2 \rightarrow \Psi$. Функція толерантності $\lambda_{(\Lambda \times P)}$ та ймовірність реалізації $\mu_{i,j}$ пари $(\lambda_i, \rho_i) \in$ складовою механізму оцінки гіпотез, в якому можна побудувати композицію функцій та оцінити ймовірність її реалізації. Випадок $\mu_{i,j} = 0$ може бути охарактеризований словом «нонсенс», але в дійсності, $\mu_{i,j} \in A$, тому що $\mu_{i,j} = \Psi, \Psi \in R \text{ і } R \in A$.

Під композицією двох унарних функцій з визначеними ймовірностями реалізації та умовами реалізації, $(\lambda_i, \rho_j, \mu_{i,j})$ та $(\lambda_k, \rho_l, \mu_{k,l})$, будемо розуміти таку унарну функцію з визначеними ймовірностями реалізації та умовами реалізації $(\lambda_m, \rho_n, \mu_{m,n})$, що

$$(\lambda_i, \rho_j, \mu_{i,j}) \circ (\lambda_k, \rho_l, \mu_{k,l}) \rightarrow (\lambda_i \circ \lambda_k, \rho_j \wedge \rho_l, \mu_{i,j} \wedge \mu_{k,l}) \Leftrightarrow (\lambda_m, \rho_n, \mu_{m,n}) \quad (2.3.1)$$

Постає питання, що робити з функціями $\lambda: A^n \rightarrow A$, де $n > 1$ – арність більша за одиницю. Теорія категорій [268] за допомогою карінгу дозволяє подати функцію $\lambda: A^n \rightarrow A$ як $\lambda: \lambda_1 \circ \lambda_2 \circ \dots \circ \lambda_n$, де будь-яка функція $\lambda_i, i \in [1, n]$ є унарною. В такому випадку для $\lambda: A^n \rightarrow A$ композиція 2.3.1 набуває вигляду $(\lambda, \rho, \mu) = (\lambda_1 \circ \lambda_2 \circ \dots \circ \lambda_n, \rho, \mu) = (\lambda_1, \rho, \mu) \circ (\lambda_2, \rho, 1) \circ \dots \circ (\lambda_n, \rho, 1)$,

де $\lambda_i: A^n \rightarrow A$. Отже, (1) є мультифунктором, коваріантним за функціями з Λ та інваріантним за ймовірностями реалізації M зазначених функцій при певних умовах, визначених відносинами P . Композиція 2.3.1 уможливорює використання інструментарію теорії категорій, де зазначена композиція є

основним механізмом когнітивної діяльності КАС при напрацюванні гіпотез та оцінки ймовірності її реалізації.

З огляду на вимогу 7, композиція є вільною від функціональнологічних протиріч, якщо жодна з трійок цієї композиції не є функціонально-логічним протиріччям КАС. Якщо порівняти композицію з процесом мислення, то композиція, вільна від функціонально-логічних протиріч, є потенційним прототипом логічного та зваженого мислення.

9. Для добутку $M \times \Lambda \times P \times A$ ($\mu_{i,j} \in \{0, 1\}$) визначено сюр'єктивну функцію

$$\lambda_{\beta\alpha} : (M \times \Lambda \times P \times A) \rightarrow \Omega, \quad (2.3.2)$$

де пустій множині $M \times \Lambda \times P \times A = \emptyset$ відповідає нуль: $\lambda_{\beta\alpha} = 0$. Функція 2.3.2 є не що інше, як таблично задана миттєва проекція суб'єктивного досвіду, яка ставить у відповідність множині функцій, що можуть бути реалізовані, та підмножині об'єктів носія, оцінку суб'єктивного ставлення, де множина функцій, що можуть бути реалізовані, визначає миттєвий контекст когнітивної діяльності, а підмножини об'єктів носія – спостереження когнітивної системи. В подальшому до функції 2.3.2 будемо застосовувати словосполучення “функція суб'єктивного досвіду” (ФСД).

10. Для двох будь-яких миттєвих контекстів β_i та β_j з булеану $B(\Lambda \times P)$ задано функцію оцінки толерантності $\lambda_{\beta^2} : B^2(\Lambda \times P) \rightarrow \Psi$ як слабку міру.

Наведені умови дозволяють побачити ще одну важливу властивість КАС – консистентність миттєвого суб'єктивного ставлення або відсутність протиріч суб'єктивного ставлення. КАС є миттєво консистентною, якщо для будь-яких трьох контекстів, β_k, β_l та β_m , виконується наступна умова:

$$\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) - \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m) = C(\lambda_{\beta}(\beta_k) - \lambda_{\beta}(\beta_m)), \quad C > 0. \quad (2.3.3)$$

По-перше, інтуїтивно зрозуміло, що у випадку, коли $\beta_k = \beta_m$, то $\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) = \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m)$ і $\lambda_{\beta}(\beta_k) = \lambda_{\beta}(\beta_m)$ та рівняння 2.3.3 завжди

виконуються незалежно від C , тому що відмінність однакових контекстів дорівнює нулю і відмінність суб'єктивного ставлення до одного й того ж контексту також дорівнює нулю.

По-друге, рівняння 2.3.3 свідчить, що будь-які два контексти можна порівнювати виключно за наявності третього, який виступає своєрідним “умовним центром порівняння”. Якщо спростити КАС до координатної системи на площині, де у відповідність контекстом ставляться точки, то для якісного порівняння двох точок виникає потреба у центрі координат, обумовлена аксіомою нерівності трикутника, який і є “центром” порівняння.

У випадку $C > 0$ рівняння 2.3.3 свідчить про те, що відносно контексту β_l відмінність між контекстами β_k та β_m прямо пропорційна відмінності між суб'єктивним ставленням до тих же контекстів. Тобто чим більш схожі один на одного контексти, тим більше буде схоже суб'єктивне ставлення до них в консистентній КАС. Це важливо тому, що така консистентність гарантує ефективний спосіб пошуку альтернативних гіпотез, які за рівнем суб'єктивного відношення теоретично будуть рівновіддалені від деякого “центра порівняння”, що є теоретичним оптимальним рішенням. Також даний механізм дозволяє реалізувати систему знань про небажані сценарії розвитку подій, прогножуючи та виявляючи неочевидні патерни. У випадку $C > 0$ створюється аналітичний функціональний простір КАС, що дозволяє використовувати градієнтні (основані на понятті похідної) методи пошуку оптимального рішення.

Умова 2.3.3 при $C = 0$ описує стан, який назовемо апатія КАС. Якщо $\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) = \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m)$ для будь яких контекстів β_k , β_l та β_m , а $\lambda_{\beta}(\beta_k) = \lambda_{\beta}(\beta_m)$, то $C = 0$. Фактично рівняння $\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) = \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m)$ свідчить про те, що суб'єктивно немає різниці між будь-якими двома контекстами, тобто КАС байдужа до контексту і може його ігнорувати при прийнятті рішень.

При $C < 0$ КАС має не аналітичний характер функціонального простору. Неважко показати, що при наближенні контекстів β_k та β_m один до одного,

тобто $\lambda_{\beta}(\beta_k) - \lambda_{\beta}(\beta_m) \rightarrow 0$, абсолютна різниця суб'єктивного ставлення буде такою: $\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) - \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m) \rightarrow 2$. Як бачимо, спостерігається стрибок значення (точка розриву першого роду) функції

$$\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) = \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m), \quad (2.3.4)$$

в оточенні точки $\beta_k = \beta_m (\lim \lambda_{\beta}(\beta_k) - \lambda_{\beta}(\beta_m) = 0)$ при $C < 0$:

$$\beta_k = \beta_m, \max(\lim[\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) - \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m)]) = 2,$$

$$\beta_k = \beta_m, \lim[\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l) - \lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m)] = 0. \quad (2.3.5)$$

Твердження 2.3.5 вимагає окремого коментаря щодо існування границі функції 2.3.4. З огляду на те, що кожна з функцій $\lambda_{\beta^2}(\beta_k, \beta_l)$ і $\lambda_{\beta^2}(\beta_l, \beta_m)$ обмежена згори та знизу за визначенням $\lambda_{\beta^2}: B^2(\Lambda \times P) \rightarrow \Psi$ і $\Psi = [0, 1]$, $\Psi \in R$, кожна з них має границю, відповідно 2.3.4 теж має границю за правилом різниці границь.

Спостереження 2.3.5 приводить до розуміння, що когнітивна система, в якій наявні протиріччя, не здатна до аналітичного пошуку оптимального рішення. Це спостереження дозволяє зрозуміти природу та обмеження КАС щодо контекстів когнітивної діяльності, але не дає можливості описати природу формування рішень. Для того щоб оцінити суб'єктивне відношення КАС до спостережень, що й буде основним мотивом при продукуванні когнітивного рішення, необхідно, перш за все, звернути увагу на 4-й умову, в якій висунуто вимогу існування бінарної операції $\lambda_{(A)}(\alpha_i, \alpha_j) \rightarrow \Psi$, яка за своєю суттю є мірою відмінності двох об'єктів, $\alpha_i \in A$ та $\alpha_j \in A$.

Існує два види протиріч КАС: функціонально-логічні та суб'єктивного ставлення. Вони дають змогу не тільки моделювати логічно-послідовне мислення (будувати композиції функцій, що реалізуються з певною ймовірністю при заданих умовах), уникаючи нонсенсу, але й оцінювати функцію помилки 2.3.2 (екстраполювати суб'єктивне ставлення) в разі його реалізації. Це дозволяє моделювання когнітивних процесів над об'єктами з семантикою.

Слід зауважити, що за визначенням КАС не встановлюється жодних вимог, які висуваються до природи функції $\lambda_{(A)}(\alpha_i, \alpha_j)$ крім вимог, притаманних строгой математичній мірі. Вочевидь, $\lambda_{(A)}(\alpha_i, \alpha_j)$ залежить від особистих характеристик кожного з об'єктів носія АС.

Характеристикою об'єкта носія $a_i \in A$ будемо називати підмножину функціонального простору КАС $\Lambda \times P$ таку, що $a_i \in \text{dom}(\lambda_m) \vee a_i \in \text{dom}(\rho_k), (\lambda_m, \rho_k) \in \Lambda \times P$. Тобто характеристикою об'єкта є властивості, які проявляються у відносинах з іншими об'єктами (бере участь у відношеннях), та дії, які можна виконати над цим об'єктом (унарні часткові функції) або з його допомогою (часткові функції багатьох змінних). За визначенням характеристики об'єкта носія можна дійти висновку, що міра відмінності двох об'єктів носія КАС семантично збігається з мірою відмінності двох множин, але з огляду на 8-й пункт умов КАС, міра толерантності часткових функцій $\lambda_{(\Lambda \times P)}((\lambda_i, \rho_i), (\lambda_j, \rho_j))$ може набувати будь-яких значень з інтервалу $\Psi \in [0, 1]$ (див. 3-й пункт). Тому використання суто множинних мір відмінності призводить до втрати корисної інформації при визначенні міри толерантності двох множин часткових функцій, які за математичними властивостями не відрізняються від контекстів когнітивної діяльності. Таким чином, приходимо до цікавого спостереження, що механізм оцінки міри толерантності між контекстами когнітивної діяльності є механізмом оцінки толерантності об'єктів носія.

Відносно контекстів та характеристик об'єктів потрібно обрати “умовний центр порівняння”. Найбільш інтуїтивна ідея полягає в тому, щоб порівнювати дві множини часткових функцій з їх об'єднанням. Цю ідею було використано в роботі [198].

Розвинувши цю ідею, представимо кожен з множин у вигляді вектора таким чином, щоб часткові функції в кожній координаті векторів множин, що порівнюються, відрізнялися від часткової функції умовного центру порівняння

якнайменше. Якщо певна координата умовного центру порівняння відсутня в певній множині, то обираємо найменшу ненульову оцінку міри відмінності.

Запропонована ідея може бути проілюстрована за допомогою двох векторів, де для кожної координати умовного центру порівняння хоча б одне значення координати векторів дорівнює нулю. Якщо певна часткова функція належить обом множинам, що порівнюються, то така координата буде дорівнювати нулю для обох векторів. В такому випадку евклідова норма вектора буде дорівнювати сумі квадратів мір відмінності часткової функції, а міра толерантності двох векторів відношенню найменшої евклідової норми до найбільшої.

На прикладі двох множин часткових функцій, $\{(\lambda_i, \rho_i), ((\lambda_j, \rho_j))\}$ та $\{(\lambda_l, \rho_l), ((\lambda_j, \rho_j))\}$, визначимо оцінки міри відмінності між частковими функціями, які утворюють діагонально симетричну квадратну матрицю (див. Таблиця 2.3.1). Для множини $\{(\lambda_i, \rho_i), ((\lambda_j, \rho_j))\}$ отримаємо вектор $\{0.0, 0.0, 0.2\}$ з евклідовою нормою 0,04, утворений парами $\{[(\lambda_i, \rho_i), (\lambda_i, \rho_i)], [(\lambda_j, \rho_j), (\lambda_j, \rho_j)], [(\lambda_l, \rho_l), (\lambda_l, \rho_l)]\}$. Для другого вектора часткових функцій отримаємо вектор $\{0.1, 0.0, 0.0\}$ з евклідовою нормою 0,01. Оцінка міри відмінності множин часткових функцій $\{(\lambda_i, \rho_i), ((\lambda_j, \rho_j))\}$ та $\{(\lambda_l, \rho_l), ((\lambda_j, \rho_j))\}$ дорівнює 0,25, а оцінка міри толерантності 0,75.

Таблиця 2.3.1. Оцінки міри відмінності між частковими функціями.

	(λ_i, ρ_i)	(λ_j, ρ_j)	(λ_l, ρ_l)
(λ_i, ρ_i)	0,0	0,1	0,3
(λ_j, ρ_j)	0,1	0,0	0,2
(λ_l, ρ_l)	0,3	0,0	0,0

Можна зробити висновок, що множинна міра Джокара дорівнювала б $\frac{1}{3}$, тому що тільки одна з трьох часткових функцій присутня в обох множинах. Наведений приклад вказує на необхідність більш глибокого вивчення оцінки застосування мір схожості для оцінки толерантності між двома об'єктами носія КАС.

Більш цікавий результат щодо КАС може бути сформульований наступним чином: здатність КАС до порівняння об'єктів носія визначається ФФП КАС, яке обмежено зверху ТФП КАС, тобто здатність когнітивної системи відрізняти об'єкти залежить від наявних знань про функції та відношення, які притаманні для обраних об'єктів.

Тепер буде розглянуто функцію 2.3.2, яка являє собою миттєву проекцію суб'єктивного досвіду (див. 9-й пункт). Як зазначено вище, ця функція ставить у відповідність множині часткових функцій та підмножині об'єктів носія якісну оцінку (див. 3-й пункт), де множина часткових функцій $\Lambda \times P$ визначає миттєвий контекст когнітивної діяльності, а підмножини об'єктів носія A - спостереження когнітивної системи. Фактично $B_i(\Lambda \times P \times A)$ визначає миттєвий або ситуативний контекст i , природньо, потребує наявності певної “мітки” для того, щоб в подальшому формально описати процеси, які відбуваються з когнітивною системою та її внутрішнім станом. Такою міткою є час.

Природа часу КАС є дуже складною і потребує повністю впорядкованої множини T , де $T \in R$ (див. 1-й пункт), та її співставлення з ФСД $\lambda_{\beta\alpha}$ (див. 9-й пункт). З огляду на те, що $T \in R$ і $R \in A$, відповідно $T \in A$. Це спостереження та властивості декартового добутку дозволяють подати ФСД у формі

$$\lambda_{\beta\alpha} : (M \times \Lambda \times P \times \frac{A}{T} \times T) \rightarrow \Omega. \quad (2.3.6)$$

Запропонована форма є нічим іншим, як формалізацією когнітивної системи в динаміці. Отже, відображення 2.3.6 є модель буття КАС, де час T – її фундаментальна властивість в формі зміни КАС з минулого через дійсне і до

майбутнього. Важливо зазначити, що роль та місце часу в моделі буття співставне з визначенням у філософії [269].

Модель буття КАС визначає

$$((M \times \Lambda \times P \times \frac{A}{T} \times T), \Omega) \Leftrightarrow T, \quad (2.3.7)$$

як асоційованого з часом T кортеж, утворений за допомогою $M \times \Lambda \times P \times (A \setminus T)$ і Ω , де час T є повністю впорядкованою множиною з функцією відстані (витікає з властивостей R). Наведена асоціація 2.3.7 дозволяє розглянути наступні гіпотези, де $\aleph(T)$ є потужністю множини T за умови $\mu_{i,j} \in \{0, 1\}$:

- сюр'єктивне відображення ФСД в час

$$\aleph(M \times \Lambda \times P \times \frac{A}{T} \times \Omega) < \aleph(T); \quad (2.3.8)$$

- сюр'єктивне відображення часу в ФСД

$$\aleph(M \times \Lambda \times P \times \frac{A}{T} \times \Omega) > \aleph(T); \quad (2.3.9)$$

- бієктивне відображення часу в ФСД

$$\aleph(M \times \Lambda \times P \times \frac{A}{T} \times \Omega) = \aleph(T). \quad (2.3.10)$$

З наведених гіпотез тільки дві, 2.3.8 і 2.3.10, мають сенс і дозволяють сформулювати наступну аксіому. Аксіома екзистенціальності КАС: в певний момент часу стан КАС або визначений, або невідомий: $\aleph(M \times \Lambda \times P \times \frac{A}{T} \times \Omega) \leq \aleph(T)$.

Запропонована аксіома не тільки визначає, що КАС може перебувати не більше, ніж в одному стані, але й дозволяє ввести нове поняття кванту часу.

Розглянемо функцію 2.3.2, в якій було поставлено у відповідність множині функцій, що з заданою ймовірністю реалізуються за наявності певних відносин, суб'єктивне ставлення. Вочевидь, якщо i є елементом множини I та $\aleph(I) \leq \aleph(T)$, а множина I є множиною ординалів, в яких стан КАС визначено, то I є множиною ординалів повністю впорядкованої множини часу і форма:

$$\lambda_{\beta\alpha}: (M_i \times \Lambda \times P \times (A \setminus T) \times T) \rightarrow \Omega \quad (2.3.11)$$

може бути зображена як $\lambda_{\beta\alpha}: (M_{t_i} \in T \times \Lambda \times P \times (A \setminus T)) \rightarrow \Omega$.

Під квантом часу будемо розуміти найменшу лінійну відстань між двома елементами t_i і t_j , множини $T \in R$ таку, що

$$M_{t_i} \in T \times \Lambda \times P \times (A \setminus T) = M_{t_j} \in T \times \Lambda \times P \times (A \setminus T) \quad \text{або}$$

$$\lambda_{\beta\alpha}(M_{t_i} \in T \times \Lambda \times P \times (A \setminus T)) = \lambda_{\beta\alpha}(M_{t_j} \in T \times \Lambda \times P \times (A \setminus T)).$$

Отже, квант часу – це мінімальний проміжок часу, за який КАС здатна “усвідомити” зміну стану, в якому вона перебуває, або свого ставлення до нього. Квант часу має суб’єктивну природу та дозволяє описати зміну сутності КАС.

Запропоноване формулювання кванту часу приводить до наступних висновків:

- еволюція кванту часу від “проміжку часу довжиною в день” до наносекунди є дефакто еволюцією знань людства про час і простір;
- якщо КАС притаманна рефлексія як процес самопізнання і самоусвідомлення, то рефлексія пов’язана з квантом часу цієї КАС, відповідно будь-яке просторово-часове відношення є обґрунтованим у контексті заданої КАС;
- суб’єктивна плинність (швидкість) часу залежить у певному періоді від суб’єктивного кванту часу КАС та частоти зміни стану КАС. Це означає, що суб’єктивна плинність часу пропорційна частоті змін стану КАС у певному періоді. Це спостереження пояснює, чому очікування результату без активних дій з боку КАС є “повільною суб’єктивною швидкістю часу” і зазвичай це описується, як стан, в якому час “біжить повільно”.

На основі висновків щодо кванту часу КАС можна ввести два нових поняття – дослідження та навчання. Під теоретичними дослідженнями КАС будемо розуміти процес розширення ТФП, що відбувається внаслідок збільшення потужності множин Λ та P , які утворюють сигнатуру КАС, і як наслідок пар з декартового (прямого) добутку $\Lambda \times P$.

Під практичними дослідженнями КАС будемо розуміти розширення множини носія A через спостереження бінарної операції $\lambda_{(A)}(\alpha_i, \alpha_j) \rightarrow \Psi$ над носієм системи $A = \langle \alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots \rangle$ (див. 4-й пункт). Отже, практичне навчання зводиться до пошуку нових властивостей об'єктів, які в результаті зумовлюють перегляд оцінки міри відмінності між двома довільними об'єктами носія. Зокрема, редукціонізм є одним з методів дослідження, згідно з яким високорівневі концепти можуть бути описані на основі закономірностей, властивих низькорівневим концептам, тобто зведені до низькорівневих концептів, де виділення низькорівневих концептів є розширенням потужності множини носія, а закономірності, властиві низькорівневим концептам, їх характеристиками, описаними вище. Виділення низькорівневих концептів призводить по перегляду характеристик високорівневих концептів.

Під теоретичним навчанням розуміємо процес $M_{t_i} \rightarrow M_{t_j}$ ($\mu_{i,j} \in \{0, 1\}$), в якому часткові функції функціонального простору КАС можуть бути застосовані до об'єктів носія. Формування ідей застосування відомих підходів до інших об'єктів носія є прикладом теоретичного навчання або механізмом напрацювання гіпотез.

Під практичним навчанням розуміємо формування або модифікацію асоційованої карти 2.3.2, де функція $\lambda_{\beta\alpha}$ є функцією помилки або функцією вартості. В такому формулюванні практичне навчання КАС є ніщо інше як машинне навчання з підкріпленням, враховуючи семантику. Фактично практичне навчання відповідає на висунуті гіпотези суб'єктивним досвідом, де гіпотези є композиціями пар функцій (λ_i, ρ_j) з можливістю їх реалізації за правилами добутку ймовірностей $\mu_{i,j} \in \Psi$. Сформульовані поняття дослідження та навчання мають одну ваду, а саме формулювання 2.3.11 дозволяє описати формування фактичного суб'єктивного досвіду окремої КАС, але не пропонує механізму переносу знань або досвіду між двома або більше КАС. Цей процес буде описано в наступних підрозділах.

Ширший контекст “когнітивного моделювання” широко застосовується в українському академічному середовищі [270–272]. Це явище спостерігається у міждисциплінарних галузях, таких як містобудування, освіта, економіка та соціологія. Цей факт свідчить про те, що формація КАС відбувається в багатогранному міждисциплінарному середовищі, спрямованому на формалізацію складних соціотехнічних систем. Такий контекст підтверджує доцільність застосування цієї моделі до такої комплексної сфери, як електроенергетика, що поєднує в собі технічні, економічні та соціальні виміри.

Таким чином, представлена формалізація КАС пропонує уніфікований апарат для моделювання інтелектуальних мереж, що дозволяє вийти за межі існуючих обмежень. Завдяки своїй структурі $\langle A, \Lambda, P \rangle$, КАС дозволяє представити сукупність гетерогенних суб’єктів та об’єктів ЕЕМ, від фізичних пристроїв до програмних агентів, як елементи єдиного носія A , їхні можливі дії як набір операцій Λ , а фізичні та логічні обмеження як систему відношень P . Це перетворює опис складної КФС на строгу алгебраїчну конструкцію, створюючи таким чином формальну базу для опису інтелектуальних мереж. Водночас, КАС не просто описує систему, але й надає вбудований апарат для семантичного узгодження. Семантика в рамках КАС визначається через зв’язок між операціями, умовами їх виконання та ймовірностями реалізації, що створює спільний концептуальний простір для всіх агентів. Визначені в системі метричні функції дозволяють кількісно оцінювати відмінність між різними станами та контекстами, а умови консистентності забезпечують логічну несуперечливість суб’єктивних оцінок. Отже, КАС виступає не лише як модель, але і як механізм, що перетворює абстрактну проблему семантичного узгодження на розв’язувану задачу в межах єдиної формальної бази, створюючи теоретичний фундамент для проектування та аналізу зв’язних та інтелектуальних ЕЕМ.

Однак, для того щоб ця абстрактна семантична когерентність могла бути реалізована на практиці, її необхідно доповнити надійним низькорівневим механізмом, що забезпечує синтаксичну консистентність даних між численними

вузлами системи. Саме таким інструментом виступають CRDT. Їхня необхідність посилюється тим, що, як зазначалося раніше, сучасні ЕЕМ є комбінованими КФС, де розбіжність у даних може призвести до непередбачуваних та потенційно небезпечних фізичних наслідків. CRDT надають математично доведені гарантії кінцевої узгодженості в асинхронних середовищах без потреби у дорогих, блокуючих протоколах консенсусу, що ідеально підкреслює суб'єктивність часу в рамках визначеної КАС. Отже, якщо КАС відповідає на питання “що означає узгоджений стан?”, то CRDT відповідають на питання “як гарантовано доставити та синхронізувати дані про цей стан?”. Аналізу цього низькорівневого, але критично важливого шару узгодження, який слугуватиме практичним фундаментом для реалізації семантичних моделей КАС, і буде присвячено наступний підрозділ.

2.4. CRDT: синтаксичне узгодження

Для того щоб описана абстрактна семантична когерентність могла бути реалізована на практиці, її необхідно доповнити надійним низькорівневим механізмом CRDT, що забезпечує синтаксичну консистентність даних між численними вузлами системи. CRDT надають математично доведені гарантії кінцевої узгодженості в асинхронних середовищах без потреби у дорогих, блокуючих протоколах консенсусу. Аналізу цього низькорівневого, але критично важливого шару узгодження, який слугуватиме практичним фундаментом для реалізації семантичних моделей КАС буде присвячено цей підрозділ. Сучасні ЕЕМ, як розподілені, децентралізовані та інтелектуальні КФС, функціонують в умовах, що відповідають парадигмі AP теореми CAP. У таких системах пріоритетом є безперервна доступність кожного вузла та стійкість до розділення мережі, навіть ціною тимчасової розбіжності даних. В підрозділі 2.1 було показано неприйнятність моделей сильної консистентності, що вимагають глобального консенсусу, оскільки вони жертвують доступністю під час мережових збоїв. CRDT, натомість, є нативним рішенням для AP-систем, пропонуючи модель сильної кінцевої узгодженості [273], яка є достатньою для

забезпечення стійкості та автономності вузлів EEM. Вибір CRDT є не просто технічним компромісом, а фундаментальним архітектурним рішенням, що узгоджується з філософією децентралізованої та стійкої енергетичної інфраструктури. На відміну від протоколів консенсусу, таких як Paxos або Raft, що розроблені для парадигми CP, нав'язуючи єдину, лінеаризовану історію подій шляхом блокування операцій під час виборів лідера або мережових розділень, CRDT приймають тимчасову розбіжність як природний стан розподіленої системи. Дозволяючи будь-якій репліці змінювати свій стан без координації з іншими [229, 274, 275], CRDT реалізують принципи локальної автономії та поступової деградації функціональності, що є критично важливими для інфраструктурних об'єктів. Таким чином, вибір CRDT є реалізацією моделі, де система продовжує функціонувати локально навіть за відсутності глобального зв'язку [276], а узгодженість відновлюється автоматично при відновленні комунікацій.

Формально [229, 274], CRDT визначається як абстрактний тип даних, призначений для реплікації на багатьох вузлах, що дозволяє будь-якій репліці оновлюватися незалежно і без координації з іншими [275, 277], при цьому гарантуючи, що всі репліки, які отримали однаковий набір оновлень, врешті-решт зійдуться до ідентичного стану. Ця властивість досягається завдяки тому, що операції над даними розроблені таким чином, щоб конфлікти між одночасними змінами були неможливими за визначенням. На відміну від блокуючих алгоритмів консенсусу, які є складними в реалізації та інтенсивними до мережових ресурсів, CRDT досягають узгодженості на рівні самих даних, вбудовуючи логіку вирішення конфліктів у свою структуру. Цей підхід, що іноді називають “оптимістичною реплікацією” [275], ідеально підходить для динамічних та потенційно ненадійних мережових умов [278], характерних для КФС, таких як EEM. Застосування CRDT вийшло далеко за межі початкової сфери спільного редагування документів і знаходить все більше застосування у критичних інфраструктурах, системах IoT [279], розподілених базах даних та навіть у технологіях блокчейн [280] для підвищення пропускну здатності. Таке

поширення технології підкреслює її зрілість та надійність для побудови високодоступних та стійких до відмов систем. Крім того, явне розділення відповідальності на синтаксичний шар CRDT та семантичний шар КАС значно підвищує стійкість, тестованість та еволюційну гнучкість системи. Така модульність дозволяє незалежно оновлювати та верифікувати логіку КАС та реалізацію CRDT, що є значною перевагою для довготривалих та складних систем, якими є об'єкти критичної інфраструктури.

Математичним фундаментом, що забезпечує гарантовану збіжність CRDT, є концепція SEC. SEC формально визначає властивість, згідно з якою будь-які дві репліки, що отримали однаковий набір оновлень, врешті-решт досягнуть ідентичного стану, незалежно від порядку, в якому ці оновлення були отримані. Саме ця властивість робить CRDT “безконфліктними” за своєю природою. Для CRDT на основі стану (CvRDTs), ця гарантія базується на математичній структурі, відомій як напівґратка об'єднань [281, 282]. Напівґратка об'єднань визначається як множина станів [283, 284] S , на якій задано відношення часткового порядку \leq та бінарна операція об'єднання (join або merge) \sqcup . Для будь-яких двох станів $x, y \in S$, операція $x \sqcup y$ повертає їхню найменшу верхню межу, тобто такий стан z , що $x \leq z, y \leq z$, і для будь-якого іншого стану z' , що задовольняє цим умовам, виконується $z \leq z'$. Щоб гарантувати збіжність, операція об'єднання \sqcup повинна задовольняти трьом фундаментальним алгебраїчним властивостям: асоціативності, комутативності та ідемпотентності (ACI) [229, 285]:

- Комутативність ($x \sqcup y = y \sqcup x$) гарантує, що порядок злиття станів не впливає на результат, що робить систему стійкою до неупорядкованої доставки повідомлень у мережі.
- Асоціативність ($(x \sqcup y) \sqcup z = x \sqcup (y \sqcup z)$) означає, що групування операцій злиття не має значення, що дозволяє гнучкі топології синхронізації (gossip protocols).

- Ідемпотентність ($x \sqcup x = x$) забезпечує стійкість до дублювання повідомлень, оскільки повторне злиття того самого стану не змінює результат.

ACI відповідає на три проблеми асинхронних розподілених мереж: неупорядкованість, довільне групування та дублювання повідомлень. Замість того, щоб покладатися на складні протоколи транспортного рівня для створення ілюзії надійного стану, CRDT інкорпорує стійкість до цих збоїв безпосередньо у свою модель даних, переносячи узгодженість з інфраструктури в саму структуру даних.

Ключовою умовою для змістовної збіжності є також монотонність оновлень. Кожне локальне оновлення стану S_{old} до S_{new} має просувати стан вгору по ґратці, тобто має виконуватися умова $S_{old} \leq update(S_{old}) \Rightarrow S_{old} \leq S_{new}$. Це гарантує, що інформація в системі лише накопичується, а стани реплік невпинно рухаються до спільної найменшої верхньої межі, ніколи не повертаючись назад. Ця вимога є формальною гарантією того, що злиття розбіжних станів призведе до синтезу інформації, а не її втрати однією зі сторін. На відміну від стратегій вирішення конфліктів, таких як “перемагає останній запис”, які відкидають застарілу інформацію, модель ґратки для таких типів як лічильники та множини забезпечує кумулятивне накопичення. Таким чином, коли репліки обмінюються своїми станами і застосовують операцію \sqcup , вони неминуче обчислять ту саму найменшу верхню межу всіх станів і гарантовано зійдуться до єдиного, синтаксично ідентичного стану. Ця математична строгість є основою надійності CRDT як низькорівневого механізму узгодження.

Існує декілька фундаментальних підходів до реалізації CRDT, кожен з яких пропонує компроміс між ефективністю, надійністю та складністю. Вибір між цими підходами є, по суті, рішенням про те, куди перенести складність системи: у пропускну здатність мережі; у проміжне програмне забезпечення чи у внутрішню логіку самої структури даних. Перший підхід, CRDT на основі

стану (CvRDTs) [274, 286], є концептуально найпростішим та найнадійнішим. У цій моделі кожна репліка застосовує зміни до свого локального стану, а для синхронізації періодично надсилає свій повний поточний стан іншим вузлам. Отриманий стан від іншої репліки вузол-одержувач об'єднує зі своїм за допомогою асоціативної, комутативної та ідемпотентної операції *join*. Головною перевагою цього підходу є його надзвичайна стійкість до втрат, дублювання або зміни порядку повідомлень, що не впливають на кінцеву узгодженість, оскільки наступна передача повного стану виправить будь-які попередні розбіжності. Однак, ця надійність досягається ціною потенційно високих мережових витрат, оскільки передача повного стану може бути надто затратною для великих об'єктів даних.

Другий підхід, CRDT на основі операцій (CmRDTs) [229, 284, 286], пропонує ефективну, з точки зору мережі, альтернативу. Замість станів, репліки обмінюються лише операціями оновлення (наприклад, *increment(5)* або *add('device_id')*), які, зазвичай, мають невеликий розмір. Це значно зменшує мережовий трафік. Однак, цей підхід переносить складність на комунікаційний шар, висуваючи до нього суворіші вимоги: потрібні гарантії надійної, без дублікатів та, що найважливіше, причинно-наслідково впорядкованої доставки повідомлень. Крім того, самі операції, що можуть виконуватися одночасно, мають бути спроектовані так, щоб бути комутативними, що може бути нетривіальним завданням для складних типів даних.

Третій, гібридний підхід, відомий як CRDT на основі дельти-стану (δ -CRDTs) [283], прагне поєднати переваги обох попередніх моделей. Запропонований в роботі Алмейди та ін. [283, 284, 286], δ -CRDT визначається напівґраткою об'єднань та набором δ -мутаторів. δ -мутатор $m_{\delta}(S)$ повертає дельту (фрагмент стану) стану S , що потім об'єднується як з локальним, так і з віддаленими станами. Критично важливий зв'язок зі стандартними CvRDT забезпечується правилом декомпозиції $m(S) = S \sqcup m_{\delta}(S)$. Це гарантує, що дельта представляє “нову інформацію”, згенеровану мутацією m . Це дозволяє

досягти низького мережевого трафіку, подібного до CmRDT, зберігаючи при цьому стійкість до втрати та дублювання повідомлень, характерну для CvRDT. Однак, δ -CRDT вводять власну складність: вони не вимагають строгих гарантій доставки, як CmRDT, але для збереження коректності дельти повинні застосовуватися з урахуванням причинності. Це означає, що стан репліки-одержувача вже повинен містити стан, на основі якого була створена дельта. Таким чином, δ -CRDT, хоч і є ефективними, вимагають відстеження та передачі причинних метаданих (наприклад, векторних годинників), що ускладнює їхню внутрішню логіку порівняно з CvRDT. Цей підхід, по суті, неявно вводить залежність від історії змін, розмиваючи чітку межу між підходами на основі стану та операцій. Він жертвує простотою моделі CvRDT, що не залежить від історії змін, заради ефективності, приймаючи одну з ключових залежностей (причинно-наслідковість змін) систем на основі операцій. Для ЕЕМ, де важливий баланс між низькою затримкою оновлень та надійністю мережі, δ -CRDT є найбільш перспективним варіантом, оскільки він приймає складність внутрішньої логіки вузла в обмін на ефективність та стійкість.

Існує широкий спектр CRDT, розроблених для різних типів даних та сценаріїв використання, які можна класифікувати на базові, композитні та експериментальні. До базових структур [287] належать прості лічильники, такі як G-Counter, що підтримує лише інкремент, та його розширення PN-Counter, який дозволяє виконувати операції інкременту та декременту за допомогою двох окремих G-Counter. У категорії множин базовою є G-Set, до якої елементи можна лише додавати, тоді як 2P-Set дозволяє додавання та видалення за допомогою окремої множини видалених елементів, щоправда, без можливості повторного додавання видаленого елемента [288]. Цю проблему вирішує OR-Set [286] – удосконалена множина, яка дозволяє повторно додавати елементи після їх видалення. Для зберігання одиничних значень використовуються регістри: LWW-Register [289], де конфлікти вирішуються за допомогою мітки часу, та

MV-Register [290], який у разі конфлікту зберігає всі версії значення, перекладаючи вирішення конфлікту на клієнтський застосунок.

На основі цих фундаментальних блоків будуються складніші та композитні структури. Найбільш комплексним класом є Sequence CRDTs, призначені для спільного редагування тексту та списків, де алгоритми як-от RGA та LSEQ [291] генерують унікальні позиції для кожного елемента. Map CRDT та JSON CRDT реалізують асоціативний масив, ключовою особливістю якого є можливість вкладати інші CRDT як значення, створюючи ієрархічні документи [292]. Для моделювання графів у розподіленому середовищі існують Graph CRDT [293], що зазвичай реалізуються через дві множини для вершин та ребер.

Окрім базових та гібридних структур активно розвиваються експериментальні та теоретичні напрямки. До таких структур належать вже згадані раніше δ -CRDT. Дослідження BFT CRDT [294] спрямовані на створення структур, стійких до зловмисної поведінки вузлів, а Secure CRDT [295] на інтеграцію шифрування. Transactional CRDT [296] є спробою поєднати гарантії CRDT з можливістю виконання атомарних транзакцій. На більш формальному рівні, CRDT на основі теорії категорій використовують математичний апарат для доведення властивостей та дослідження нових способів композиції, тоді як Pure Op-based CRDT [297] досліджують теоретичні моделі, засновані виключно на комутативних операціях без метаданих.

Для практичного застосування теорії CRDT в контексті ЕЕМ необхідно відобразити абстрактні типи даних на конкретні фізичні параметри системи. Кожен інтелектуальний вузол мережі як от комутатор, система моніторингу, джерело генерації, споживач чи накопичувач енергії може бути змодельований як композиція CRDT, що представляють його стан. Вибір конкретного типу CRDT для кожного параметра є не просто технічною деталлю, а вбудованою, децентралізованою політикою вирішення конфліктів, що заздалегідь визначає поведінку системи в умовах одночасних оновлень. Для параметрів, що відображають кумулятивні, подієві величини, таких як згенерована або спожита

енергія, ідеальним вибором є PN-Counter. Операції додавання та віднімання є комутативними, тому одночасні зміни від різних джерел гарантовано призведуть до коректного сумарного значення. Для параметрів, що є миттєвими, чутливими до часу вимірюваннями, де останнє значення є найважливішим, таких як поточне навантаження, напруга, частота, або статус пристрою, оптимальним є LWW-Register. При злитті двох станів, конфлікт вирішується детерміновано шляхом вибору значення з найновішою міткою часу. Нарешті, для представлення динамічної топології мережі, тобто множини активних з'єднань між вузлами, найбільш підходящим є OR-Set або більш складні Graph CRDT. OR-Set пріоритезує збереження зв'язності мережі, що дозволить уникнути роз'єднання через застарілу інформацію. На відміну від простішого 2P-Set, OR-Set дозволяє повторно додавати елементи після їх видалення, що дозволяє реалізовувати динамічні топології мереж. Гранулярність моделювання (кожен параметр представлений окремим CRDT) дозволяє мінімізувати комунікаційне навантаження на мережу та делегувати вирішення конфліктів, здійснюючи цільові, швидкі оновлення та керуючі дії, що є вирішальним для систем реального часу.

Синтезуючи ці принципи, можна запропонувати стійку комбіновану модель для системи оцінки та керування станами ЕЕМ. Різні типи CRDT можуть бути використані для узгодження на різних рівнях, що відкриває потенціал для реалізації комбінованих систем, що поєднують низькорівневе та високорівневе узгодження. Таке розділення, концептуально описане в підрозділі 2.1, дозволяє застосовувати простіші та швидші CmRDT для узгодження стану окремих вузлів електромережі. Водночас, високорівнева синхронізація станів груп вузлів може відбуватися на основі складніших CvRDT, що забезпечує гнучкість архітектури.

З точки зору теорії інформації, функціонування CRDT можна інтерпретувати як механізм неперервного зменшення інформаційної ентропії в розподіленій системі. У початковому стані, коли вузли мають розбіжні дані через мережеві затримки та одночасні оновлення, а система перебуває у стані

високої ентропії, існує невизначеність щодо її “справжнього” глобального стану. Наприклад, якщо два керуючі центри надсилають суперечливі команди на один комутатор (ON та OFF), система перебуває в стані максимальної невизначеності. CRDT зменшують цю ентропію, замінюючи невизначеність і хаос конфлікуючих даних на математичну детермінованість. Завдяки вбудованим правилам злиття, результат конфлікту стає передбачуваним та однаковим для всіх. Якщо статус комутатора реалізований за допомогою LWW-Register, то команда з більшою міткою часу (Set(OFF, ts:102)) детерміновано переможе команду з меншою (Set(ON, ts:101)). Ентропія зменшується до нуля, оскільки стан однозначно визначається як OFF. Невизначеність замінюється визначеністю. Комутативність операцій у CmRDT усуває невизначеність, що виникає через різний порядок доставки повідомлень, а ідемпотентна функція злиття у CvRDT усуває невизначеність, що виникає через розділення мережі. Процес синхронізації, під час якого вузли обмінюються станами або операціями, є процесом поширення інформації, що поступово зменшує сукупну ентропію всієї мережі, спрямовуючи її до нуля в міру того, як всі вузли сходяться до єдиного, узгодженого стану. Це дозволяє оцінювати моделі узгодженості за швидкістю та ефективністю зменшення ентропії в системі.

Однак, CRDT мають фундаментальне обмеження: вони забезпечують лише синтаксичну збіжність, але не дають жодних гарантій щодо семантичної коректності результуючого стану. Система може ідеально зійтися до стану, який є синтаксично ідентичним на всіх вузлах, але при цьому порушує високорівневі інваріанти фізичної системи. Виникає потреба у вищому семантичному шарі, роль якого виконує КАС.

Іншим критичним аспектом функціонування розподілених систем, особливо в контексті критичної інфраструктури, є кібербезпека. Стандартна модель CRDT базується на припущенні, що всі репліки діють чесно, але можуть зазнавати збоїв або бути тимчасово ізольованими. Ця модель не враховує проблему візантійських генералів [298], за якої зловмисний вузол може

навмисно надсилати некоректні оновлення з метою компрометації стану всієї системи. Ця загроза мотивує активні дослідження в галузі безпечних та візантійсько-стійких CRDT [294]. Такі підходи інкорпорують криптографічні методи, зокрема, цифрові підписи, хеш-ланцюги та структури даних на основі спрямованих ациклічних графів [293] для забезпечення цілісності та автентичності операцій. Це дозволяє коректним вузлам верифікувати отримані дані та відкидати зловмисні, гарантуючи збіжність до правильного стану навіть за наявності обмеженої кількості достовірної інформації. Більш детально питанням кібербезпеки та механізмам, що можуть забезпечити захист системи, буде приділено увагу в наступних розділах.

CRDT є підходящим низькорівневим механізмом для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості інформації про стан вузлів EEM. Їхня неблокуюча природа та відповідність парадигмі AP роблять їх ідеальним інструментом для розподілених, стійких до відмов систем, де доступність є пріоритетом. Математичні гарантії збіжності, що базуються на теорії напівґраток, та можливість моделювати фізичні параметри мережі за допомогою спеціалізованих CRDT-структур створюють надійний фундамент для побудови систем моніторингу та керування. CRDT вирішують проблему синтаксичної узгодженості даних, гарантуючи збіжність інформації між вузлами. Однак, вони не забезпечують її осмисленості та безпеки з точки зору домену застосунку, оскільки не можуть гарантувати семантичну коректність результуючого стану. Для подолання цього розриву необхідне поєднання КАС та CRDT. В наступному підрозділі буде розглянуто комбінований підхід, що об'єднує семантичний формалізм КАС та низькорівневу збіжність CRDT, щоб забезпечити як синтаксичну, так і семантичну узгодженість інформації про стани вузлів EEM.

2.5. Об'єднання КАС та CRDT в рамках ВТО

Для вирішення завдання синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів EEM в рамках ВТО пропонується гібридна модель,

що об'єднує два рівні узгодження, інтегруючи КАС, що надає формальний апарат для високорівневого семантичного міркування, та CRDT, що забезпечують надійний низькорівневий механізм синтаксичної збіжності даних. Таке поєднання дозволяє подолати “семантичний розрив”, властивий системам, що базуються виключно на CRDT, і забезпечити не лише ідентичність даних, а й їхню осмисленість та логічну несуперечливість у розподіленій та децентралізованій КФС.

Класичні підходи до реалізації CRDT ефективно вирішують проблему злиття даних на синтаксичному рівні, однак не враховують семантичної цілісності стану системи в динаміці, тобто коректності переходу від одного валідного стану до іншого. Для вирішення цієї проблеми пропонується модель, що доповнює синтаксичну збіжність CRDT семантичними гарантіями на рівні КАС. Ця модель описує вузол енергосистеми, де стан реплікується за допомогою CRDT, а семантична цілісність гарантується через інваріанти та детерміновану функцію корекції.

Нехай вузол N визначається як кортеж, що складається зі статичних властивостей P та динамічного стану S . $N = (P, S)$. Властивості P є незмінним набором параметрів, що визначають вузол:

$$P = (P_{type}, P_{max}, P_{min}, Q_{max}, Q_{min}, U_{nom}),$$

де $P_{type} \in \{Generator, Load, Storage, Substation\}$ - тип вузла, P_{max}, P_{min} - максимальна та мінімальна активна потужність, $P \in R$ (МВт), Q_{max}, Q_{min} - максимальна та мінімальна реактивна потужність $Q \in R$ (МВАр), U_{nom} - номінальна напруга, $P \in R^+$ (кВ). Стан S - це набір змінних, що реплікуються. Кожна змінна є CRDT-типом (LWW-регістр), що гарантує збіжність на рівні даних. $S = (S_{status}, S_P, S_Q, S_U, \dots)$, де $S_{status} \in \{Online, Offline, Maintenance\}$ - операційний статус, $S_P \in R$ - поточна активна потужність (МВт), $S_Q \in R$ - поточна реактивна потужність (МВАр), $S_U \in R^+$ - поточна амплітуда напруги (кВ).

Як було визначено у підрозділі 2.3, семантика визначається взаємозв'язком між операціями, умовами їх виконання та ймовірностями реалізації, дозволяючи моделювати зважений процес семантичного узгодження. Взаємозв'язок між операціями та умовами їх виконання визначається інваріантами I системи (P КАС) та стратегією корекції C (Λ КАС) неузгодженості стану.

Інваріанти системи. Інваріант – це предикат $I(S, P) \rightarrow \{true, false\}$, що має бути істинним для будь-якого коректного стану. Система є семантично узгодженою, якщо виконуються всі інваріанти I_k . $\forall k, I_k(S, P) = true$. На основі прикладу, інваріанти наступні:

1. Обмеження активної потужності $I_1(S, P) \equiv (S_p \geq P_{min})$ та $I_2(S, P) \equiv (S_p \leq P_{max})$
2. Умова для статусу Offline – потужність має дорівнювати нулю, якщо вузол вимкнено. $I_3(S) \equiv (S_{status} = Offline) \Rightarrow (S_p = 0 \wedge S_Q = 0)$
3. Умова для типу Load – навантаження може лише споживати енергію (або мати нульову потужність). $I_4(S, P) \equiv (P_{type} = Load) \Rightarrow (S_p \leq 0)$

Стратегія корекції. Стратегія корекції – це детерміністична функція $C(S, P) \rightarrow S'$, яка перетворює будь-який (потенційно конфліктний) стан S у новий стан S' , що задовольняє всім інваріантам $S' = C(S, P)$. Функція C визначається покроковою трансформацією стану $S = (S_{status}, S_p, S_Q, S_U, \dots)$.

Нехай $S^{(0)} = S$. Тоді корекція для стану:

1. Offline: $S_p^{(1)} = 0$ якщо $S_{status}^{(0)} = Offline$ або $S_p^{(0)}$ в іншому випадку;
 $S_Q^{(1)} = 0$ якщо $S_{status}^{(0)} = Offline$ або $S_Q^{(0)}$ в іншому випадку.
2. Clamping (обмеження потужності): $S_p^{(2)} = \max(P_{min}, \min(S_p^{(1)}, P_{max}))$
3. Load: $S_p^{(3)} = \min(S_p^{(2)}, 0)$ якщо $P_{type} = Load$ або $S_p^{(2)}$ в іншому випадку.

Кінцевий скоригований стан S' має компоненти, отримані після останнього кроку $S' = (S_{status}^{(0)}, S_P^{(3)}, S_Q^{(1)}, S_U^{(0)}, \dots)$.

Ця функція гарантує, що незалежно від початкового стану S , результуючий стан S' завжди буде семантично коректним $\forall k, I_k(S, P) = true$. Однак, забезпечення семантичної коректності статичного стану є лише частиною задачі. Не менш важливим є аналіз динаміки, тобто валідація самого переходу від одного коректного стану до іншого. Для формалізації поняття “семантичної близькості” та побудови строгої моделі валідації використовується КАС. Ключовою вимогою до КАС (див. підрозділ 2.3) є існування бінарної операції над носієм системи A , яка визначає міру відмінності двох об’єктів. Ця вимога означає, що простір всіх можливих станів вузла S_A (який є носієм A) був метричним простором (S, d) з функцією $d: S \times S \rightarrow R$, яка кількісно оцінює, наскільки “далекими” є два стани один від одного з точки зору семантики предметної області. Наприклад, для енергетичного вузла ця відстань може бути зваженою сумою різниць ключових параметрів, таких як активна потужність та напруга. Формально, функція d повинна задовольняти аксіомам сильної міри, описаними в підрозділі 2.3:

- Невід’ємність та тотожність $d(S_1, S_2) \geq 0$, причому $d(S_1, S_2) = 0 \Leftrightarrow S_1 = S_2$.
- Симетрія $d(S_1, S_2) = d(S_2, S_1)$.
- Нерівність трикутника $d(S_1, S_3) \leq d(S_1, S_2) + d(S_2, S_3)$.

Вибір метричного простору як основи для моделі не є випадковим. Саме аксіома нерівності трикутника надає фундаментальне математичне обґрунтування для аналізу переходів траєкторій, що будуть розглянуті далі в підрозділі. Вона формально гарантує, що “обхідний шлях” через проміжний стан S_2 завжди є щонайменше таким же “довгим”, як і прямий перехід від S_1 до S_3 . Це дозволяє строго порівнювати вартість прямого “стрибка” стану з

кумулятивною вартістю послідовності менших, більш правдоподібних кроків, що є основою для визначення таких понять, як збіжність та неперервність у просторі станів. Без цієї аксіоми концепція “найкоротшого шляху” в просторі станів втрачає свою строгість, а весь підхід до валідації траєкторій через їх декомпозицію свою математичну обґрунтованість.

Для енергетичного вузла ЕЕМ метрика d може бути визначена як зважена сума різниць ключових фізичних параметрів, що аналогічно до підходу зважених найменших квадратів, який використовується для оцінки стану в енергосистемах, де функція вартості $J(x)$ є зваженою нормою залишків і діє як метрика відстані. Для двох станів S_A та S_B відстань може бути визначена як:

$$d(S_A, S_B) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot |param_i(S_A) - param_i(S_B)| + \sum_{j=1}^m w_j \cdot \delta(status_j(S_A), status_j(S_B)), \quad (2.5.1)$$

де $param_i$ – це неперервні параметри (наприклад, активна потужність P , напруга V , частота f), $status_j$ – категоріальні параметри (наприклад, стан комутаційного апарату), w_i та w_j – вагові коефіцієнти, що визначаються ВТО залежно від критичності параметрів, а δ – дискретна метрика (наприклад, метрика Геммінга) для категоріальних змінних.

Відповідно перехід $S_0 \rightarrow S_n$ є не просто атомарною операцією, а процесом, що може включати послідовність проміжних підстанів $\{S_0, ..., S_n\} \in S$. Зазвичай він є результатом послідовності дрібніших змін, що формують траєкторію або шлях у просторі станів. Семантична узгодженість такого переходу залежить не лише від властивостей початкової та кінцевої точок, але й від правдоподібності кожного кроку на цьому шляху. Цю логічність можна формалізувати через поняття семантичної правдоподібності.

Траєкторія переходу π від S_0 до S_n є скінченна послідовність станів, тобто $\pi(S_0, S_n) = \{S_0, ..., S_n\}$. Кожна пара (S_{i-1}, S_i) являє собою елементарний крок переходу. Для оцінки всієї траєкторії спершу треба оцінити кожен її крок.

Показник семантичної правдоподібності елементарного кроку P_{step} для переходу $T_i: S_{i-1} \rightarrow S_i$ визначається через нормалізовану метричну відстань:

$$P_{step}(S_{i-1}, S_i) = 1 - D_{norm}(S_{i-1}, S_i) = 1 - \frac{d(S_{i-1}, S_i)}{D_{max}} \in [0, 1], \quad (2.5.2)$$

де d – метрика стану 2.5.1, а D_{max} – максимальна теоретично можлива відстань у заданому контексті. Тепер можна визначити правдоподібність усієї траєкторії. Перехід є настільки надійним, наскільки надійним є його найслабша ланка. Показник семантичної правдоподібності траєкторії P_{path} визначається як мінімальний показник правдоподібності серед усіх елементарних кроків, що складають цю траєкторію

$$P_{path}(\pi) = \min_{i=1, \dots, n} \{P_{step}(S_{i-1}, S_i)\} \quad (2.5.3)$$

Це визначення формалізує вимогу, що для семантичної коректності переходу кожен проміжний крок має бути логічним і послідовним. Тоді траєкторія π вважається семантично допустимою, якщо показник її правдоподібності перевищує заданий поріг $\theta \in [0, 1)$. Це еквівалентно тому, що кожен крок у траєкторії є допустимим: $Correct(\pi) \Leftrightarrow P_{path}(\pi) > \theta \Leftrightarrow \forall i \in \{1, \dots, n\}, P_{step}(S_{i-1}, S_i) > \theta$. θ обирається як значення, що відсікає малоймовірні, але не неможливі переходи (наприклад, $\theta=0.5$). Таким чином, загальний перехід від стану S_0 до S_n вважається семантично можливим, якщо існує хоча б одна семантично допустима траєкторія $\pi(S_0, S_n)$.

Для прикладу розглянемо перехід, де вузол-генератор зі стану $S_A = \{S_{status} : Offline, S_p = 0\}$ переходить у стан $S_B = \{S_{status} : Online, S_p = P_{max}\}$. Якщо розглядати прямий перехід (складається з одного кроку) на основі формалізму CRDT, то $\pi_{1(CRDT)} = (S_A, S_B)$ виглядає правдоподібно, адже синтаксично при злитті двох станів не виникає конфліктів, але якщо той самий перехід розглядати на основі формалізму КАС, то

$\pi_{1(KAC)} = (S_A, S_B)$ де $P_{step}(S_A, S_B)$ буде низьким, адже $d(S_A, S_B)$ дасть велике значення через одночасну зміну статусу та стрибок потужності до максимуму, оминаючи проміжні стани (наприклад, запуск, синхронізація, поступове навантаження). Це призведе до низького показника $P_{path}(\pi_{1(KAC)}) < \theta$, і система класифікує такий перехід як аномальний або такий, що вимагає додаткової верифікації. Відповідно, цей шлях є неправдоподібним.

По аналогії розглянемо послідовний перехід, де існує логічна траекторія $\pi_2 = (S_0, S_1, S_2, \dots, S_n)$, де $S_0 = S_A$, а $S_n = S_B$, тоді:

- $S_0 \rightarrow S_1 = \{S_{status}: Offline\} \rightarrow \{S_{status}: Starting\}$ – метрична відстань мала, $P_{path} > \theta$, що відображає логічний та послідовний перехід генератора під час запуску;
- $S_1 \rightarrow S_2 = \{S_{status}: Starting\} \rightarrow \{S_{status}: Online, S_p = 0\}$ відображає процес синхронізації з мережею, $P_{path} > \theta$;
- $S_2 \rightarrow S_3 = \{S_{status}: Online, S_p = 0\} \rightarrow \{S_{status}: Working, S_p = 0.1 \cdot P_{max}\}$ – перехід у режим роботи з поступальним навантаженням, $P_{path} > \theta$;
- $\dots, S_{n-1} \rightarrow S_n = \{S_{status}: Working, S_p = 0.9 \cdot P_{max}\} \rightarrow \{S_{status}: Working, S_p = P_{max}\}$ – вихід на повну потужність, $P_{path} > \theta$.

Оскільки кожен крок у траекторії π_2 є правдоподібним ($\forall i, P_{step}(S_{i-1}, S_i) > \theta$), то $P_{path}(\pi_2) > \theta$. Існування такої допустимої траекторії робить загальний перехід від S_A до S_B семантично можливим і в рамках цього переходу узгодженим, на відміну від прямого “стрибка”. У розподіленій системі вузол, що ініціює зміну, має передати оновлення таким чином, щоб інші вузли могли реконструювати або валідувати таку правдоподібну траекторію.

Для аналізу динаміки переходу простір допустимих станів та переходів між ними (траекторію $\pi = (S_A, S_B)$) можна представити у вигляді

спрямованого зваженого графу – спрямований послідовний граф станів $G_\pi = (V_\pi, E_\pi, \omega)$, що відповідає траєкторії $\pi = (S_A, S_B)$, де V_π - множина вершин є впорядкованою послідовністю станів, що складають траєкторію. Кожна вершина v_i відповідає стану S_i з траєкторії $\pi = (S_0, S_1, \dots, S_n)$. Ці стани розглядаються як точки в метричному просторі, визначеному контекстом системи вищого рівня (ВТО), в рамках якої відбувається перехід. $V_\pi = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}$. Множина ребер E_π представляє послідовні, елементарні кроки переходу. Ребро існує лише між двома сусідніми станами в траєкторії, відображаючи її спрямований та нерозривний характер. $E_\pi = \{(S_{i-1}, S_i) \mid i = 1, \dots, n\}$. Вагова функція ω присвоює кожному ребру (S_{i-1}, S_i) вагу, що дорівнює метричній відстані між цими двома станами. Вага ребра кількісно оцінює “вартість” або “величину” конкретного елементарного кроку $\omega(S_{i-1}, S_i) = d(S_{i-1}, S_i)$. Такий граф є, по суті, лінійною послідовністю, де кожна вершина (крім початкової та кінцевої) має рівно одне вхідне та одне вихідне ребро, візуалізує динаміку зміни стану як шлях у метричному просторі. Представлення траєкторії у вигляді такого графу створює природну основу для його розширення до стохастичної моделі, зокрема до Марківського ланцюга [299].

Якщо припустити, що перехід зі стану S_{i-1} до наступного стану S_i залежить лише від поточного стану S_{i-1} (що є властивістю багатьох систем реального часу), тоді можемо інтерпретувати цей процес стохастично:

1. Стани Марківського ланцюга будуть відповідати вершинам графу V_π .
2. Ймовірності переходу $p_{i-1,i}$ можуть бути визначені на основі ваг ребер (метричної відстані). $p(S_{i-1}, S_i) = f(d(S_{i-1}, S_i))$, де f - функція, що перетворює відстань на ймовірність, наприклад, через софтмакс-нормалізацію по всіх можливих переходах зі стану S_{i-1} .

3. Модель може бути далі розширена, якщо розглядати стан S_i в детермінованій траєкторії як абстрактний “макростан”. У реальності перехід до нього може означати перехід в один з декількох можливих “мікростанів”. Це перетворює лінійний граф на спрямований ациклічний граф (DAG) з ймовірнісними розгалуженнями. Наприклад, нехай існує високорівнева траєкторія $A \rightarrow B \rightarrow C$. В рамках Марковської моделі стан B може бути представлений як набір з трьох можливих підстанів $V_B = \{B_1, B_2, B_3\}$. Тоді перехід $A \rightarrow B$ насправді є переходом з A в один з підстанів B з певною ймовірністю: $p(B_1|A)$, $p(B_2|A)$, $p(B_3|A)$. При цьому сума ймовірностей має дорівнювати загальній ймовірності переходу $A \rightarrow B$, тобто $p(B_1|A) + p(B_2|A) + p(B_3|A) = p(B|A)$. Наступний крок з будь-якого з підстанів $\{B_1, B_2, B_3\}$ буде вести до наступного макростану. Такий підхід дозволяє моделювати невизначеність результатів переходу. Наприклад, стан “ремонт” (A) може з різними ймовірностями привести до станів “повністю справний” (B_1), “частково справний” (B_2) або “потребує повторного ремонту” (B_3).

Такий підхід дозволяє не лише детерміністично валідувати траєкторію на основі порогових значень відстані, але й аналізувати її з ймовірнісної точки зору: розраховувати ймовірність досягнення кінцевого стану S_B , знаходити найбільш імовірні шляхи еволюції системи та виявляти аномалії як послідовності переходів з надзвичайно низькою сукупною ймовірністю. При цьому функцію переходу можна розглядати як підфункцію Θ_i , що приймає на вхід один або кілька попередніх станів (аргументи) і генерує наступний стан (результат) $S_i = \Theta_i(S_{i-1})$. Таке представлення дозволяє моделювати стан системи модульно, що є ключовим для декомпозиції та паралельної обробки [300].

Зрозуміло, що формація метричного простору має сенс в рамках системи,

що включає підсистему-вузол, тобто в рамках ВТО, описаного в підрозділі 2.2. Узгоджений перехід між підстанами вузла, що можна представити у вигляді зваженого графа, де вершини є точками метричного простору, а ребра відстанями між відповідними точками, піддається строгій формальній верифікації. Інструменти, такі як TLA+ [301] або Coq [302], можуть бути застосовані для перевірки властивостей системи:

- За допомогою TLA+ можна визначати специфікацію та перевіряти часові властивості на графі G , такі як безпека, коли система ніколи не потрапить у заборонений стан, та збіжність, коли система зрештою досягне бажаного стану.
- За допомогою Coq можна формально довести коректність функції правдоподібності P та функції корекції C (див. підрозділ 2.3), гарантуючи, що вони завжди повертають результат, який відповідає заданим інваріантам.

Даний формалізм створює основу для систем, що здатні до навчання та адаптації. Це досягається за допомогою динаміки узгодженого переходу між станами системи на основі знань про підсистеми та їх співвідношення. Метрика d та поріг θ можуть бути не статичними, а адаптивними параметрами, змінюючись під впливом цілей системи вищого рівня (наприклад, спільного ВТО, яке об'єднує декілька вузлів). Метрика може бути скоригована для зменшення відстані між відповідними станами, якщо певні переходи підтверджуються як правдоподібні системою вищого рівня.

Коли один вузол передає іншому оновлення стану, він може передавати не лише кінцевий стан, але й шлях у графі G , який до нього призвів. Це дозволяє вузлу-отримувачу валідувати не тільки кінцевий стан, а й всю послідовність змін, забезпечуючи узгоджену семантичну синхронізацію. Такий підхід трансформує CRDT з механізму реплікації даних у протокол узгодженої передачі знань між адаптивними агентами. При цьому зміни у статичних властивостях вузла (наприклад, модернізація обладнання, що змінює P_{max})

можуть бути оброблені стандартними CRDT, що значно спрощує складність обчислення та дозволяє застосовувати комбінований підхід на основі КАС у випадках, коли це дійсно потрібно.

Варто зазначити, що семантична узгодженість стосується не лише станів, а й динаміки переходів між ними. Перехід $S_A \rightarrow S_B$ є узгодженим, якщо існує допустима траєкторія $\pi = (S_0, \dots, S_n)$. Крок $S_{i-1} \rightarrow S_i$ є допустимим, якщо його показник семантичної правдоподібності P_{step} перевищує поріг θ .

$$P_{step}(S_{i-1}, S_i) = 1 - \frac{d(S_{i-1}, S_i)}{D_{max}} > \theta$$
, де d – метрична функція відстані з КАС. Це

означає, що для заданої послідовності станів $Green \leftrightarrow Yellow \leftrightarrow Red$ перехід зі стану $Green$ у стан Red без проміжного стану буде вважатися аномальним, оскільки відстань $d(S_{Green}, S_{Red})$ буде занадто великою. Запропонований формалізм забезпечує строгі гарантії збіжності та піддається формальній верифікації, що дозволяє сформулювати ключові твердження щодо узгодженості:

Твердження 1 (Синтаксична збіжність): Для будь-якої множини реплік, що отримали однаковий набір оновлень, їхні CRDT-структури даних неминуче зійдуться до синтаксично-ідентичного (конвергентного) стану.

Обґрунтування: Це твердження впливає безпосередньо з математичних властивостей CRDT. Властивості комутативності, асоціативності та ідемпотентності, притаманні операціям злиття CvRDT, або гарантії причинно-наслідкової доставки та комутативності для CmRDT, математично гарантують, що кінцевий результат не залежить від порядку, дублювання чи затримок у доставці повідомлень. Це забезпечує надійний синтаксичний фундамент.

Твердження 2 (Семантична збіжність): За умови, що всі репліки мають ідентичну КАС (тобто однакові функції валідації та корекції), вони неминуче зійдуться до ідентичного, семантично коректного стану.

Обґрунтування: Згідно з Твердженням 1, після отримання однакового набору оновлень, всі репліки згенерують ідентичний проміжний синтаксичний стан S_{merged} . За визначенням, семантичний блок КАС є однаковим для всіх вузлів у межах одного ВТО. Функції валідації інваріантів та стратегії корекції є чистими детерміністичними функціями. Для однакових вхідних даних вони завжди повертають однаковий результат, відповідно, семантичність переходу між синтаксично узгодженими станами S_i зберігається, а, оскільки, всі вузли починають з однакового стану S_{merged} і застосовують до нього ідентичну, детерміновану функцію семантичної корекції, кінцевий стан S_{final} буде ідентичним на всіх вузлах і, за визначенням моделі КАС, гарантовано семантично коректним.

Твердження 3 (семантична інтероперабельність): Нехай існують дві когнітивні алгебраїчні системи $KAC_A = \langle A_A, \Lambda_A, P_A \rangle$ та $KAC_B = \langle A_B, \Lambda_B, P_B \rangle$, що моделюють дві різні, але взаємодіючі підсистеми. Інтероперабельний (семантично узгоджений) інформаційний обмін між станами $S_A \in A_A$ та $S_B \in A_B$ можливий, якщо виконуються наступні умови:

1. Існує семантичний міст, тобто третя інтерфейсна КАС $KAC_I = \langle A_I, \Lambda_I, P_I \rangle$, що формалізує спільний для обох систем концептуальний простір (наприклад, фундаментальні фізичні закони). Існують гомоморфізми (структурно-зберігаючі відображення) $h_A: KAC_I \rightarrow KAC_A$ та $h_B: KAC_I \rightarrow KAC_B$, які гарантують, що спільні поняття з KAC_I інтерпретуються узгоджено в обох системах.
2. Стани S_A та S_B є CRDT з визначеною операцією злиття (join або merge) \sqcup .
3. Статична семантична узгодженість – результати злиття станів не суперечать внутрішнім контекстам (інваріантам) цільових систем:

$$S_{AB} = S_A \sqcup S_B \quad \in \quad \text{валідним} \quad \text{у} \quad KAC_B$$

(тобто, $\forall I \in \text{Invariants}(\text{KAC}_B), I(S_{AB}) = \text{true}$) та $S_{BA} = S_B \sqcup S_A$ є валідним у KAC_A (тобто, $\forall I \in \text{Invariants}(\text{KAC}_A), I(S_{BA}) = \text{true}$), що відповідає внутрішнім та зовнішнім контекстам A і B в рамках відповідних ВТО: $\text{Ctx}_{\text{зовнішній}(A)}$, $\text{Ctx}_{\text{зовнішній}(B)}$, $\text{Ctx}_{\text{внутрішній}(A)}$, $\text{Ctx}_{\text{внутрішній}(B)}$.

4. Динамічна семантична узгодженість – існують семантично допустимі траєкторії переходів між станами $\pi(S_A, S_{AB})$ в межах KAC_B та $\pi(S_B, S_{BA})$ в межах KAC_A .

Якщо ці умови виконано, то передача інформації між підсистемами є семантично узгодженою, що реалізує механізм синтезу нового знання в результаті комунікації, де об'єднаний стан (S_{AB} або S_{BA}) представляє собою більш повний стан, ніж будь-який з початкових станів окремо.

Обґрунтування: Доведення ґрунтується на послідовному підтвердженні узгодженості на різних рівнях абстракції:

1. Умова 1 (існування інтерфейсної КАС та гомоморфізмів) є ключовою. Вона створює опорні точки та гарантує, що обидві системи мають спільну, несуперечливу основу для інтерпретації фундаментальних понять. Предикати, що належать KAC_I (наприклад, закони Кірхгофа), морфують в одну спільну систему правил, що діє на загальному рівні для обох підсистем. Без цієї умови будь-яка комунікація була б позбавлена сенсу, оскільки системи “говорили” б різними семантичними мовами.
2. Умова 2 (використання CRDT) забезпечує надійний низькорівневий механізм. Завдяки математичним властивостям CRDT, стан S_A та S_B гарантовано зіллються в синтаксично ідентичний стан S_{AB} на всіх репліках системи B , незалежно від порядку та затримок повідомлень. Це вирішує проблему синтаксичної узгодженості.

3. Умови 3 і 4 разом забезпечують семантичну узгодженість.

Всі чотири умови виконані, відповідно маємо гарантії узгодженості на всіх рівнях: концептуальному (спільна інтерфейсна КАС), синтаксичному (збіжність CRDT), статичному семантичному (валідність інваріантів) та динамічному семантичному (досяжність через допустиму траєкторію). Це доводить, що перехід є інтероперабельним, а злиття станів є не просто об'єднанням даних, а синтезом нового, більш повного та семантично коректного знання про загальну систему.

Твердження 4 (редукція): Якщо два або більше вузлів функціонують в рамках ідентичної когнітивної алгебраїчної системи ($КАС_A = КАС_B$), тобто мають однакові семантичні правила (інваріанти, функції корекції), то завдання досягнення семантичної узгодженості редукується до задачі забезпечення синтаксичної збіжності. Оскільки семантичні правила є ідентичними та детермінованими, синтаксична ідентичність даних, гарантована механізмами CRDT, автоматично забезпечує і семантичну коректність кінцевого стану.

Твердження 5 (ієрархічність): Нехай існує $ВТО_A$, що є частиною більш загального $ВТО_B$. Тоді для рівня $ВТО_B$ весь сукупний внутрішній стан системи $ВТО_A$ може бути представлений як єдиний абстрактний стан S_A в просторі станів S_B . Цей принцип ієрархічної абстракції дозволяє інкапсулювати внутрішню складність підсистем, представляючи їх на вищому рівні у вигляді узагальнених станів. Це є ключовим механізмом для побудови масштабованих та керованих архітектур, де кожен рівень ієрархії оперує лише тією інформацією, що є релевантною для його задач управління.

Виходячи з описаного раніше, зрозуміло, що для комунікації і, відповідно, процесу узгодження інформації (або знань) потрібне середовище, здатне інкорпорувати властивості суб'єктів комунікації та представляти її об'єкт. В підрозділі 2.2. було запропоновано визначення ВТО. Визначення відстані між

станами вузлів або правдоподібність переходу, можливе в контексті об'єднуючої системи, яка визначає загальні правила та цілі – ВТО.

Згідно з визначенням, ВТО є логічним, динамічним угрупованням фізичних вузлів, яке інкапсулює їхні складні взаємодії і представляє для зовнішньої системи спрощену, агреговану модель. Логічно, якщо $KAC_i \subset VTO_i$, то VTO_i інкорпорує властивості та функціонал KAC_i . Таким чином, для будь-якої взаємодії між двома об'єктами A та B (де A і B можуть бути як окремими вузлами, так і ВТО нижчого рівня), вони повинні належати до спільного батьківського ВТО вищого рівня, позначимо його як VTO_{AB} . В рамках VTO_{AB} визначаються:

1. Метричний простір $M_{VTO_{AB}}$ – набір параметрів та їх вагові коефіцієнти, що використовуються для розрахунку відстані.
2. Функцію відстані $d_{VTO_{AB}}$ – обчислення семантичної відстані між станами S_{VTO_A} та S_{VTO_B} .
3. Поріг правдоподібності $\theta_{VTO_{AB}}$ – критерій, за яким переходи вважаються допустимими чи аномальними.

Ці параметри не є універсальними; вони є прямим відображенням функціональних, економічних або інших цілей, на основі яких було сформовано VTO_{AB} . Наприклад, якщо VTO_{AB} створено для надання послуг регулювання частоти, метрика буде особливо чутливою до відхилень потужності, тоді як для економічного ВТО ключовими параметрами будуть цінові сигнали.

Властивість композиційності ВТО (див. підрозділ 2.2), яка дозволяє будувати ієрархічні системи, напряду породжує ієрархію метричних просторів. Правила змінюються залежно від рівня взаємодії:

1. Внутрішня взаємодія ($A \rightarrow A$) – взаємодії між вузлами одного ВТО, регулюються внутрішньою метрикою $M_{internal}(A)$. Ця метрика спрямована на досягнення локальних цілей самого ВТО A .
2. Зовнішня взаємодія ($A \rightarrow B$) – Взаємодія між двома різними ВТО A і B оцінюється за зовнішньою метрикою, що визначається їхнім спільним батьківським ВТО, $M_{external}(VTO_{AB})$. Ці правила враховують вже глобальніші цілі.

Комбінована модель КАС-CRDT в рамках ВТО дозволяє вирішити завдання синтаксично-семантичного узгодження, інкорпорує процеси навчання, адаптації, передачі інформації та синтезу нового знання.

Висновки до другого розділу

Отже, в даному розділі було розроблено та теоретично обґрунтовано гібридну модель КАС-CRDT для узгодження інформації в розподілених та децентралізованих ЕЕМ, що поєднує низькорівневі синтаксичні гарантії узгодження інформації на основі CRDT, формальну базу та більш абстрактне, високорівневе семантичне узгодження КАС, як на локальному, так і на глобальному рівнях завдяки структурній організації ВТО. В ході обґрунтування моделі КАС-CRDT було адаптовано безконфліктно репліковані типи даних для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості даних про стан вузлів та підсистем ЕЕМ.

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. Дано формальні визначення таким процесам КАС, як теоретичне та практичне дослідження, теоретичне та практичне навчання.

Це дозволяє стверджувати – 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.

Після доведення ключових властивостей цієї концептуальної моделі, наступним логічним кроком є перехід від формальної теорії до її практичної конкретизації. Відповідно, наступний розділ буде присвячено розробці практичної моделі узгодження інформації, що реалізує запропонований формалізм на основі представлення стану ЕЕМ, демонструючи застосовність теоретичного апарату для вирішення прикладних задач узгодження.

РОЗДІЛ 3. СИНТАКСИЧНО-СЕМАНТИЧНЕ УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАНИ ВУЗЛІВ ТА ПІДСИСТЕМ ЕЕМ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ КАС-CRDT

3.1. Представлення станів компонентів (вузлів і підсистем) в розподіленій та децентралізованій ЕЕМ

Виходячи з розробленої в попередньому розділі гібридного підходу узгодження, який поєднує низькорівневі синтаксичні гарантії на основі CRDT та високорівневе семантичне узгодження на основі КАС, наступним логічним кроком є розробка моделі стану компонентів мережі. На відміну від суто цифрових систем, ЕЕМ є гібридною КФС, стан якої описується як дискретними, так і безперервними змінними, що створює значно складніший простір станів. Враховуючи кіберфізичну природу ЕЕМ, стан інкорпорує представлення як фізичного, так і програмного рівнів, на яких реалізований вузол системи. Таким чином, постає завдання визначити таку структуру представлення стану, яка була б достатньо виразною для адекватного відображення кіберфізичної складності вузла ЕЕМ, і водночас математично структурованою для уможливлення формального аналізу, верифікації та ефективної реплікації в децентралізованому середовищі. Вузол – це будь-який активний елемент мережі, що може генерувати (сонячні панелі, вітрові турбіни), споживати (розумні будинки, зарядні станції), зберігати (акумуляторні батареї) або перенаправляти енергію (розумні комутатори, трансформатори). Стан кожного такого вузла постійно змінюється, тому він повинен бути синхронізований із сусідніми елементами для ухвалення спільних рішень, як-от балансування навантаження в мережі. Для формалізації поняття стану пропонується модель, в якій для множини всіх вузлів системи N , стан довільного вузла $N_{i,t} \in N$ в певний момент часу позначається як $S_{i,t}$.

Цей стан є композитною структурою, що складається з двох ключових компонентів: статичного та динамічного. Формально це можна виразити як

впорядковану пару (кортеж) $S_{i,t} \Leftrightarrow (S_{i,t,static}, S_{i,t,dynamic})$, де $S_{i,t,static}$ представляє статичну складову стану, а $S_{i,t,dynamic}$ динамічну.

Статична компонента $S_{i,t,static}$ містить набір атрибутів, які є або незмінними, або змінюються рідко та прогнозовано, наприклад, внаслідок планового оновлення конфігурації чи програмного забезпечення. До її складу можуть входити: унікальний ідентифікатор версії стану, версійний вектор або гібридний логічний годинник для встановлення часткового порядку між станами, що є критично важливим для механізмів узгодження на базі CRDT, а також метадані, такі як розмір або криптографічний геш даних для забезпечення цілісності. Динамічна компонента $S_{i,t,dynamic}$ є вектором фізичних та операційних параметрів, що змінюються в реальному часі і характеризують поточну поведінку вузла. Цей вектор може включати ключові характеристики, такі як згенерована/спожита активна та реактивна потужність, поточне навантаження, статус комутаційних апаратів, активні підключення до інших вузлів та поточний режим роботи (наприклад, зарядка, розрядка, очікування). Кожен елемент цього вектора є кортежем, що містить значення, одиницю вимірювання та мітку часу.

Важливо чітко розрізняти поняття стану вузла $S_{i,t}$ та його інваріантних фізичних властивостей P_i . Властивості P_i є, по суті, паспортними даними вузла N_i – фундаментальною, незмінною специфікацією, що визначається на фізичному рівні. Цей набір параметрів може включати тип пристрою (генератор, навантаження, накопичувач енергії), мінімальну та максимальну потужність, номінальну напругу, клас точності вимірювальних приладів тощо. Структура та семантика цих властивостей можуть бути строго визначені за допомогою міжнародних стандартів, зокрема моделі CIM [232]. Це забезпечує семантичну сумісність та інтероперабельність у гетерогенному середовищі ЕЕМ. Можна виділити наступні статичні та динамічні компоненти вузла, що можуть видозмінюватися в залежності від цілей та обмежень системи:

- ID (UUID) – $S_{i,t,static}$, унікальний ідентифікатор стану вузла, по суті, ідентифікатор вузла;
- V (Vector Clock) – $S_{i,t,static}$, вектор версії;
- H (Hash) – $S_{i,t,static}$, контрольна сума поточного стану вузла;
- P_g, P_c – $S_{i,t,dynamic}$, активна генерована та спожита потужність (МВт), регулюється ІЕС 61850-7-4 стандартом [303];
- Q_g, Q_c – $S_{i,t,dynamic}$, реактивна генерована та спожита потужність (МВт), регулюється ІЕС 61850-7-4 стандартом [303];
- $Status$ – $S_{i,t,dynamic}$, статус комунатора $\{OPEN, CLOSED\}$, регулюється ІЕС 61850-7-410 стандартом [304];
- M_{op} – $S_{i,t,dynamic}$, режим роботи $\{CHARGE, DISCHARGE\}$, регулюється ІЕС 61850-7-420 стандартом [305];
- Con – $S_{i,t,dynamic}$, активні підключення, $\{ID_1, \dots, ID_n\}$;
- $Type - P$, тип вузла, регулюється ІЕС 61970 стандартом [47];
- P_{max}, P_{min} – P , максимальна й мінімальна потужність (МВт), регулюється ІЕС 61970 стандартом [47];
- V_{nom} – P , номінальна напруга (кВ), регулюється ІЕС 61970 стандартом [47].

Кіберфізична природа ЕЕМ вимагає, щоб модель стану відображала дуалізм між фізичними процесами та їх цифровим представленням. Концептуальний поділ стану на синтаксичну та семантичну складові є не просто описовою класифікацією, а ключовим архітектурним принципом, що уможливорює функціонування запропонованої гібридної моделі узгодження. Цей поділ дозволяє розмежувати відповідальність: низькорівневі механізми (CRDT) оперують на синтаксичному рівні, забезпечуючи швидку, гарантовану та математично доведену збіжність реплік даних, тоді як КАС забезпечують семантичну цілісність, реалізуючи валідацію, інтерпретацію та логічне

узгодження на основі узгоджених даних. Монолітна структура стану змусила б використовувати єдиний, неефективний механізм узгодження як для простої реплікації даних, так і для складної перевірки правил. Розділення стану на синтаксичний шар $S_{i,t,syn}$ та семантичний $S_{i,t,sem}$ створює окремі субстрати для кожного механізму консенсусу. Це дозволяє системі досягати високопродуктивної синтаксичної узгодженості для “сирих” даних з низькою затримкою, в той час як більш обчислювально інтенсивна КАС оперує на семантичному рівні для забезпечення фізичної валідності, операційної безпеки та економічної оптимальності загального стану системи. Формально, модель стану уточнюється наступним чином:

$$S_{i,t} \Leftrightarrow (S_{i,t,static}, S_{i,t,dynamic}) \Leftrightarrow ((S_{i,t,static,syn}, S_{i,t,static,sem}), (S_{i,t,dynamic,syn}, S_{i,t,dynamic,sem})) \quad (3.1.1)$$

Синтаксичний шар $S_{i,t,syn}$ представляє собою сире, структурне подання даних. Це область типів даних, схем та форматів серіалізації. Його структура може бути формально змодельована за допомогою абстрактних синтаксичних дерев [306], які забезпечують канонічне представлення ієрархічної структури даних незалежно від конкретного формату серіалізації (JSON, XML, бінарний протокол). Саме на цьому рівні безпосередньо діють операції CRDT, такі як інкремент лічильника або додавання елемента до множини. Семантичний шар $S_{i,t,sem}$ визначається як множина логічних предикатів, обмежень та інваріантів, які кодують фізичний сенс та правила, пов’язані з даними. Цей шар може бути змодельований за допомогою логіки першого порядку або дескрипційних логік. Наприклад, семантичне правило може мати вигляд $\forall S_{i,t} : (S_{i,t,dynamic} \cdot P_c > S_{i,t} \cdot P_{max}) \Rightarrow (S_{i,t,dynamic} \cdot M_{op} = FAULT)$. Це є доменом функціонування КАС, яка аналізує наслідки синтаксичних змін стану для забезпечення цілісності та безпеки системи.

Для забезпечення формальної коректності операцій над станами в розподіленому середовищі, стан $S_{i,t}$ специфікується як абстрактний тип даних. Ця специфікація визначає набір типів (State, StaticState, DynamicState) та

сигнатури операцій над ними $update(S_{i,t}, S_{i,t,dynamic}^*)$, $add(S_{i,t}, S_{i,t,static}^*)$, $delete(S_{i,t}, S_{i,t,static}^*)$, ... і, що найважливіше, $join(S_{i,t}, S_{i,t+1})$. Операція $join$ ($merge$) є центральною для досягнення узгодженості. В умовах асинхронної взаємодії та можливих мережових затримок, оновлення станів можуть надходити до вузлів у довільному порядку. Як було показано в підрозділі 2.3, щоб гарантувати кінцеву узгодженість, процес злиття реплік стану має бути детермінованим і не залежати від порядку отримання оновлень. Моделюючи простір можливих станів як напівґратку та доводячи, що реалізація операції $join$ задовольняє властивостям асоціативності, комутативності та ідемпотентності, можна формально довести, що розподілена система завжди збігатиметься до єдиного, коректного стану, незалежно від затримок та порядку доставки повідомлень.

Взаємодія між динамічними та статичними компонентами стану, зокрема уточнення статичних властивостей на основі динамічної поведінки, формалізується за допомогою функції обмежень Φ . Ця функція відображає динамічний стан у множину допустимих уточнень інваріантних властивостей вузла: $\Phi: S_{i,t,dynamic} \rightarrow P_i'$, де $P_i' \subseteq P_i$. Наприклад, якщо динамічний стан акумуляторної батареї систематично фіксує перегрів ($S_{i,t,dynamic}.T > T_{critical}$), функція Φ може згенерувати уточнення її паспортних властивостей P_i , тимчасово обмежуючи максимальну потужність розрядки ($P_i'.P_{max} < P_i.P_{max}$) для забезпечення безпечної експлуатації. Це формалізує ідею, що динамічна поведінка може накладати обмеження на статичну специфікацію вузла, звужуючи, але не розширюючи її функціонал.

Сучасні ЕЕМ характеризуються високою гетерогенністю компонентів, від складних обчислювальних вузлів (диспетчерські центри, контролери мікромереж) до простих виконавчих пристроїв (реле, датчики). Моделювання кожного елемента як повноцінного вузла, що бере участь у протоколах узгодження та зберігає інформацію про попередні події або транзакції (stateful)

[307], є обчислювально невиправданим та надлишковим. Більш точною та ефективною є модель делегування стану. У цій моделі прості пристрої на периферії мережі (stateless або state-delegated) [308] не зберігають і не обробляють власний складний стан, а делегують цю функцію більш потужному, ієрархічно вищому вузлу. Цей підхід формалізує ієрархічну структуру управління, описане твердженням 5 з підрозділу 2.5, коли простіші периферійні пристрої управляються потужнішими вузлами, що концентрують обчислювальні ресурси, зменшують мережевий трафік та спрощують логіку кінцевих пристроїв, підвищуючи масштабованість та надійність системи. Формально, стан делегованого вузла N_j , керованого вузлом N_k , визначається як проекція стану керуючого вузла:

$$S_j = \pi_j(S_k),$$

де π_j – функція проекції, яка вилучає з повного стану S_k ту підмножину даних, що стосується виключно вузла N_j . Наприклад, для простого комутатора j , керованого контролером підстанції k , його стан $\pi_j(S_k)$ буде зводитись до значення одного параметра з динамічного вектора стану $S_{k,t,dynamic}$. Це елегантно відображає ідею, що з точки зору самого вузла j , його динамічний стан є фактично нульовим; він повністю міститься в стані S_k і управляється ним. Переходи між станами (наприклад, замикання вимикача, зміна уставки генератора) повинні регулюватися строгими, універсально виконуваними правилами.

Вищеописана модульна структура стану вузла ЕЕМ дозволяє застосувати більш просунуті формалізми. Наприклад смарт-контракти [309], реалізовані на базі технології розподіленого реєстру, дозволяє представити перехід стану у вигляді транзакції, яка приймається системою лише за умови задоволення логіки контракту. Денотаційна семантика може бути використана для підтвердження коректності переходу та утворення самого договору [310], надаючи точне математичне значення комп'ютерним програмам. Це дозволяє,

наприклад, довести, що жодна послідовність валідних транзакцій ніколи не призведе до стану, в якому порушується фізичне обмеження $P_c > P_{max}$. Такий підхід переводить забезпечення безпеки системи у площину формальної верифікації, проте не виражає семантичну природу віддаленості або подібності концептів, множина яких і представляє стан, що уможливлює якісну оцінку семантичної частки $S_{i,t,sem}$ загального стану $S_{i,t}$.

На практичному рівні, розроблена абстрактна модель стану може бути реалізована з використанням різних парадигм програмування. Об'єктно-орієнтований підхід [311] передбачає створення класу з методами для маніпуляції та злиття станів. Функціональний підхід [312] базується на використанні незмінних структур даних та чистих функцій переходу стану, що спрощує аналіз та тестування. Вибір формату серіалізації даних для комунікації між вузлами залежить від конкретних вимог. Формати на основі тексту, такі як JSON або XML, забезпечують високу інтероперабельність та легкість для налагодження і використовуються на вищих, некритичних до затримок рівнях взаємодії (наприклад, для звітності). Для оперативного контуру управління, де мінімізація затримок та накладних витрат є пріоритетом, перевага надається бінарним форматам, таким як Protocol Buffers [313], які забезпечують компактне представлення даних та високу швидкість кодування/декодування. Таким чином, запропонована комплексна модель стану вузла ЕЕМ створює міцний теоретичний фундамент, що поєднує формальну строгість з гнучкістю практичної реалізації, необхідною для побудови надійних, масштабованих та інтелектуальних розподілених енергетичних систем.

Таким чином стан компонента в інтелектуальній, децентралізованій ЕЕМ є не просто вектором вимірювань, а багаторівневою, композитною структурою, що охоплює рівні абстракції від семантичних до синтаксичних представлень, необхідних для інтероперабельної комунікації та прийняття обґрунтованих рішень. Ця структура інтегрує статичні, інваріантні властивості вузла, визначені через галузеві стандарти, з його динамічним, реплікованим станом, який, у

свою чергу, розділено на синтаксичний та семантичний шари. Створення такої структурованої та формально верифікованої основи є необхідною передумовою, що дозволяє перейти від опису даних до розробки моделей, які на них оперують. Відповідно, після визначення структури стану, наступний розділ буде присвячено детальному розгляду моделей узгодження на основі КАС-CRDT, що використовують представлену структуру для забезпечення як синтаксичної, так і семантичної узгодженості в децентралізованому середовищі.

3.2. Преставлення стану ЕЕМ на основі формалізму КАС та CRDT

Виходячи з розробленої в попередньому підрозділі комплексної моделі стану вузла ЕЕМ, яка інтегрує статичні, інваріантні властивості з його динамічним, реплікованим станом, розділеним на синтаксичний та семантичний шари, наступним логічним кроком є розробка формальної структури даних, що втілює цю модель та забезпечує узгодженість в децентралізованому середовищі. Для вирішення цієї проблеми пропонується нова гібридна структура даних, що отримала назву когнітивно-алгебраїчний безконфліктно реплікований тип даних (CAS-CRDT), яка формально поєднує синтаксичну збіжність з семантичною узгодженістю, створюючи основу для побудови інтелектуальних та надійних розподілених ЕЕМ.

На основі визначення вузла та його стану з підрозділу 2.5 та формального визначення стану ЕЕМ на основі рівності 3.1.1 можна формально визначити вузол ЕЕМ як N_i що належить N , де $N \subseteq \text{ВТО}_j$, визначається як кортеж

$$N_i = (S, P_p, M_{\text{ВТО}}), \quad \text{де}$$

$$S = ((S_{i,t,\text{static},\text{syn}}, S_{i,t,\text{static},\text{sem}}), (S_{i,t,\text{dynamic},\text{syn}}, S_{i,t,\text{dynamic},\text{sem}})),$$

$$M_{\text{ВТО}} = (Y, d, \theta, D_{\text{max}}), P_p - \text{це інваріантні фізичні властивості вузла (паспортні дані), враховуючи модель, представлену в попередньому підрозділі,}$$

$$P_p = (P_{\text{max}}, P_{\text{min}}, Q_{\text{max}}, Q_{\text{min}}, V_{\text{nom}}). Y - \text{специфічна для даного вузла КАС, що}$$

може визначатися на рівні ВТО_j . Враховуючи визначення з підрозділу 2.3, а саме

$Y = \langle A, \Lambda, P \rangle$, A , по суті, відображаються на S , що включає в себе всю множину допустимих значень стану вузла мережі; Λ , визначаючи набір кінцевоарних операцій, відображається на функції злиття $merge(S_{i,t}, S_{i,t+1})$, валідації та корекції $C(S_i, P_p) \rightarrow S'_i$, тоді як множина відносин КАС P відповідає скінченній множині предикатів I , де $I_i(S_i, P_p) \rightarrow \{true, false\}$. Стан вузла вважатиметься семантично узгодженим якщо $\forall k, I_k(S, P) = true$ (див. підрозділ 2.5); d – функція відстані між двома можливими станами вузла N_i ; θ – показник правдоподібності переходу між підстанами вузла N_i а D_{max} – максимально допустима відстань між двома порівнюваними станами. Важливо зауважити, що предикати I мають бути несуперечливими, але це є задачею валідації, що не є частиною даної роботи.

Зрозуміло, що динамічна складова може впливати на статичну й навпаки, особливо в контексті семантики, що було показано у підрозділі 3.1, але в рамках даної роботи будуть розглядатися лише статичні відношення між КАС, ВТО і, як наслідок, станами вузлів ЕЕМ, відповідно динамічну складову стану пропонується відкинути й надалі сконцентруватися на статично-семантичній складовій. Цього має бути достатньо щоби показати в рамках роботи ідею комбінованого узгодження на основі КАС та CRDT. Далі стан $S = (S_{i,t,static,syn}, S_{i,t,static,sem})$, де $S_{i,t,static,syn}$ представлено як $S_{payload}$ (статичне навантаження структури, що представляє стан, та $S_{i,t,static,sem}$ як $S_{semantics}$ (статичне семантичне визначення стану вузла), відповідно $S = (S_{payload}, S_{semantics})$.

$S_{payload}$ є структурою, що містить поточні значення параметрів вузла. Кожен параметр представлений у вигляді стандартного CRDT, що забезпечує синтаксичну збіжність на рівні окремих значень та відповідають фізичній природі параметрів, які моделюються. Статичність параметрів виражається детермінованістю визначення значення параметра, тобто якщо

$x = f(a, b) = a + b$, то після будь якої кількості узгоджень $S_{payload}$ структури визначення x залишиться незмінним. Це, фактично, говорить про те, що x як параметр описується за допомогою CRDT, тоді CRDT є функцією $f(a, b)$, де a і b є порівнюваними станами параметра вузла N_i . Таким чином $S_{payload}$ можна представити як множину пар типу ключ-значення, де ключем буде визначений параметр, а значенням відповідна функція зміни параметра. Таке представлення знаходить своє відображення у Λ КАС (див. підрозділ 2.3) та демонструє універсальність КАС у поєднанні з CRDT, адже дозволяє оперувати не тільки CRDT на основі повного стану, а й на основі операцій і, навіть, на основі дельти фактичних змін стану. На основі попереднього підрозділу можна виділити наступний набір параметрів для $S_{payload} = (Identity, P_g, P_c, Q_g, Q_c, Status, M_{op}, Con)$, де $Identity = (ID, V, H, Type)$. Бачимо як P_p окреслює рамки для деяких параметрів з $S_{payload}$.

$S_{semantics}$ інкапсулює формальні знання про систему і є прямим відображенням КАС на CRDT, інкапсулюючи множину логічних предикатів I та функцію корекції C . Враховуючи статичність обраного підходу, можна стверджувати, що I та C детерміновано визначені для будь якої кількості операцій узгодження стану вузла N_i .

Враховуючи 2 умову для КАС (див. підрозділ 2.3), виділена множина I відповідає за оцінку істинності при зіставленні поточних параметрів стану новим вірогіднісним параметрам порівнюваного вузла. Згідно 4-ї умови для КАС (див. підрозділ 2.3), на основі рівняння 2.5.1, можна визначити відстань між двома порівнюваними станами як:

$$d(S_A, S_B) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot |param_i(S_A) - param_i(S_B)| + \sum_{j=1}^m w_j \cdot \delta(status_j(S_A), status_j(S_B)), \quad (3.2.1)$$

де $\{S_A, S_B\} \subseteq S_i \in N_i$. Для δ доцільно використати метрику Геммінга, тоді $\delta(status_j(S_A), status_j(S_B)) = 1 - \delta_{status_j(S_A), status_j(S_B)}$, де $\delta_{status_j(S_A), status_j(S_B)}$ – дельта Кронекера для порівнюваного категоріального параметра станів S_A та S_B . На основі рівняння 2.5.2 можна стверджувати, що варто використовувати $P_{step}(S_{i-1}, S_i) \in [0, 1]$, що включає $d(S_A, S_B)$ через D_{max} . $P_{step}(S_{i-1}, S_i)$ в подальшому може бути використаний для обчислення $P_{path}(\pi)$.

Окремо треба звернути увагу на вагові коефіцієнти w_i та w_j , адже вони, теоретично можуть бути динамічно змінені під час процесу узгодження підстанів як результат злиття, що відкриває можливість вузлам пристосовуватися до змін внутрішнього та зовнішнього контексту. Внутрішній контекст інкорпорує властивості поточного вузла, тоді як зовнішній контекст виражається множиною взаємовідносин між вузлами мережі й супутніх значень, пов'язаних з цими відношеннями. Зрозуміло, що зовнішній контекст вузла, по суті, є підмножиною внутрішнього контексту ВТО. Інші параметри вузла, що могли би бути віднесені до динамічних, формують простір в рамках якого можлива поступальна зміна структури вузла, що підтримує потребу навчання та синтезу нового знання, реалізуючи адаптивність, проте, як було зазначено раніше, буде розглянуто статичні складові, а тому w_i та w_j слід інтерпретувати як формальне визначення важливості специфічних параметрів вузла в рамках деякого домену, де під доменом розуміється приналежність до специфічної категорії елементів ЕЕМ, як от комутатор, підстанція, генератор тощо. Тим не менш, теоретично, зміна динамічних коефіцієнтів дозволяє інтерпретувати вузол мережі як персептрон [314], що в свою чергу дає можливість представити ЕЕМ у вигляді штучної нейронної мережі, інтегруючи стохастичні моделі, підтримувані КАС та CRDT.

Підсумовуючи, представлення вузла ЕЕМ на основі комбінованої моделі КАС та CRDT з урахуванням статистики можна записати як $N_i = (S_i, P_p)$ і,

відповідно, можна формально виділити структуру семантичного KAC-CRDT на основі KAC як

$$S_i = (S_{semantics}, S_{payload}) = ((I, C, D_{max}, \theta, w_i, w_j), (Identity, P_g, P_c, Q_g, Q_c, Status, M_{op}, Con)).$$

Спираючись на модель стану, розроблену в попередньому підрозділі, та аналіз типів CRDT, наведеному в підрозділі 2.4, $S_{payload}$ структурується наступним чином: для кумулятивних, подієвих величин, таких як згенерована або спожита енергія, використовується PN-Counter, що гарантує коректне підсумовування одночасних інкрементів та декрементів; для миттєвих вимірювань, де найновіше значення є найважливішим (поточна активна та реактивна потужність $P_g | P_c, Q_g | Q_c, Status, M_{op}$), оптимальним є LWW-Register, який детерміновано вирішує конфлікти на основі мітки часу; для представлення динамічної топології мережі, зокрема множини активних з'єднань Con , застосовується OR-Set, який пріоритезує збереження зв'язності мережі. Така структура дозволяє кожному полю вектора оновлюватися і синхронізуватися незалежно, відповідно до його природи, забезпечуючи надійну роботу системи в розподіленому середовищі.

Таким чином, у цьому розділі було розроблено та формалізовано детальну, гібридну структуру стану вузла ЕЕМ на основі нової структури даних KAC-CRDT. Ця структура поєднує синтаксичне узгодження на основі стандартних CRDT та семантичне узгодження, визначене в рамках KAC. Однак, для того щоб ця модель стала функціональним інструментом узгодження, необхідно строго визначити операції, що діють на ній, та проаналізувати процес їхнього виконання, що гарантує бажані властивості системи. Саме тому наступний розділ буде присвячено аналізу та доведенню ключових властивостей KAC-CRDT, опису операцій над структурою та процесу синтаксично-семантичного узгодження.

3.3. Операційна модель та формальна верифікація властивостей KAC-CRDT

Цей підрозділ присвячено формальній верифікації ключових властивостей KAC-CRDT, опису операцій над цією структурою та доведенню того, як їхня взаємодія забезпечує цілісний процес синтаксично-семантичного узгодження.

Формальна верифікація властивостей KAC-CRDT. Далі доведемо, що запропонована структура KAC-CRDT $S_i = (S_{semantics}, S_{payload})$ формально задовольняє п'яти ключовим твердженням, виведеним у підрозділі 2.5.

Для будь-якої множини реплік, що отримали однаковий набір оновлень, їхні payload-структури даних $S_{payload}$ неминуче зійдуться до ідентичного стану. Компонент $S_{payload}$ за визначенням є композицією стандартних CRDT (LWW-Register, PN-Counter, OR-Set). Операція злиття для двох payload-структур $S_{payload}^A$ та $S_{payload}^B$ визначається як їхня найменша верхня межа у напівґратці $S_{payload}^{merged} = S_{payload}^A \sqcup S_{payload}^B$. Ця операція є композицією операцій \sqcup для кожного окремого поля. Оскільки для кожного стандартного CRDT операція \sqcup задовольняє властивостям комутативності, асоціативності та ідемпотентності, то і композитна операція для $S_{payload}$ також буде їм задовольняти. Це математично гарантує, що для будь-якого набору станів їх злиття в довільному порядку завжди призведе до єдиного, детермінованого результату. Таким чином, синтаксична збіжність є вбудованою властивістю структури KAC-CRDT. Це відповідає першому твердженню про синтаксичну узгодженість (див. підрозділ 2.5. 1 твердження).

Враховуючи статистику, $S_{semantics}$ узгодження, по суті, зводиться до синтаксичної збіжності, що, як було доведено, гарантується відповідною властивістю структури KAC-CRDT. Тут варто додати, що $C \in S_{semantics}$ для $N_i \in$

детерміністичною функцією в тому сенсі, що при $C: S_{payload} \times P_p \rightarrow S'_{payload}$, $S'_{payload}$ гарантовано відповідає I з $S_{semantics}$ та є несуперечливим по відношенню до реплікаційної інформації в N_j . Оскільки всі вузли починають з проміжного стану $S_{payload}^{merged}$ і застосовують до нього ідентичну функцію C , кінцевий стан $S_{payload}^{final} = C(S_{payload}^{merged}, P_p)$ буде гарантовано ідентичним на всіх вузлах, відповідно, всі репліки неминуче зійдуться до ідентичного, семантично коректного стану. Це відповідає твердженню про семантичну узгодженість (див. підрозділ 2.5. 2 твердження).

Інформаційний обмін між двома підсистемами, що моделюються різними КАС, є семантично узгодженим за виконання визначених умов. Розглянемо дві системи що використовують структури $CAS_CRDT_A = (S_{semantics}^A, S_{payload}^A)$ та $CAS_CRDT_B = (S_{semantics}^B, S_{payload}^B)$. Компонент $S_{payload}$ обох структур складається зі стандартних CRDT. Система B може виконати синтаксичне злиття $S_{payload}^B \sqcup S_{payload}^A$, яке гарантовано збігається. Це забезпечує синтаксичну узгодженість. Система B застосовує власний семантичний блок для валідації $S_{payload}^{final} = C_B(S_{payload}^{merged}, P_B)$. Функція C_B з $S_{semantics}^B$ забезпечує виконання локальних інваріантів I_B . Це відповідає статичній семантичній узгодженості. Перехід від $S_{payload}^B$ до $S_{payload}^{final}$ валідується за допомогою метрики d_B та порогу θ_B з $S_{semantics}^B$. Це відповідає динамічній семантичній узгодженості. Таким чином структура КАС-CRDT містить всі необхідні компоненти для забезпечення семантичної інтероперабельності (див. підрозділ 2.5. 3 твердження).

Якщо КАС ідентичні, то їхні семантичні блоки $S_{semantics}$ є ідентичними. Якщо синтаксична збіжність досягнута і всі вузли мають однаковий стан

$S_{payload}$, то застосування до нього ідентичної детермінованої функції корекції C призведе до ідентичного семантичного стану $S_{payload}^{sem}$. Відповідно завдання досягнення семантичної узгодженості редукується до задачі досягнення синтаксичної узгодженості, що відповідає твердження про редукцію (див. підрозділ 2.5. твердження 4).

Нарешті внутрішній стан системи $ВТО_A$, що є частиною $ВТО_B$, може бути представлений як єдиний абстрактний стан на рівні $ВТО_B$. Нехай $ВТО_A$ складається з вузлів $\{N_1, ..., N_k\}$, кожен з яких представлений структурою CAS_CRDT_i . Визначимо функцію абстракції f_{abs} , яка відображає множину $\{CAS_CRDT_1, ..., CAS_CRDT_k\}$ на єдину, агреговану структуру $CAS_CRDT_{abs}^A$. Для компонента $S_{payload}$ ця функція агрегує значення (наприклад, $S_{payload, abs} \cdot P_g = \sum_{i=1}^k S_{i, payload} \cdot P_g$). Для семантичного блоку $S_{semantics}$ функція f_{abs} виводить нові, агреговані інваріанти та властивості (наприклад $P_{abs}^A \cdot P_{max} = \sum_{i=1}^k P_i \cdot P_{max}$). Система вищого рівня $ВТО_B$ оперує лише з цим абстрактним станом. Таким чином, структура КАС-CRDT є композиційною та підтримує ієрархічну організацію, формалізуючи принцип делегування стану. Це відповідає 5-му твердженню з підрозділу 2.5. На практиці, для реалізації $S_{payload}$ необхідно відобразити абстрактні типи даних на конкретні фізичні параметри системи.

Операції над структурою КАС-CRDT. Динамічна поведінка структури КАС-CRDT визначається множиною операцій $\Lambda = \{\lambda_1, ..., \lambda_n\}$, що відображають формалізм КАС та можуть змінювати стан вузлів. Ці операції є функціями, що діють на носії A . Ключовими операціями є локальне оновлення $update_t(S_i)$ та злиття з віддаленою реплікою $merge_t(S_A, S_B)$, де $t \in T$ – час, S_A

та S_B стани, що відображають різницю між внутрішнім та зовнішнім, а також, між внутрішнім та оновленим внутрішнім станами. Обидві операції інкорпоруєть синтаксичний та семантичний етапи узгодження, що в свою чергу потребує:

1. Аналізу допустимої траєкторії переходу від $S_{i,t}$ до $S_{i,t+1}$ (або S_A та S_B) на основі рівняння 2.5.3 як $P_{path}(\pi) = \min_{i=1, \dots, n} \{P_{step}(S_A, S_B)\}$, де

$$P_{step}(S_A, S_B) = 1 - D_{norm}(S_A, S_B) = 1 - \frac{d(S_A, S_B)}{D_{max}} \in [0, 1]. \quad S_B \text{ можна}$$

представити у вигляді послідовності операцій-функцій $\{f_1, \dots, f_n\}$, що

трансформують початкове значення S_A , як $S_B = (f_n \circ \dots \circ f_1)(S_A)$, де \circ

позначає композицію функцій. В такому випадку траєкторія переходу

обраховуватиметься як $P_{path}(\pi) = \min_{i=1, \dots, n} \{P_{step}(S_{i-1}, f_i(S_{i-1}))\}$, де

$$S_0 = S_A, P_{step}(S_{i-1}, f_i(S_{i-1})) = 1 - \frac{d(S_{i-1}, f_i(S_{i-1}))}{D_{max}}. S_i \text{ виражається функцією}$$

переходу від S_{i-1} , тому в цьому випадку d позначатиме відстань між

функціями переходу результируючих підстанів. Така інтерпретація

відповідає визначенню КАС (див. підрозділ 2.3) та формалізує CRDT на

основі операцій. Аналогічно, якщо представити $S_B = f(S_A, \Delta(S_A))$, де

$\Delta(S_A)$ — оновлення стану S_A , тоді

$$P_{path}(\pi) = \min_{i=1, \dots, n} \{P_{step}(S_{i-1}, f_i(S_{i-1}, \Delta_i(S_{i-1})))\}, \quad \text{де}$$

$$P_{step}(S_{i-1}, f_i(S_{i-1}, \Delta_i(S_{i-1}))) = 1 - \frac{d(S_{i-1}, f_i(S_{i-1}, \Delta_i(S_{i-1})))}{D_{max}}, \quad \text{що представляє}$$

траєкторію переходу для CRDT на основі дельти стану та зводиться, по

суті, до CRDT на основі операцій;

2. Синтаксичного злиття для утворення нового стану. Новоутворений стан

S_{new} може характеризуватися як можливий, неможливий, аномальний,

типовий, враховуючи попередній етап та відповідні значення D_{max} та θ .

Це дозволяє охарактеризувати перехід між підстанами за критерієм

правдоподібності, що робить маніпуляції на станами семантично спостережуваними та узгодженими;

3. Семантичної валідації – новоутворений стан перевіряється на відповідність усім предикатам (інваріантам) I з боку $S_{semantics}$;
4. Корекції, якщо виявлено порушення хоча б одного інваріанту $\exists k: I_k(S_{payload}, P_p) = false$, то викликається $C(S_{i,t+1}, P_p)$. Варто зазначити, що на практиці корекція застосовуватиметься лише у тому випадку, якщо результуючий стан є семантично суперечливим відносно 3-го етапу семантичної валідації та 1-го етапу аналізу. Тобто якщо вузол N_B надсилає оновлення до вузла N_A такий, що новоутворений стан $S_{A,new}$ є семантично суперечливим відносно 3-го та аномальним відносно 1-го пунктів, то лиш тоді застосовується C , що, по суті, відкидає аномальні зміни стану та зберігає поточний семантично узгоджений стан вузла N_A . Такий підхід дозволяє побудувати стратегію захисту від зловмисних дій (свідомих або випадкових), спрямованих на компрометацію мережі та її кіберфізичної цілісності. Якщо розглядати N_B та N_A з точки зору ВТО, що їх включає, то N_B виступає у ролі зловмисника, що атакує N_A , тоді N_B – компроментований вузол (нода), а N_A – здорова. Це розділяє, локалізує та ізолює скомпроментовані частини мережі, дозволяючи здоровим та функціонуючим вузлам продовжувати ефективне функціонування. Множину здорових вузлів можна описати як $N_{live} = \{n \in N \mid n \neq N_B\}$.
5. Фіналізації, коли семантично узгоджений стан зберігається в $S_{payload}$. Саме цей стан буде поширюватися на інші вузли. На основі попереднього етапу можна зробити висновок, що поширюватися буде лише узгоджена та правдоподібна інформація, тоді як будь які неузгодженості, зокрема, словмисні дії, будуть відкидатися функціонуючими вузлами, локалізуючи скомпроментовані вузли.

1, 3 та 4-й етапи відповідають за семантичне узгодження, що відображають основний задум KAC-CRDT структури.

Операцію $update(S_i)$ доцільно розглядати як сукупність послідовних або паралельних оновлень параметрів вузла N_i . Відповідно

$$update_t(S_i) = \bigcup_{j=1}^n S_{i,t,static,sem} \cdot parameter_j \subseteq \Lambda. \text{ Ця операція обробляє оновлення}$$

від локального джерела (наприклад з датчиків). Операція $merge_t(S_A, S_B)$ реалізує гібридну модель синтаксично-семантичного узгодження. Як було показано раніше, обидві операції можуть бути інтерпретовані в контексті різних типів CRDT та забезпечують проактивне усунення протиріч.

Приклад синтаксично-семантичного узгодження на основі KAC-CRDT. Розглянемо вузол-генератор N_i стан якого реплікується між двома керуючими центрами (вузол А та В). Припустимо, вихідні дані вузла наступні:

Паспортні властивості (P_p):

$$Type = Generator$$

$$P_{max} = 100 \text{ MBT}$$

$$P_{min} = 0 \text{ MBT}$$

Семантичний блок ($S_{semantics}$):

$$\text{Інваріант } (I_k): I_2(S, P) \equiv (S.Status = Offline) \Rightarrow (S.P_g = 0)$$

$$\text{Функція корекції } (C): (S.Status = Offline) \rightarrow S.P_g = 0$$

Метрика

$$(d): d(S_A, S_B) = 1.0 \cdot |S_A.P_g - S_B.P_g| + 50 \cdot \delta(S_A.Status, S_B.Status)$$

$$D_{max} = 150, \theta = 0.5$$

Початковий стан $S_{t=0}$ – генератор працює на половині потужності:

$$S_{A,t=0,payload} = S_{B,t=0,payload} =$$

$$\{Status: \{val: Online, ts: T_0\}, P_g: \{val: 50, ts: T_0\}\}$$

Нехай відбувається тимчасове розділення мережі. Вузли A та B отримують різні, одночасні команди:

- Вузлу A (час T_1) надходить команда вимкнути генератор.

$$S_{A,t=1,payload} = \{Status: \{val: Offline, ts: T_1\}, P_g: \{val: 0, ts: T_1\}\}$$

- Вузлу B (час T_2) надходить команда вивести генератор на максимальну потужність.

$$S_{B,t=2,payload} = \{Status: \{val: Online, ts: T_0\}, P_g: \{val: 0, ts: T_2\}\}$$

Припустимо, що $T_0 < T_1 < T_2$. Після відновлення зв'язку вузол A отримує стан від вузла B і запускає повний протокол узгодження в рамках $merge(S_A, S_B)$. Вузол A аналізує, наскільки правдоподібним є перехід від його поточного стану $S_{A,t=1}$ до стану отриманого від вузла $S_{B,t=2}$. Згідно описаного вище алгоритму, знайдемо відстань

$$d(S_{A,t=1}, S_{B,t=2}) = 1.0 \cdot |0 - 100| + 50 \cdot \delta(Offline, Online) = 150. \quad \text{Далі}$$

розрахуємо правдоподібність такого переходу як

$$P_{step}(S_A, S_B) = 1 - \frac{d(S_A, S_B)}{D_{max}} = 1 - \frac{150}{150} = 0. \quad P_{step}: P_{step} = 0 < \theta: \theta = 0.5.$$

Перехід класифікується як аномальний. Система на семантичному рівні фіксує, що одночасна зміна статусу на протилежний та стрибок потужності від 0 до 100 МВт є фізично неправдоподібною траєкторією. Це є першим сигналом про потенційну проблему.

Незважаючи на аномалію, система виконує синтаксичне злиття для отримання математично узгодженого стану за правилами CRDT (LWW-регістр).

При злитті:

$$T_1 > T_0 \Rightarrow Status = Offline$$

$$T_2 > T_1 \Rightarrow P_g = 100 \text{ МВт}$$

В результаті синтаксичного злиття матимемо

$$S'_{payload} = S_{A,payload} \sqcup S_{B,payload} = \{Status: Offline, P_g = 100\}. \quad \text{Стан } S'_{payload} \text{ є}$$

синтаксично узгодженим, але, як і було передбачено на першому етапі, він є семантично суперечливим.

Новоутворений стан $S'_{payload}$ перевіряється на відповідність інваріантам з $S_{semantics}$. Перевіряючи інваріант $I_2: (S'_{payload}.Status = Offline) \Rightarrow (S'_{payload}.P_g = 0)$, при підстановці значень $(Offline = Offline) \Rightarrow (100 = 0)$ отримаємо $true \Rightarrow false$, що порушує інваріант. Стан формально визнаний семантично некоректним, оскільки він порушує фундаментальні операційні правила, закладені в КАС. Оскільки стан є і аномальним (етап 1), і семантично суперечливим (етап 3), система застосовує детерміновану функцію корекції C . Застосовуючи $S_{final,payload} = C(S'_{payload}, P_p)$, отримаємо наступний результат корекції $\{Status: Offline, P_g = 0\}$. Система не відкидає оновлення повністю, а детерміновано приводить його до найближчого логічно коректного стану, усуваючи протиріччя. В даному випадку B можна вважати скомпроментованим вузлом управління, що атакує функціонуючий вузол A .

Фінальний, повністю узгоджений стан зберігається та готується до подальшого поширення. Кінцевим станом буде $S_{final,payload} = \{Status = Offline, P_g = 0\}$.

Цей розширений приклад показує, як п'ятиетапний протокол забезпечує багаторівневий захист цілісності системи. Аналіз траєкторії (етап 1) дозволяє виявити аномалії ще до злиття, синтаксичне злиття (етап 2) гарантує математичну збіжність, а семантична валідація та корекція (етапи 3-4) забезпечують відповідність стану фізичним законам та операційним правилам.

Після опису та верифікації моделі КАС-CRDT, що становить теоретичне ядро роботи, необхідно розширити аналіз за межі її базового визначення для демонстрації гнучкості та застосовності. В наступному підрозділі буде описано загальні доповнення, що є розширенням для попередніх підрозділів, охоплюючи аспекти, що не були прямо згадані, але заслуговують на увагу. Буде

розглянуто, як P2P-орієнтований підхід адаптується до ієрархічних моделей ЕЕМ, а також проаналізовано практичні аспекти реалізації, такі як оптимізація комунікації за допомогою гібридних CRDT-стратегій та вирішення проблеми еволюції інтероперабельності.

3.4. КАС-CRDT: доповнення

Формалізація представлення інформації про стан вузла ЕЕМ, а також відношень та взаємодії між вузлами, що розглядалася у попередніх підрозділах, спиралася на архітектурну парадигму, де кожен вузол мережі описувався як рівноправний та незалежний. Такий підхід припускає, що один вузол може бути носієм множини самостійних КАС, оскільки він може належати до різних ВТО. Таким чином, робота від самого початку була зосереджена на Peer-to-peer (P2P) архітектурі [315], що органічно узгоджується з природою КАС-CRDT як синтаксично-семантичної безконфліктної реплікованої структури для розподілених та децентралізованих мереж. До таких систем належать, зокрема, інтелектуальні мережі, що активно інтегрують сотні менших та незалежних IoT-пристроїв [316, 317]. При цьому було не тільки збережено, а й формально розглянуто взаємодію між вузлами, що є носіями нееквівалентних КАС, яка була виражена у твердженні про інтероперабельність підсистем (див. підрозділ 2.5). Водночас, аналіз існуючих ЕЕМ виявляє їхній переважно централізовано-монолітний характер з ієрархічними центрами управління [318, 319]. Моделювання такої архітектури вимагає можливості організовувати вузли за ієрархічною ознакою. Ця можливість природно впливає з раніше доведених тверджень про редукцію та ієрархічність (див. підрозділ 2.5), а також забезпечується взаємозв'язком КАС з ВТО, дозволяючи виділяти рівні організації та створювати ієрархію управління з вузлів будь-якої конфігурації.

Перехід до ієрархічних або централізованих архітектур, реалізованих за допомогою КАС-CRDT, висуває вимогу до розмежування доменів узгодження, зокрема на синтаксичному рівні CRDT. Це необхідно для того, щоб реплікована інформація поширювалася лише серед релевантних вузлів, які здатні її

обробляти, що знижує загальну складність системи, підвищує її пропускну здатність та спостережуваність [320]. Таке розмежування доцільно проводити на основі груп вузлів зі схожими структурно-функціональними характеристиками, що в даній роботі формалізовано через ВТО, які виступають і логічною абстракцією, і практичним архітектурним патерном для організації реплікації. Групуючи вузли за функціональними ознаками, наприклад, вузли управління, виконання, моніторингу, ВТО дозволяють створювати ізольовані домени реплікації. У межах кожного такого домену вузли поширюють лише однотипні, релевантні для їхньої спільної задачі дані, що радикально зменшує мережеве навантаження, делегує зони відповідальності та підвищує масштабованість і керованість системи в цілому.

Концепція ВТО також дозволяє ефективно структурувати взаємозв'язки між геолокаційно віддаленими групами вузлів, такими як мегаґріди, що включають взаємодію менших, автономних мереж. Комунікація між такими мережами, що може здійснюватися за допомогою супутникового зв'язку, створює умови для застосування гібридних моделей узгодження. Поєднання високорівневої (супутниковий зв'язок) та низькорівневої (оптоволокну) комунікації робить доцільним комбінування CvRDT з CmRDT або δ -CRDT. Такий гібридний підхід можна розглядати як аналог комплементарного фільтра, що комбінує низькочастотний (змінений стан) та високочастотний (операції або дельти змін) сигнали для отримання оптимального результату [321]. Це дозволяє реалізувати основну послідовність оновлень за допомогою легших CmRDT/ δ -CRDT, оптимізуючи навантаження на мережу. При такому підході доцільна сегрегація вузлів на головні, що представляють ВТО та відповідають за зовнішню комунікацію, та підпорядковані, що є виконавцями. Тоді поширення повних оновлень стану спиратиметься на головні вузли, які слугуватимуть ретрансляторами, перетворюючи складніші операції узгодження на простіші та операційно швидші для внутрішньої мережі. Наприклад, якщо вузол $N_i \in \text{ВТО}_A$ є головним і підтримує комунікацію з ВТО_B через вузол

$N_j \in \text{ВТО}_B$, оновлення про стан ВТО_B може надсилатися з певною затримкою у вигляді CvRDT оновлення, тоді як внутрішня комунікація в ВТО_A реалізовуватиметься через CmRDT/ δ -CRDT операцій. При узгодженні стану s_i з s_j виникає новий стан S_{merged} , який поширюється серед вузлів ВТО_A у вигляді операцій. Хоча N_i має інкорпорувати функцію злиття як для станів, так і для операцій, враховуючи, що стан можна представити як послідовність операцій або дельт, функція узгодження може бути спрощена до злиття послідовних дельт. Це дозволить підтримувати високу операційну швидкість, зменшити навантаження на мережу та реалізувати узгодження самодостатніх частин розподіленої мережі. Крім того, стан ВТО можна представити як агрегований стан $S_{\text{ВТО}}$, що є сукупністю станів усіх його вузлів. Це дозволяє розглядати стан S_i як частину єдиного структурованого стану $S_{\text{ВТО}}$ та реалізовувати комбіновану модель узгодження, що є особливо корисним для мікрогрідів. На основі такого підходу можна реалізувати саморегульовану мережу, що адаптується до динаміки середовища, інкорпорує механізми навчання та уваги (процес оцінки правдоподібності траєкторії переходу), що узгоджується з потенціалом інтеграції стохастичних моделей та можливістю представлення ЕЕМ у вигляді нейронної мережі на основі формалізму КАС.

Хоча в роботі аналіз траєкторії переходу між підстанами було описано як послідовний однонаправлений граф, цей підхід не обмежує використання складніших, двонаправлених та неоднорідних графів. Представлення повного або контекстуально залежного простору станів вузла відкриває можливості для глибокого аналізу та оптимізації, інкорпорує комплексне контекстно-свідоме управління. Проте такий аналіз може стати обчислювальним вузьким місцем. Представлення траєкторії у вигляді графа дозволяє застосувати паралельні алгоритми для аналізу правдоподібних шляхів та динамічної оптимізації [300]. Водночас, для перевірки однорідності семантичного навантаження, особливо для систем з динамічними компонентами КАС-CRDT, пряме порівняння

семантичних блоків є неефективним. Використання криптографічних гешів дозволяє звести перевірку семантичної еквівалентності до значно простішої задачі синтаксичного порівняння хеш-значень на основі системи контролю версій [322]. Для великих наборів семантичних правил можна застосувати структуру дерева Меркла, де корінь дерева слугує компактним криптографічним підтвердженням цілісності всього набору правил. Вузли в межах одного ВТО можуть швидко перевірити, чи функціонують вони за однаковими правилами, просто порівнявши кореневі геші.

Однак динамічна природа КАС-CRDT, що дозволяє структурі видозмінюватися, породжує проблему еволюції схеми даних. Зміна структури КАС-CRDT на одних вузлах може призвести до несумісності з іншими, що працюють за старою версією, порушуючи інтероперабельність. Для вирішення цієї проблеми необхідно впроваджувати стратегії версіонування та зворотної сумісності [322]. Включення версійної інформації до статичної частини КАС-CRDT дозволяє функції злиття бути версійно-орієнтованою та застосовувати відповідні трансформації для коректної інтерпретації даних від вузлів зі старими версіями схеми.

Фундаментальною перевагою запропонованого підходу є його здатність до проактивної спостережуваності та оцінки стану системи. Аналіз траєкторії переходу між підстанами, що виконується як перший етап узгодження, дозволяє виявити аномалії ще до фактичного злиття даних. Коли вузол отримує оновлення, воно не застосовується беззастережно; натомість, оцінюється гіпотетичний шлях від поточного стану до запропонованого, та обчислюється його семантична правдоподібність у контекстуальних рамках КАС та ВТО. Це запобігає інтеграції семантично небезпечних або нелогічних змін у контексті предметної області ЕЕМ. Таким чином, система переходить від реактивного до предиктивного управління цілісністю [323], що значно підвищує її стійкість та передбачуваність.

Виявлення аномалій на семантичному рівні надає моделі КАС-CRDT гнучкість в контексті кібербезпеки, проте цей напрямок вимагає глибшого

формального обґрунтування. Формалізм КАС, визначений як алгебраїчна система, дозволяє моделювати складні процеси, що лежать в основі протоколів безпеки. Множина-носіїв A може включати ключі та повідомлення; набір операцій Λ криптографічні примітиви, такі як шифрування, дешифрування та хешування; а набір відношень R властивості безпеки, наприклад, автентифікацію або авторизацію. Для надання цим моделям строгої операційної та композиційної семантики можна застосувати ієрархічний підхід:

- Нижчий рівень для опису динаміки виконання протоколу, де використовуються процесні числення, зокрема, лямбда-числення для моделювання обчислень та спеціалізовані розширення, такі як пі-числення [324], що інтегрує криптографічні примітиви безпосередньо в семантику мови. Це дозволяє моделювати взаємодію агентів та дії злоумисника, а властивості безпеки, такі як конфіденційність, формалізувати через поняття спостережуваної еквівалентності процесів [325].
- Вищий рівень для забезпечення композиційної безпеки у гетерогенній системі, що складається з різних ВТО з власними КАС. Як було зазначено у роботі, ВТО, теоретично, можуть бути розширені до математичних топологій, а формалізація відношень, переходів та визначень структурних особливостей КАС можуть бути представлені на основі теорії категорій. Кожне ВТО з його КАС розглядається як категорія, а взаємодія між ними моделюється як функтор, що гарантує коректну трансляцію семантичних правил та властивостей між різними доменами безпеки. Таким чином, КАС виступає як міст між операційною семантикою процесного числення та композиційною семантикою теорії категорій, створюючи цілісний, багаторівневий фреймворк для формальної верифікації кібербезпеки.

В контексті кібербезпеки та розвитку соціально-економічних відносин в енергетичному секторі, зокрема, при організації торгівельних взаємодій, запропонована модель КАС-CRDT може бути інтегрована з технологією блокчейн або смарт-контрактами, коли $S_{semantics}$ кодується як незмінна,

самовиконувана логіка контракту. Така інтеграція зумовлює появу нових, прозорих та відкритих до проведення незалежного аудиту систем, що відповідатимуть кон'юктурі сучасного енергетичного ринку.

Запропонована архітектура на основі KAC-CRDT та доменів узгодження ВТО створює проактивно спостережувану систему, що підвищує її передбачуваність та стійкість. Однак для об'єктивного аналізу ефективності цих механізмів та динаміки збіжності даних недостатньо лише якісних тверджень. Маючи механізм для досягнення та підтримки узгодженості на рівні окремих вузлів та їх взаємодій, виникає логічне завдання: як кількісно оцінити загальний стан порядку та невизначеності в усій розподіленій системі в будь-який момент часу? Для цілісного аналізу та управління мережею недостатньо знати, що система здатна досягати узгодженості, необхідно мати інструменти для вимірювання її поточного рівня. Саме тому, наступний розділ буде присвячено розробці метрик для кількісної оцінки рівня узгодженості та інформаційної ентропії в системі, що дозволить перейти від процедурного забезпечення консистентності до її кількісного моніторингу та аналізу.

3.5. Метрики для кількісної оцінки рівня узгодженості та інформаційної ентропії в системі

В даному підрозділі вводяться метрики для кількісної оцінки узгодженості даних у розподіленій системі, спираючись на поняття інформаційної ентропії Шеннона. Буде показано, що процес досягнення узгодженості, зокрема з використанням механізмів, таких як комбінованої моделі KAC-CRDT, еквівалентний зменшенню загальної інформаційної ентропії системи.

Інформаційна ентропія Шеннона як міра невизначеності. Для кількісної оцінки невизначеності в інформаційних потоках ЕЕМ доцільно використати математичний апарат теорії інформації. Основоположник цієї теорії, Клод Шеннон, визначив інформаційну ентропію [130] як міру непередбачуваності або невизначеності стану системи. Для дискретної

випадкової величини X , що може приймати значення $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ з ймовірностями $p(x_i)$, ентропія $H(X)$ визначається формулою:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i),$$
 де $p(x_i)$ – ймовірність того, що система або її елемент перебуває в стані x_i . Одиницею вимірювання такої ентропії є біт.

Нехай система складається з N вузлів: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$. Кожен вузол S_i в момент часу t може перебувати в одному зі скінченної множини станів $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$. Стан вузла визначається значенням реплікованих даних, які він зберігає.

Якщо розглядати стан кожного вузла як випадкову величину, то ймовірність того, що вузол S_i перебуває в стані q_j , позначається як $p(S_i = q_j)$. Тоді інформаційна ентропія $H(S_i)$ для окремого вузла S_i обчислюється за

формулою Шеннона як
$$H(S_i) = - \sum_{j=1}^n p(S_i = q_j) \log_2 p(S_i = q_j),$$
 де n – кількість можливих станів, $p(S_i = q_j)$ – ймовірність перебування вузла S_i в стані q_j .

Загальна ентропія системи є сумою ентропій всіх її незалежних вузлів

$$H(S) = \sum_{i=1}^N H(S_i).$$
 Тепер доведемо, що процес синхронізації (узгодження) станів

вузлів призводить до зменшення загальної інформаційної ентропії системи.

Початковий стан (до узгодження). Припустимо, що на початковому етапі система не є узгодженою. Це означає, що різні вузли можуть містити різні версії даних. Наприклад, розглянемо систему, де k вузлів перебувають у стані q_1 , а $(N - k)$ вузлів у стані q_2 .

Ймовірність вибрати вузол у стані q_1 дорівнює $p_1 = \frac{k}{N}$, а у стані q_2 , відповідно, $p_2 = \frac{(N-k)}{N}$. Ентропія такої неузгодженої системи, що відображає невизначеність її загального стану, буде обчислюватися як

$$H_{\text{неузгоджена}} = - (p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2) = - (\frac{k}{N} \log_2 \frac{k}{N} + \frac{N-k}{N} \log_2 \frac{N-k}{N}). \quad \text{Ця}$$

величина є максимальною, коли $k = \frac{N}{2}$ (максимальна невизначеність) і мінімальною (нульовою), коли $k = 0$ або $k = N$ (повна узгодженість).

Передбачається, що КАС реалізує набір алгебраїчних операцій та когнітивних правил, які дозволяють системі аналізувати розбіжності у станах вузлів та детерміновано обирати єдиний правильний стан. Цей процес гарантує, що врешті-решт всі вузли, слідуючи правилам КАС, прийдуть до однакового узгодженого стану.

Кінцевий стан (після узгодження). Після завершення процесу узгодження на основі КАС-CRDT в рамках ВТО, всі N вузлів системи будуть перебувати в одному і тому ж стані, нехай це буде стан q_c .

Тепер ймовірність того, що будь-який вузол системи S_i знаходиться в стані q_c , дорівнює 1. Тобто $p(S_i = q_c) = 1$ та $p(S_i = q_j) = 0$ для всіх $j \neq c$, тоді ентропію кожного окремого вузла S_i можна розрахувати як

$$H(S_i) = - (1 \cdot \log_2 1 + \sum_{j \neq c} 0 \cdot \log_2 0) = 0 \quad (\text{враховуючи, що}$$

$\lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \log(p) = 0$). Загальна ентропія системи в узгодженому стані

$$H_{\text{узгоджена}} = \sum_{i=1}^N H(S_i) = \sum_{i=1}^N 0 = 0. \text{ Порівнюючи ентропію системи до і після}$$

узгодження, бачимо, що $H_{\text{узгоджена}} = 0 \leq H_{\text{неузгоджена}}$. Рівність досягається лише в тривіальному випадку, коли система вже була узгоджена. В будь-якому іншому випадку, коли існувала хоча б мінімальна розбіжність у станах вузлів ($k \neq 0$ і $k \neq N$), ентропія неузгодженої системи буде строго більшою за нуль.

Таким чином, процес досягнення узгодженості в розподіленій системі є процесом зменшення інформаційної ентропії, оскільки він усуває невизначеність щодо стану окремих вузлів і системи в цілому. Варто зауважити, суб'єктивний (локальний) рівень-бачення узгодженості вузлом мережі може

відрізнятися від об'єктивного (глобального) бачення мережею стану вузла. Відповідно, доцільно розглядати локальну ентропію H_{local} вузла та глобальну ентропію H_{global} мережі. Різниця полягатиме в оцінці стану мережі.

Можемо зробити висновок, що загальна узгодженість сукупності вузлів мережі може бути використана для оцінки роботи описаної КАС-CRDT, тоді представимо МУС (MUC) – метрику узгодженості системи. Практична метрика для кількісної оцінки узгодженості (МУС) дозволяє кількісно оцінити загальний стан узгодженості системи в будь-який момент часу, використовуючи спрощену модель станів вузлів.

Замість обчислення ймовірностей для кожного можливого значення даних, стан кожного вузла S_i класифіковано за трьома дискретними рівнями, що відображають ступінь його неузгодженості. Кожному рівню присвоєно числовий коефіцієнт неузгодженості $I(S_i)$, який слугує практичним аналогом ентропії стану:

- Зелений (Green): Вузол повністю узгоджений, протиріччя відсутні.
 $I(S_i) = 0$
- Жовтий (Yellow): Вузол має некритичні розбіжності або застарілі дані, але може продовжувати функціонувати. Це стан часткової неузгодженості.
 $I(S_i) = 0.5$
- Червоний (Red): Вузол має серйозні протиріччя в даних, які вимагають негайного вирішення. Цей стан відповідає найвищому рівню локальної неузгодженості та ентропії. $I(S_i) = 1$

Обчислення метрики МУС. Загальна метрика узгодженості системи $MUC(S)$ для системи S , що складається з N вузлів, обчислюється як середнє арифметичне коефіцієнтів неузгодженості всіх вузлів:

$$MUC(S) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(S_i), \text{ де } N - \text{загальна кількість вузлів у системі, } I(S_i) -$$

коефіцієнт неузгодженості i -го вузла (0, 0.5 або 1). Завдяки такому визначенню,

метрика $MUC(S)$ є нормалізованою і завжди знаходиться в діапазоні $[0, 1]$.
Відповідно:

- $MUC(S) = 0$ – система перебуває у стані ідеальної узгодженості. Всі вузли зелені. Це відповідає доведеному стану нульової інформаційної ентропії.
- $MUC(S) = 1$ – Система перебуває у стані повної неузгодженості. Всі вузли червоні. Це відповідає максимальній ентропії в рамках даної моделі.
- $0 < MUC(S) < 1$ – значення метрики вказує на часткову узгодженість. Чим ближче значення до 0, тим вищий загальний рівень узгодженості системи.

Для аналізу впливу затримок та локальної щільності мережі вводиться коефіцієнт $LNDC$. Під локальною щільністю мережі слід розуміти кількість проміжних вузлів-ретрансляторів $|path(N_i, N_j) - \{N_i, N_j\}|$, що прямо або опосередковано приймають участь у процесі комунікації та реплікації деяких вузлів N_i та N_j , де $\{N_i, N_j\} \subseteq N_R \subseteq N \in \text{ВТО}$, $path(N_i, N_j)$ представляє множину всіх вузлів на шляху від N_i до N_j . Цей коефіцієнт дозволяє моделювати мережі з вибірковою реплікуванням, описаним у попередніх підрозділах, передачу повідомлень в рамках розподіленої ВТО, як підвид мережевої взаємодії на рівні ВТО, та проміжну взаємодію з різномірними ВТО. $LNDC$ визначається випадково згенерованим множником для моделювання затримки передачі інформації між вузлами, що дозволить враховувати затримки в доставці повідомлень та неоднорідність мережі. Нехай $LNDC(x) \sim U[0, x]$, де $x \in Z$, $\sim U[0, x]$ означає, що значення $LNDC(x)$ є випадковою величиною, що розподілена рівномірно на інтервалі від 0 до x , x визначається на рівні ВТО.

В роботі [162] було розглянуто метрику $FSDT$ як час, необхідний для того, щоб зміна стану певного вузла поширилася на 100% інших вузлів. Очевидно що $FSDT$ корелює з MUC , проте, враховуючи специфіку КАС-CRDT, а саме можливість корекції стану, зокрема, відкидаючи запропоновані зміни як ті, що

класифікуються як аномальні, можна дійти висновку, що $FSDT$ виражає час поширення змін стану на інші вузли, враховуючи оцінку правдоподібності переходу та реалізацію функції корекції у випадках семантичної неузгодженості результуючого стану на проміжних вузлах. Теоретично, можуть існувати наступні зв'язки між MUC та $FSDT$:

1. $MUC(S) = 0 \wedge FSDT = T$ – зміни стану деякого вузла поширилися на всі інші вузли мережі й мережа при цьому перебуває у стані повної узгодженості.
2. $MUC(S) = 1 \wedge FSDT = T$ – зміни стану деякого вузла поширилися на всі інші вузли мережі, але мережа при цьому перебуває у стані повної неузгодженості.
3. $0 < MUC(S) < 1 \wedge FSDT = T$ – зміни стану деякого вузла поширилися на всі інші вузли мережі й мережа перебуває у стані часткової узгодженості.

Поєднання $FSDT \wedge MUC$ дозволяє проаналізувати зв'язок між процесом узгодження стану та поширенням змін стану вузла в мережі. $MUC(S) = 1 \wedge FSDT = T$ та $0 < MUC(S) < 1 \wedge FSDT = T$ сигналізують про наявність помилок, аномалій або зміни функціональної цілісності мережі, зокрема, в результаті зловмисних дій.

Отже, в підрозділі теоретично обґрунтовано, що процес узгодження даних є еквівалентним зменшенню інформаційної ентропії. Введено практичну для кількісної оцінки узгодженості загального стану мережі. Поєднання MUC з H_{local} , H_{global} та $LNDC$ враховує суб'єктивний та об'єктивний стани вузла на основі виявлення аномалій, вимірювання внутрішньої ентропії вузла та зовнішньої ентропії системи, що дозволяє всебічно проаналізувати динаміку узгодження та поведінку системи у відповідь на локальні та більш масштабні збурення гетерогенності EEM.

Висновки до третього розділу

В третьому розділі було сформовано цілісний теоретичний фундамент для подальшої реалізації системи узгодження інформації. 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.

Розроблено структурну реалізацію моделі КАС-CRDT, доведено її ключові властивості, визначено операційний протокол її функціонування та запропоновано інструментарій для кількісної оцінки її ефективності. Визначено 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.

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.

Таким чином, після теоретичного обґрунтування запропонованої моделі та її властивостей, наступний, четвертий, розділ дисертації присвячено її практичній реалізації та експериментальному дослідженню. У цьому розділі буде детально описано процес розробки програмного прототипу розподіленої системи, що втілює запропоновані моделі узгодження. Окрім того, буде проведено експеримент з моделювання процесу узгодження, спрямованого на валідацію виведених теоретичних положень та кількісну оцінку ефективності запропонованого гібридного підходу на практиці.

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ УЗГОДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ KAC-CRDT

4.1. Застосування моделі акторів та принципів функціонального програмування для побудови системи узгодження

Після розробки теоретичної гібридної моделі узгодження на основі KAC та CRDT постає завдання обрати парадигму реалізації, яка б не тільки дозволила ефективно втілити запропоновані концепції, але й зберегла б їхні формальні гарантії надійності та коректності. Підходи до паралелізму, що базуються на потоках зі спільною пам'яттю та механізмах блокування [326], є непридатними, оскільки вони породжують такі проблеми, як стан гонитви [327] та взаємні блокування, що суперечить принципам ізоляції та автономності, закладеними у KAC-CRDT. Теза даного підрозділу полягає в тому, що синергія моделі акторів та принципів функціонального програмування (ФП) створює обчислювальний фундамент, що повною мірою задовольняє цим вимогам.

Модель акторів, вперше запропонована Карлом Хевітом [328], найбільш природно відображає складну, розподілену та динамічну природу ЕЕМ, розглядаючи обчислення як систему взаємодіючих, автономних сутностей. Фундаментальні компоненти ЕЕМ: генератори, споживачі, комутатори, по суті, є автономними сутностями з інкапсульованим станом [329], що взаємодіють через обмін сигналами.

Підхід “все є актор” дозволяє уніфіковано моделювати гетерогенні компоненти ЕЕМ через єдиний інтерфейс комунікації – асинхронну передачу повідомлень, що радикально спрощує архітектуру та підвищує її модульність. Взаємодії в реальній енергомережі є іманентно паралельними та асинхронними, що моделюється механізмом “відправив і забув” в акторній моделі [330]. Критична важливість відмовостійкості реалізується через два ключові принципи: ізоляцію стану та супервізію [331, 332]. Стан кожного актора є повністю інкапсульованим, що локалізує помилки, а ієрархічна структура супервізії, де батьківські актори відповідають за дочірні, дозволяє винести

логіку обробки збоїв на вищий рівень. Ця програмована модель управління ризиками прямо відображає операційну логіку реальної ЕЕМ, дозволяючи реалізувати концепцію “самовідновлення” інтелектуальних мереж. Нарешті, принцип локаційної прозорості, за яким актор надсилає повідомлення на логічну адресу, не знаючи про фізичне розташування отримувача, є ключовим для масштабованості. Модель акторів застосовується для побудови розподілених, асинхронних та високонавантажених систем [333–335].

Якщо модель акторів визначає архітектуру системи на макрорівні, то принципи функціонального програмування визначають мікроархітектуру, визначаючи, як реалізувати поведінку всередині кожного актора. Застосування незмінності даних та чистих функцій дозволить уніфікувати та спростити створення детермінованого та верифікованого інструменту моделювання [336]. Незмінність, за якої стан об’єкта не може бути змінений після створення, у поєднанні з ізоляцією акторів створює безпечне середовище для паралельних обчислень, усуваючи такі помилки, як стан гонитви або блокування. Поведінку актора можна представити як чисту функцію переходу стану $f(currentState, message) \rightarrow (newState, effects)$, що повертає новий стан та список команд – побічні ефекти. Оскільки результат цієї функції залежить виключно від її вхідних даних і не спричиняє безпосередніх змін свого середовища виконання, то вона є повністю детермінованою. Це дозволяє актору бути передбачуваним, тоді як виконання побічних ефектів, таких як відправлення повідомлень іншим акторам, делегується середовищу виконання акторів. Такий підхід відокремлює логіку від недетермінованих аспектів паралелізму та комунікації.

Ці парадигми підходять для практичної реалізації P2P ЕЕМ на основі теоретичної моделі KAS-CRDT. Абстрактна математична структура KAS знаходить своє пряме втілення в акторі: його внутрішній стан є носієм A , набір операцій Λ відповідає за поведінку, а правила валідації еквівалентні набору відношень P . Це створює міст між формальною теорією та програмною

реалізацією, дозволяючи стверджувати, що система успадковує формально доведені властивості узгодженості моделі.

Асинхронна передача повідомлень є природним та ефективним механізмом для поширення оновлень CRDT, які розроблені саме для середовищ з не гарантованою доставкою повідомлень. Операційна модель KAS-CRDT, що визначає п'ятиетапний протокол узгодження, знаходить свою точну та безпечну реалізацію в поєднанні примітиву *become* з моделі акторів [337] та чистої функції переходу стану з ФП. Вся логіка протоколу інкапсулюється в єдину чисту функцію, а атомарна операція *become* безпечно застосовує обчислений стан в конкурентному середовищі.

Модель акторів надає правильну високорівневу абстракцію для моделювання розподілених, автономних та відмовостійких компонентів КФС [263, 338, 339]. Принципи функціонального програмування, в свою чергу, забезпечують коректність, відтворюваність та верифікованість логіки на мікрорівні. Разом вони створюють ідеальне середовище для втілення теоретичної моделі узгодження, розробленої в даній дисертації. Цей логічний ланцюжок міркувань природно приводить до вибору конкретного технологічного стеку для практичної реалізації, яка буде описана в наступних розділах.

4.2. Застосування Akka та Scala для побудови системи узгодження

Вибір технологічного стеку для програмної реалізації є прямим та логічно послідовним втіленням теоретичних засад, викладених у попередніх розділах. Обґрунтування використання мови програмування Scala та інструментарію Akka демонструє глибоку структурну відповідність між теоретичними конструктами дисертації та обчислювальними моделями, що лежать в основі обраних засобів [263, 312, 338]. Такий підхід мінімізує семантичний розрив між формальною моделлю та її програмною реалізацією, що є критично важливим для забезпечення коректності та надійності системи управління критичною інфраструктурою.

Мова програмування Scala була обрана як прагматичний інструментарій для застосування ФП, оскільки її гібридна природа гармонійно поєднує об'єктно-орієнтовану та функціональну парадигми [340–342], що найбільш точно відображає специфіку програмної реалізації KAS-CRDT.

Практичною реалізацією обраної архітектури на основі моделі акторів слугує інструментарій Akka [263, 338, 343] – фреймворк для побудови конкурентних, розподілених та відмовостійких систем. Akka є канонічною реалізацією моделі акторів, що інкорпорує природне моделювання асинхронних процесів, ізоляцію стану, високу масштабованість, відмовостійкість та самовідновлення. Ключовим елементом інструментарію Akka є система акторів (ActorSystem) [344] – фундаментальна структура, що слугує ієрархічним контейнером для групи акторів, керуючи їхніми ресурсами, життєвим циклом та комунікацією. Ця конструкція є прямим архітектурним відповідником та практичною реалізацією ВТО, введеного в попередніх розділах. Саме система акторів виступає тим логічно-функціональним угрупованням, яке інкапсулює локальну складність та реалізує автономний модуль системи, що повністю відповідає теоретичному визначенню ВТО.

Побудова децентралізованої системи вузлів забезпечується модулем Akka Cluster [345], який створює P2P мережу без єдиної точки відмови. У межах цієї відмовостійкої інфраструктури, проблему синтаксичної узгодженості даних в умовах мережових розділень вирішують CRDT, реалізовані в модулі Distributed Data [346]. Вони надають математично доведені гарантії сильної кінцевої узгодженості, що є необхідною умовою для систем класу AP, до яких належить EEM, як було обґрунтовано в попередніх розділах. В рамках розробленого фреймворку, про який йтиметься у наступному підрозділі, стан кожного вузла кластера (актора) представлений у вигляді CRDT. Коли актор змінює свій внутрішній стан, він не блокує систему, а лише оновлює свою локальну CRDT-репліку. Механізми Akka Cluster забезпечують поширення цих змін іншим вузлам системи.

Обраний технологічний стек найкраще підходить для реалізації комбінованої архітектури синтаксично-семантичної узгодженості, де взаємодія компонентів забезпечує цілісність системи. Фундаментом є функціональна парадигма в Scala, яка завдяки незмінним структурам даних гарантує базову консистентність стану. Механізм нагляду Akka ізолює збої, зберігаючи локальну семантичну цілісність, тоді як Akka Cluster підтримує функціонування системи в умовах відмови вузлів.

Ключовим елементом архітектури є підхід до збіжності даних після усунення мережових розривів. Він реалізований через комбінацію стандартних інструментів та інкапсульованого стану актора, що безпосередньо втілює інваріанти синтаксично-семантичної узгодженості KAC-CRDT. Такий підхід безпосередньо пов'язує технологічний вибір з головною метою дисертаційного дослідження про розробку методів та моделі для забезпечення синтаксично-семантичної узгодженості у критичній інфраструктурі та дозволяє сконцентруватися на дослідженні KAC-CRDT в найбільш підходящому середовищі, про що йтиметься у наступному підрозділі. В наступному підрозділі буде розглянуто аспекти застосування дельти стану KAC-CRDT для реалізації процесу узгодження та реплікації.

4.3. Застосування дельти стану KAC-CRDT для реплікації в системі узгодження

В рамках експериментального дослідження було обрано δ -CRDT як основу для поширення різниці змін стану між вузлами. Використання CvRDT на основі стану, що інкорпорує стан усіх параметрів вузла, робить його збитковим для моніторингу та аналізу даних в EEM у реальному часі. На основі міркувань з підрозділу 3.2. можна стверджувати, що реплікований стан (змінну частину) вузла EEM можна представити як Мар-типи, який може бути реплікований на всю множину вузлів N деякої ВТО, де ВТО, як зазначалося раніше, представляється у вигляді системи акторів. Згідно [284], модифікація Observed Remove Set може бути використана для цього. Оскільки контейнерний

тип Map базується на Set, реалізація Map матиме таку ж семантику, як і ORSet, за винятком проблеми одночасних оновлень значень, які повинні об'єднуватися особливим чином. Для вирішення цієї проблеми було обрано LWW-Register CRDT. Використання цього типу даних гарантує, що зберігається лише останнє записане значення, тоді як попереднє (якщо таке було) відкидається. Оскільки нас цікавить найактуальніший (поточний) стан конкретного вузла в загальній системі. Слід також зазначити, що як ORSet, так і LWW-Register є Delta State Replicated Data Types [283], що зменшує необхідність надсилати повний стан під час оновлень. Іншими словами, коли стан об'єкта змінюється, буде надсилатися лише сама зміна, а не весь об'єкт з новим станом.

Можна визначити зміну стану вузла N_i як:

$$S'_i = S_i \circ \Delta_i, \quad (4.3.1)$$

де S'_i – це новий стан вузла i , S_i – його попередній стан, а Δ_i – застосована зміна.

Операція \circ (об'єднання змін) еквівалентна $merge(S_i, S'_i)$, про яку йшлося в підрозділі 3.3. Загальний стан системи буде представлено як тип даних Map на основі ORSet. Цей тип даних має схожу семантику для обробки ключів. Однак, у разі одночасних оновлень значень будь-який потенційний конфлікт буде вирішуватись на користь останнього записаного значення.

На основі рівняння 4.3.1 можна визначити набір даних, який поширюється між вузлами як $\Delta_i = S'_i - S_i$. З точки зору семантики, кожна дельта це набір змін для певних параметрів стану вузла, які будуть поширюватися на інші вузли та об'єднуватися з їхнім внутрішнім станом. Дельти формуються на основі операцій, визначених структурою даних CRDT, що повинна задовольняти трьом властивостям: ідемпотентність, комутативність та асоціативність. Представлений набір даних є дискретним за своєю природою, що ефективно відображає реальні сценарії, оскільки розподілені стани часто оперують кількісними значеннями або категоріями, а не неперервними діапазонами. Дискретні стани спрощують моделювання, фіксуючи ключові

поведінки, переходи та взаємодії системи, як-от умови несправності, режими роботи або доступність ресурсів.

На основі матеріалу з підрозділу 3.2. загальне представлення реплікованого стану $S_{payload}$ з точки зору практичної реалізації матиме наступний вигляд:

$$Map[K, LWWRegister[V]] \rightarrow ORSet[(K \rightarrow LWWRegister)],$$

де Map визначає структуру даних ключ-значення з узагальненим типом K для ключа та визначеним станом вузла V для значення. Якщо S_i є початковим станом вузла N_i , то будь-яке збурення чи зміна стану вузла еквівалентна $update_t(\Delta_i)$. Поширення різниці станів рівнозначне поступальній синхронізації станів вузлів мережі. Досягнення балансу по всій ЕЕМ означає відсутність передачі дельти. Таке представлення підкреслює характер оновлень, зумовлений особливостями реалізації структур $ORset$ та $LLWRegister$, що є ключовим для розуміння експериментальних результатів. При цьому основні операції над станом вузла ЕЕМ, описані в підрозділі 3.3, відповідають властивостям ідемпотентності, комутативності та асоціативності.

4.4. Методика проведення експериментальних досліджень на основі моделі KAC-CRDT в розподіленій ЕЕМ

Згідно з попередніми підрозділами, для моделювання процесу синтаксично-семантичного узгодження було розроблено фреймворк “Vigilant Hawk” для кластерних систем з високим навантаженням, зокрема для розподілених та децентралізованих електроенергетичних мереж (ЕЕМ). Цей фреймворк дає змогу моделювати асинхронну природу розподілених електромереж, надаючи можливість генерації та гнучкого представлення вузлів за допомогою акторної моделі. Його реалізація базується на інструментарії Akka [330–332, 337, 343–346], який дозволяє створювати висококонкурентні, масштабовані та відмовостійкі системи, використовуючи принципи реактивного

програмування [347]. Це робить його чудовим інструментом для симуляції динамічних систем. Вихідні файли можна знайти за посиланням [348].

У рамках цього фреймворку, кластерні системи ЕЕМ моделюються за допомогою KAS-CRDT для представлення стану вузлів кластера. Кожен вузол кластера представлений як незалежний актор зі своїм внутрішнім станом [349], що інкапсулюється та модифікується лише в процесі комунікації. Це забезпечує ізолюваність стану кожного вузла, що зменшує складність роботи зі спільними змінними станами в системі. Вузли кластера взаємодіють асинхронно, що унеможлиблює блокування їхніх операцій. Це дозволяє вузлам залишатися доступними для взаємодії під час очікування зовнішніх ресурсів або виконання інших завдань, що підвищує масштабованість та зменшує затримку комунікації.

Кожен вузол, як актор, може обробляти запити паралельно, що дозволяє системі одночасно виконувати велику кількість операцій. Такий підхід забезпечує переваги в контексті конкурентності, масштабованості та відмовостійкості. Коли вузол змінює свій стан, зміни стають доступними для всіх інших вузлів у системі. Оскільки кожен вузол бачить загальний стан системи, вузол із надлишковою потужністю може тимчасово перерозподілити її для нагальних потреб інших вузлів, яким бракує енергії. Цей перерозподіл враховує пріоритет, надаючи перевагу найближчим вузлам на основі їхнього географічного розташування.

Кластерна симуляція складається з вузлів електроустановок. Кожен вузол має свій унікальний ідентифікатор (ID), ідентифікатор ВТО (RI), власні номінальну та фактичну потужність, два набори з ідентифікаторами інших вузлів, а також значення запозиченої та поверненої електроенергії. В рамках симуляції, функції оновлення та злиття станів будуть представлені як уніфіковані (спільні для всіх) компоненти вузлів мережі. Кожен вузол ЕЕМ матиме деяке узагальнююче значення стану P_i , що відображатиме взаємозв'язок між номінальною $P_{nominal}$ та актуальною P_{actual} напругами (еквівалентами P_g та P_c з підрозділу 3.1). Ця змінна відображає множину інваріантів KAS-CRDT,

яким має задовольняти внутрішній стан вузла щоби бути семантично узгодженим. Позначимо $P_i \equiv I = \{I_{green}, I_{yellow}, I_{red}\}$, де

$$I_{green} \equiv (S_{payload,t} \cdot P_{i,t} = green) \Rightarrow (S_{payload,t} \cdot P_{actual,t} < S_{payload,t} \cdot S_{nominal,t})$$

$$I_{yellow} \equiv (S_{payload,t} \cdot P_{i,t} = yellow) \Rightarrow (S_{payload,t} \cdot P_{actual,t} = S_{payload,t} \cdot S_{nominal,t})$$

$$I_{red} \equiv (S_{payload,t} \cdot P_{i,t} = red) \Rightarrow (S_{payload,t} \cdot P_{actual,t} > S_{payload,t} \cdot S_{nominal,t})$$

Видно, що інваріанти можуть не тільки семантично окреслювати структуру, функціонал та взаємозв'язки вузла, але й слугувати, по суті, підходом визначення фактичної логіки функціонування.

Враховуючи визначення стану вуза з підрозділів 3.1 та 3.2, кожен вузол має власне уявлення про загальний стан мережі $S_{i,t}$ як $S_{i,t} \rightarrow IDURIUP_{i,t} \cup S_{general,t} - S_{i,t-1}$, де $S_{i,t}$ є станом вузла в деякий момент часу t , $S_{general,t} - S_{i,t-1}$ є загальним станом системи відносно попереднього стану i -го вузла в момент $t - 1$, включно зі станами інших вузлів. Кожен вузол відповідає за публікацію змін свого стану та зчитування оновлень від інших вузлів. ЕЕМ кластер протягом всього експерименту складатиметься зі 100 однорангових вузлів. На початку експеримента всі вузли перебуватимуть в *green* стані, що відображає стан рівноваги. Через зовнішній вплив фактична потужність обраного вузла системи збільшується, що переводить його у стан *red*. Такий перехід відзначається як аномальний (згідно оцінці траєкторії переходу), адже відстань $d(green, red)$ (якщо розглядати стани як елементи метричного простору) більша за одиницю. Це легко довести якщо присвоїти порядковий номер (0,1,2) кожному стану у послідовності $Q = \{green, yellow, red\}$ та використати функцію відстані

$$d(Q_i, Q_j) = w_Q \cdot |Q_i - Q_j| \quad (4.4.1)$$

на основі першої частини рівняння 3.2.1, де $w_Q = 1$. В результаті буде ініційовано виконання функції корекції C вузла, що є, по суті, процесом нормалізації стану. На основі формалізму КАС та визначення КАС-CRDT

(підрозділи 2.3. та 2.5) цей процес можна представити як композицію часткових функцій, де кожна функція може бути реалізована за певних умов ρ_j з певною ймовірністю $\mu_{i,j}$. C можна описати як:

1. Ініціалізація (виявлення протиріччя) – процес корекції активується, коли для вузла N_i виконується умова $\rho_{red} = I_{red} = true$.

2. Пошук (формування гіпотези) – вузол виконує пошук сусіднього вузла-донора N_j для якого виконується композиція умов

$$\rho_{condition}(N_i, N_j) = \rho_{neighbor}(N_i, N_j) \wedge \rho_{green}(N_j) = \rho_{neighbor}(N_i, N_j) \wedge I_{green}(N_j),$$

$\rho_{neighbor}(N_i, N_j)$ є істинним, якщо вузол N_i міститься в наборі з'єднань вузла N_j і,

для симетричності, вузол N_j міститься в наборі з'єднань N_i , тобто

$$\rho_{neighbor}(N_i, N_j) \Leftrightarrow (N_j \in Con_i) \wedge (N_i \in Con_j).$$

Цей етап є аналогом напрацювання гіпотез у КАС, де система шукає умови для застосування певної функції.

3. Застосування операції балансування (реалізація функції) – якщо вузол-донор N_j знайдено, то відбувається реалізації функції балансування. Це можна

представити у вигляді трійки

$$(\lambda_{balance}(N_i \cdot S_{payload}, N_j \cdot S_{payload}), \rho_{condition}(N_i, N_j), \mu),$$

де ймовірність реалізації $\mu = 1$ (для детермінованої системи). Відповідно, оновлення вузлів можна

$$\text{представити як } (N_i \cdot S_{payload}', N_j \cdot S_{payload}') = \lambda_{balance}(N_i \cdot S_{payload}, N_j \cdot S_{payload}).$$

Після виконання операції стани вузлів змінюються таким чином, що

$$\rho_{red}(N_i) \rightarrow \rho_{yellow}(N_i') \text{ та } \rho_{green}(N_j) \rightarrow \rho_{yellow}(N_j').$$

4. Процес вважається завершеним для вузла N_i коли його стан змінюється на

yellow. Якщо вузол-донор не знайдено, система може перейти до комбінаторних методів пошуку рішення, коли аналітичний пошук неможливий.

Таким чином, функцію корекції можна представити як когнітивний процес у рамках КАС, що моделює логічно-зважене мислення для відновлення балансу системи. Такий підхід ідеально підходить для інтелектуальних мереж.

Моніторинг стану ЕЕМ здійснюється під час балансування з точки зору випадкового вузла. Вузли, які були в *red* стані, переходять у *yellow*, запозичуючи потужність у сусідів; вузли в *green* стані також переходять у *yellow* після надання потужності в борг. Вузол, що отримує оновлення стану ΔS , змінює свою роль і сам стає спостерігачем. Це формує уявлення про систему в цілому, що дозволяє продемонструвати процес узгодження, враховуючи нерівномірність розподілу інформації в мережі.

Обладнання для симуляції включало ноутбук VivoBook ASUS Laptop X580GD_N580GD зі 16236 МБ оперативної пам'яті та 100 ГБ SSD-диском. Було змодельовано рівень загальної та локальної ентропії, виділено аномальні зміни стану спостережуваних вузлів зі збільшенням *LNDC* з відображенням на *FSDT*.

Для оцінки загального рівня узгодженості системи та часу за який стан поширюється на множину вузлів N мережі, на основі підрозділу 3.5. буде застосовано *MUC* та *FSDT* відповідно. Для обчислення загальної метрики узгодження системи виділені інваріанти вузлів можна співставити з числовим коефіцієнтом неузгодженості, виділеним в підрозділі 3.5. Відповідно, матимемо наступні коефіцієнти неузгодженості для стану вузла:

$$I_{green}(S_i) = 0,$$

$$I_{yellow}(S_i) = 0.5,$$

$$I_{red}(S_i) = 1.$$

Дослідження процесу поширення узгодження стану вузлів у мережі буде виконано з позиції незбурених вузлів, що передбачає використання повнозв'язної топології. Детермінована ініціалізація, асинхронний моніторинг та інкапсуляція станів гарантують відтворюваність та надійність результатів експерименту за будь якої кон'юнктури збурень мережі. Це можливо завдяки властивостям KAC-CRDT та акторній моделі, про яку йшлося раніше. Експериментальні дослідження включатимуть серію симуляцій, розроблених для оцінки рівня узгодженості системи за різних операційних умов. Буде змодельовано чотири ключові сценарії, що відрізняються за двома параметрами:

масштабом збурення в системі та локальною щільністю мережі. Масштаб збурення буде представлений двома рівнями: переходом 25% та 25% вузлів зі стану спокою в критичний стан. Перехід вузла в критичний стан здійснюється примусовим збільшенням активної потужності на 100 МВт, тоді як початкове значення активної та номінальної потужності задані як $P_{actual} = 100$ МВт та $P_{nominal} = 200$ МВт. Умови мережевої комунікації також будуть моделюватися на двох рівнях за допомогою *LNDC*: сценарій з низькою щільністю ($LNDC = 400$) та сценарій з високою щільністю ($LNDC = 700$). В наступному підрозділі будуть розглянуті та проаналізовані результати моделювання описаної моделі розподіленої децентралізованої ЕЕМ в рамках розробленого інструменту.

4.5. Аналіз результатів експериментального дослідження

Результати моделювання представлено на рисунках 4.5.1, 4.5.2 та 4.5.3. Код для обробки та візуалізації даних представлено в додатку Б. Нульовий час визначено як момент початкового стану балансу, коли всі ноди перебувають у стані *green*. Цей баланс характеризується повною синтаксично-семантичною синхронізацією та узгодженістю станів системи. Після внесення збурення, що еквівалентно коли 25% і 50% вузлів перебувають у стані *red*, з точки зору обраного, по суті, випадковим чином, вузла, відстежується швидкість поширення змін на інші вузли мережі. Також розраховується локальна та глобальна ентропії на основі бачення вузлом мережі й мережі загального стану відповідно. Це досягається за допомогою неблокуючого запису індикаторів стану в окремий файл у форматах $\{node\ id, P_{actual}, P_{nominal}, State_{current}, Time_{current}\}$ та $\{Time_{current}, H_{global}, MUC, anomaly\}$, де *anomaly* – індикатор аномального переходу деякого вузла, що розраховується на 1 етапу синтаксично-семантичного узгодження з підрозділу 3.3. Згодом ці дані використовуються для генерації графіків і розрахунку відсоткового

співвідношення поінформованих вузлів, а також MUC , H_{local} та $FSDT$. Це можливо, оскільки фактична зміна стану вимірюється кількісно, тоді як інтервал між першим і останнім оновленням відображає час поширення оновлення мережею.

На рисунку 4.5.1 по вертикальній осі відкладено порядковий номер вузла мережі (N), що співставний з відсотковим співвідношенням поширення змін стану. Горизонтальна вісь відповідає часу (t) в мілісекундах. На рисунку 4.5.2 вертикальна вісь представлена метрикою MUC . Горизонтальна вісь відповідає часу (t) в мілісекундах. Аномальні події позначено червоними штрихпунктирними вертикальними лініями для спрощення візуалізації. Так простіше відслідкувати початок та кінець процесу збурення. На рисунку 4.5.3 вертикальна вісь представлена локальною (H_{local}) та глобальною (N_{global}) ентропіями, тоді як горизонтальна вісь відповідає часу (t) в мілісекундах.

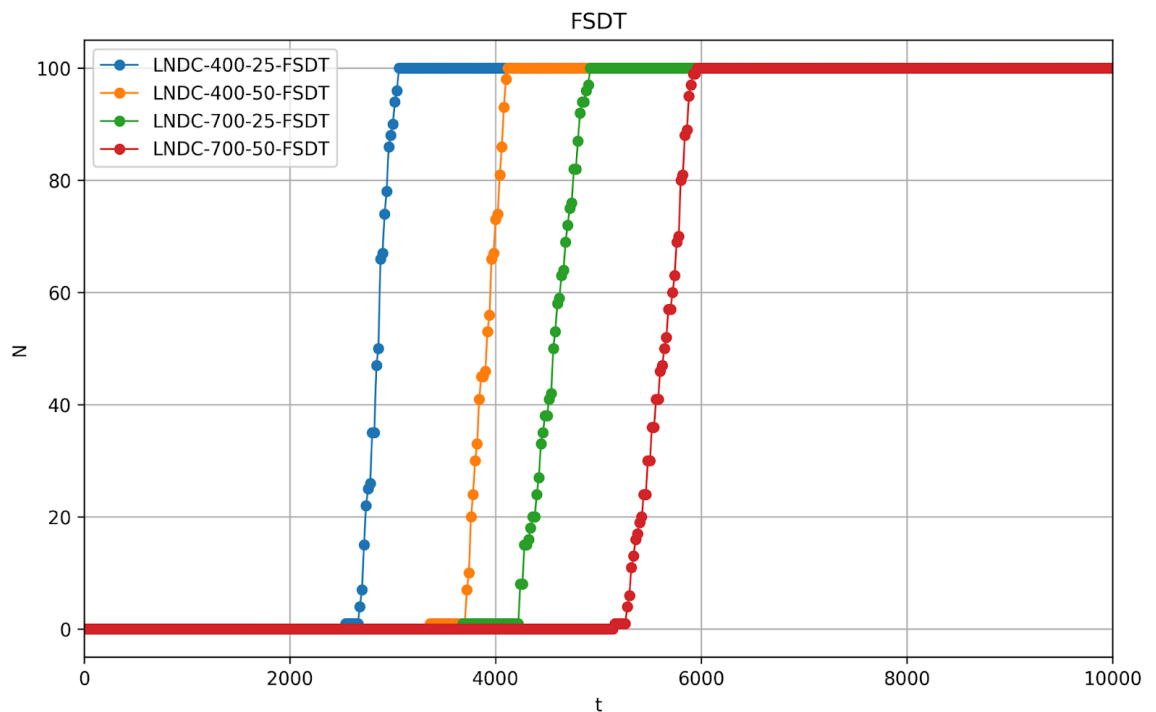


Рис 4.5.1. Результати моделювання $FSDT$ з урахуванням зміни масштабу збурення та $LNDC$. Тут LNDC-400-25-FSDT позначає FSDT при LNDC=400 та 25%-му збуренню. Аналогічно відображені LNDC-400-50-FSDT, LNDC-700-25-FSDT та LNDC-700-50-FSDT.

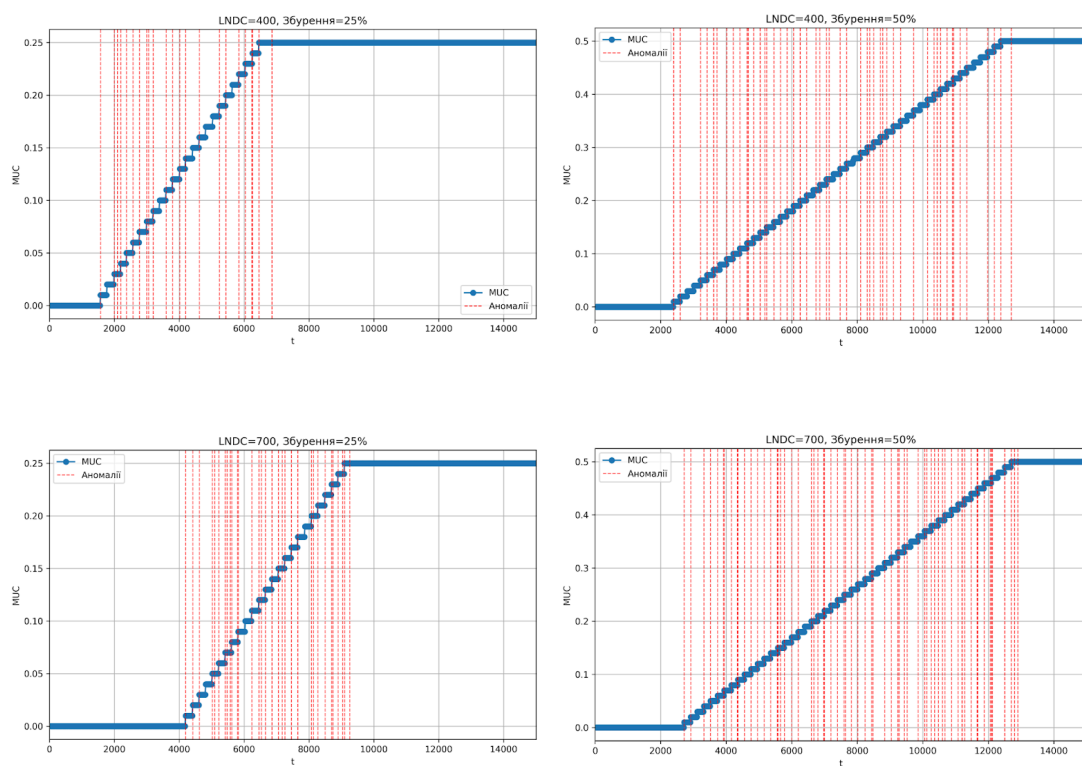


Рис 4.5.2. Результати моделювання MUC та аномалій з урахуванням зміни масштабу збурення та $LNDC$.

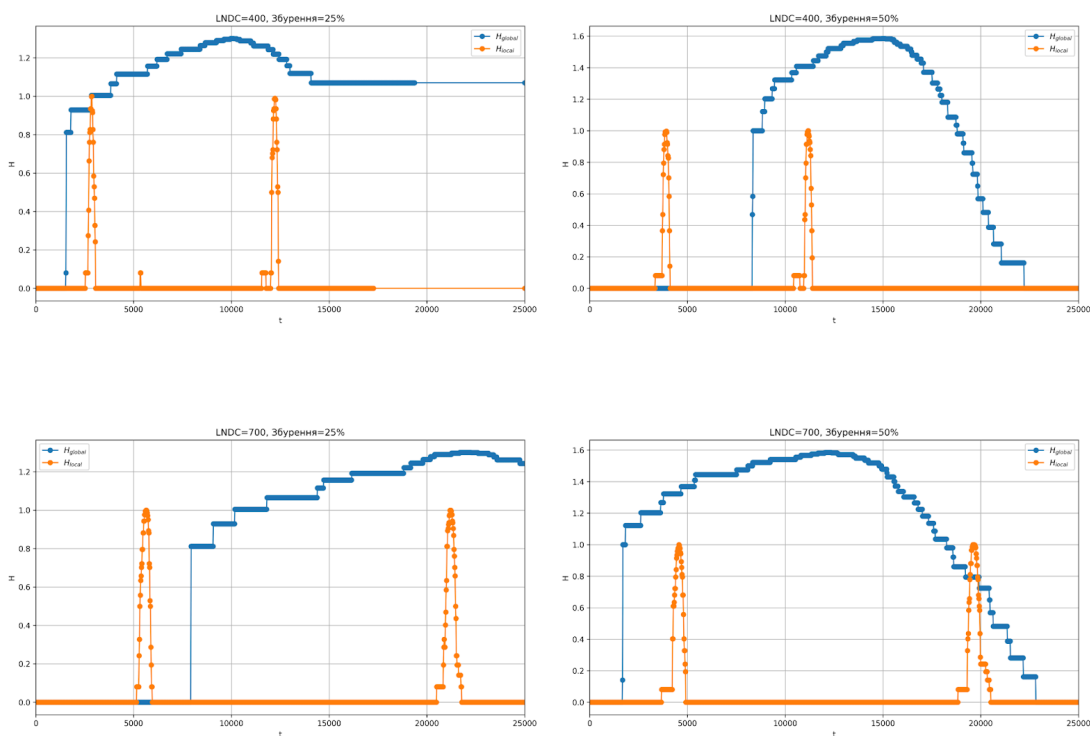


Рис 4.5.3. Результати моделювання H_{local} та H_{global} з урахуванням зміни масштабу збурення та $LNDC$.

Встановлено, що збільшення локальної щільності мережі може спричиняти турбулентність, що ускладнює керування системою в різних її аспектах. Очевидно існує ефективне значення $LNDC$, що характеризує оптимальну кількість вузлів мережі, враховуючи специфіку симуляції, які можуть бути узагальнені на рівні ВТО. Це спостереження відображає висновки зі статті [263] про оптимізацію поведінки мережі шляхом поділу кластеру на менші підкластери та відображає багаторівневу сегрегацію вузлів мережі за допомогою ВТО зі своєю КАС і, відповідно, КАС-CRDT. Таке розділення може бути реалізоване за допомогою окремо визначених та незалежних ВТО. Взаємодія між визначеними ВТО може бути описана на основі твердження про інтеперабельність підсистем з підрозділу 3.4.

Видно як $FSDT$ зростає разом з $LNDC$; однак, процес поширення повідомлень між вузлами залишається стабільним та передбачуваним. Існує лінійна залежність між $FSDT$ та $LNDC$, що дозволяє масштабувати поточне рішення на основі ВТО. Бачимо, що $LNDC$ дозволяє продемонструвати продуктивність узгодження станів вузлів EEM на основі КАС-CRDT під час збільшення кількості взаємодіючих вузлів.

Бачимо, як MUC поступово збільшується, що характеризує ріст кількості неузгодженості станів вузлів мережі, адже в процесі початкового збурення і далі ребалансування та комунікації більша кількість вузлів переходить зі стану повного узгодження до стану наявності часткової неузгодженості або повної неузгодженості. При цьому, H_{global} з часом зменшується, що логічно, адже під час реплікації та узгодження стану однорідність станів вузлів мережі збільшується. Тобто, враховуючи множину допустимих станів вузлів, глобальна ентропія буде максимальною коли $|N_{green}| = |N_{yellow}| = |N_{red}| \approx \frac{|N|}{3}$, де N_{green} , N_{yellow} , N_{red} - підмножини вузлів, які перебувають у *greed*, *yellow* та *red* станах; та мінімальною у випадках коли $|N_{green}| = |N|$ або $|N_{yellow}| = |N|$, або $|N_{green}| = |N|$. Зрозуміло, що при мінімальній ентропії система може перебувати

у стані повної неузгодженості, саме тому значення H_{global} доцільно розглядати в парі з MUC .

Треба зауважити, як H_{local} на деякому часовому проміжку падає, в той час як H_{global} росте, або навпаки, коли H_{local} росте, але H_{global} падає. Аналіз динаміки локальної та глобальної ентропії дозволяє ідентифікувати різні стани системи, включаючи нормальні процеси узгодження та аномалії, пов'язані зі зловмисними діями або збоями. Існують наступні комбінації H_{local} та H_{global} :

1. H_{local} збільшується і H_{global} зменшується. Цей сценарій свідчить про те, що зміна стану певного вузла ініціює процес загального узгодження в мережі. Хоча окремий вузол проходить через етап невизначеності (зростання ентропії), загальна ентропія системи зменшується, оскільки більшість інших вузлів починають сходитися до єдиного, узгодженого стану. Знову ж таки, при зміні локального стану вузла загальна різнорідність станів мережі може залишатися незмінною, або, й взагалі, зменшуватися. Це може бути початковою фазою нормального процесу ребалансування або індикатором локальної аномалії, яка, тим не менш, не порушує загальну стабільність системи.
2. H_{local} зменшується і H_{global} збільшується. Мережа перебуває в процесі узгодження / ребалансування і цей процес, в якому приймає участь спостережуваний вузол, не змінює поточного стану вузла, що говорить про його тимчасову узгодженість. Цей стан також може виникати внаслідок зміни комунікаційної цілісності мережі.
3. H_{local} зменшується і H_{global} зменшується. Активна фаза узгодження / ребалансування мережі завершилася і є успішною, що призводить до локальної та глобальної узгодженості вузлів, де всі вузли мають однакові синтаксично-семантично узгоджені дані.

4. H_{local} збільшується і H_{global} збільшується. Означає активна фазу узгодження / ребалансування мережі, що перебуває у збуреному стані. Ріст локальної ентропії в даному випадку означає, що спостережуваний вузол є учасником процесу узгодження у якості збурюваного або балансуєчого вузла. Зростання локальної ентропії у багатьох вузлах одночасно призводить до значного збільшення глобальної ентропії, що відображає загальну неузгодженість та непередбачуваність стану системи. У такій ситуації система втрачає стабільність і стає некерованою, що вимагає негайного втручання з боку інженерів або застосування інтелектуальної системи, здатної автоматизувати процеси оцінки та управління ЕЕМ. Оцінка правдоподібності переходу підстанів вузла дозволяє виявити семантичні аномалії до того, як збурення призведе до такого критичного стану.

Зрозуміло, що будь які зміни ентропії потрібно трактувати на основі MUC , що є надійним показником міри узгодженості вузлів мережі у відповідності до множини інваріантів системи. Стани спокою H_{local} слід інтерпретувати з прив'язкою до H_{global} і навпаки.

Також видно пряму залежність між позитивною оцінкою аномальності переходу станів та збільшенням H_{global} , що відображає етап оцінки правдоподібності переходу між підстанами вузла до того, як мережа увійде в стан ребалансування та глобального узгодження. Бачимо, як аномалії слугують причинно-наслідковим містком між фактичним збуренням та реакцією мережі під час застосування функції корекції стану вузла. При цьому видно, що поступальне зростання кількості аномалій в мережі, фактично, не впливає на швидкість поширення конкретного стану вузла мережею, що дозволяє іншим вузлам мережі приймати оптимальні операційні рішення відносно спостережуваного вузла, взаємодіючи з ним прямо, або опосередковано.

Варто зауважити, що *MUC* в кінці не зменшується до нуля через наявність в мережі частково узгоджених вузлів, що не суперечить загальній логіці експерименту, адже часткова узгодженість в даному випадку означає робочий стан вузла або ж наявність оновлень, що мають бути застосовані у якості локальних змін, що, тим не менш, не блокує функціонування вузла та мережі.

Можна дійти висновку – процес реплікації стану, ребалансування, локального та глобального узгодження зменшує рівень ентропії та збільшує узгодженість стану вузлів та мережі навіть за умови критичних функціональних збоїв та аномальних навантажень. Оцінка правдоподібності траєкторії переходу підстанів вузла дозволяє виявити семантичні аномалії до того, як збурення призведе до росту локальної та глобальної ентропії, що робить систему більш спостережуваною та дозволяє ефективно функціонування ЕЕМ під час збурення. Множина скінчених відносин-предикатів $I = P$ та операцій Λ , визначених в рамках КАС-CRDT визначають вузол на структурно-функціональному рівні, формуючи формально верифіковані рамки функціонування вузла ЕЕМ. Це дозволяє узгодити стани вузлів та мережі як на синтаксичному, так і на семантичному рівні.

Можна стверджувати, що проведені дослідження підтвердили відповідність отриманих експериментальних результатів на основі теоретичного розрахунку, що дозволяє постулювати успішність та доцільність використання комбінованого підходу на основі КАС-CRDT для визначення та узгодження стану вузлів ЕЕМ. Наведені експериментальні результати продемонстрували, що запропоноване рішення є масштабованим та відмовостійким. Також можна стверджувати, що здатність виявляти аномалії до того, як система зазнає збурення, робить модель КАС-CRDT підходящою для моніторингу та аналізу даних в електромережах у реальному часі.

Аналізуючи зміни в стані ЕЕМ під час різних режимів роботи, аномалії під час процесу узгодження та змінній локальній щільності мережі, інженери можуть виявити навіть незначні зміни, спричинені несправністю чи дефектами, ще на ранніх стадіях. Це дає змогу своєчасно вжити заходів до їх усунення,

запобігаючи серйозним відмовам, та сформувані стратегію управління, яке би враховувало розподіленість та децентралізованість архітектури мережі. Гарантії локальної то глобальної збіжності дозволяють формувати відмовостійкі та гнучкі комбіновані моделі управління на основі суб'єктивного та об'єктивного станів вузлів мережі, враховуючи локальні, як от спроба оптимізації місцевого споживання електроенергії, та глобальні цілі, як от потреба балансування між попитом та пропозицією на державному рівні.

Висновки до четвертого розділу

1. Було успішно здійснено перехід від теоретичної гібридної моделі узгодження KAC-CRDT до її практичної реалізації. Застосування моделі акторів та принципів ФП виявилось оптимальним обчислювальним фундаментом. Ця синергія дозволила зберегти формальні гарантії надійності та коректності, закладені в теоретичній моделі.
2. Було програмно реалізовано прототип децентралізованої та розподіленої P2P EEM. Для програмної реалізації були обрані мова програмування Scala та інструментарій Akka.
3. Було успішно змодельовано реплікацію та процес узгодження стану вузлів EEM на основі передачі дельти стану CRDT, що дозволило оптимізувати процес реплікації. Це забезпечило швидке та ефективне узгодження станів у розподіленій системі.
4. Було розроблено спеціальний фреймворк для моделювання розподілених електроенергетичних мереж (EEM) з високим навантаженням. Цей фреймворк дозволив симулювати асинхронну природу EEM, де кожен вузол представлений як незалежний актор зі своїм інкапсульованим станом.
5. Експериментально доведено, що запропоноване рішення на основі KAC-CRDT є масштабованим та відмовостійким. Здатність виявляти аномалії до того, як система зазнає збурення, робить цю модель придатною для моніторингу та аналізу даних в EEM у реальному часі.

Загалом, дослідження підтвердили, що комбінована модель KAC-CRDT є доцільною для визначення та узгодження стану вузлів ЕЕМ.

6. За результатами експериментального дослідження на основі розроблених метрик для кількісної оцінки рівня узгодженості інформації та інформаційної ентропії в ЕЕМ було проведено аналіз та сформовані висновки про ефективність моделі KAC-CRDT.
7. 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.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі в результаті проведення теоретичних і експериментальних досліджень вирішено важливе наукове завдання розробки моделі синтаксично-семантичного узгодження інформації в розподілених електроенергетичних системах, що дозволило зменшити ентропію при визначенні стану системи, підвищити рівень консистентності даних та, як наслідок, надійність і ефективність управління в ЕЕМ. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз проблем узгодження інформації про стани вузлів в сучасних розподілених ЕЕМ та існуючих підходів до їх вирішення, що призводять до зростання інформаційної ентропії, підтвердив – розробка комбінованої моделі синтаксично-семантичної узгодженості інформації, є актуальним науковим завданням. Встановлено, що існуючі підходи описують вузькоспеціалізовані рішення, що в загальному випадку зосереджуються на синтаксичній збіжності даних, упускаючи семантичну правдоподібність узгоджуваної інформації. Це обґрунтовує необхідність розробки нового методу, що здатен об'єднати високорівневу семантичну складову узгодженості та низькорівневу синтаксичну узгодженість.
2. Описано математичний формалізм КАС для моделювання знань та їх передачі між вузлами як формальну основу для визначення процесів когнітивної (інтелектуальної) діяльності системи, як композиції функцій, що реалізуються за певних умов з певною ймовірністю, та функціонування інтелектуальних ЕЕМ. 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, та дано формальні визначення таким процесам КАС, як теоретичне та практичне дослідження, теоретичне та практичне навчання.

3. Безконфліктно репліковані типи даних було адаптовано для забезпечення гарантованої синтаксичної узгодженості даних про стан вузлів та підсистем EEM.
4. Описано метод представлення стану вузла EEM та операцій над ними в рамках KAC з урахуванням статичних та динамічних властивостей, внутрішнього та зовнішнього контекстів ВТО та формалізму моделі KAC-CRDT, що може бути використаний для синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем EEM. Це дозволило забезпечити формальну верифікованість логіки узгодження та надійність її розподіленого виконання для ефективної оцінки стану та функціонування EEM.
5. Розроблено комбіновану модель KAC-CRDT для представлення знань про стани EEM та процесів їх синтаксично-семантичного узгодження, що базується на синергії KAC та CRDT. Запропоновано підхід до реалізації функцій узгодження та оцінки стану вузла, визначених в термінах запропонованого формалізму. Новизна підходу полягає у поєднанні двох рівнів узгодження: високорівневого семантичного на основі KAC, що визначає формальні правила та логіку узгодженості знань, та синтаксичного на основі CRDT, що забезпечують гарантовану збіжність реплік в умовах асинхронної комунікації.
6. В рамках розробленої моделі KAC-CRDT визначено критерій та формалізовано процес синтаксично-семантичного узгодження інформації про стани вузлів та підсистем EEM, що включає оцінку та аналіз траєкторії переходу між підстанами вузла, послідовні синтаксичне та семантичне узгодження даних, подальший аналіз та корекцію у випадку невідповідності результуючого стану інваріантам KAC
7. Досліджено доцільність використання принципів функціонального програмування та моделі акторів для реалізації експериментального дослідження процесу узгодження інформації про стан вузлів EEM визначеного в термінах формалізму KAC-CRDT. Запропоновано підхід до

реалізації системи узгодження на основі інструментарію Akka та мови програмування Scala. Обґрунтовано, що такий підхід дозволяє створювати децентралізовані, асинхронні, відмовостійкі та масштабовані програмні рішення, здатні відтворювати гетерогенні та динамічні середовища сучасних ЕЕМ.

8. Розроблено метрики для кількісної оцінки рівня синтаксично-семантичної узгодженості інформації в контексті запропонованої моделі KAC-CRDT, локальної та глобальної інформаційної ентропії в ЕЕМ. Досліджено реакцію системи на збурення на основі запропонованого коефіцієнта локальної щільності мережі. Показано, що система здатна ефективно функціонувати під час аномально високих збурень (до 50% збурених вузлів мережі), забезпечувати синтаксично-семантичну узгодженість стану вузлів ЕЕМ та зберігати локальну (на рівні вузла) та глобальну (на рівні системи) цілісність мережі.
9. Проведено експериментальне дослідження та імітаційне моделювання, що підтвердило ефективність запропонованої моделі KAC-CRDT. Доведено, що її застосування дозволяє збільшити рівень узгодженості стану системи та знизити рівень інформаційної ентропії, що прямо впливає на підвищення операційної ефективності та спостережуваності ЕЕМ.
10. Отримані наукові результати є теоретичною та практичною основою для розробки нового покоління інтелектуальних систем моніторингу та управління для критичних інфраструктур. Застосування розробленої моделі сприятиме підвищенню рівня автономності, надійності та стійкості енергетичних систем до зовнішніх дестабілізуючих впливів. Розроблена модель може бути адаптована для використання в інших КФС з високим рівнем гетерогенності, розподіленості та децентралізованості.

Результати роботи рекомендується використовувати при розробці та модернізації систем управління технологічними процесами та систем оперативно-диспетчерського управління (SCADA/ADMS). Запропоновані

методи та моделі можуть бути впроваджені як окремий модуль узгодження даних для підвищення надійності інтелектуальних мереж. Енергетичним компаніям та операторам рекомендується проведення пілотних проектів для апробації підходу на рівні мікромереж або в районах з високою концентрацією розподіленої генерації. Крім того, принципи формалізації семантичної узгодженості доцільно враховувати при розробці нових та розширенні існуючих стандартів обміну даними в енергетиці, таких як CIM та IEC.

Важливо зауважити, що в роботі при формалізації моделі KAC-CRDT на основі стану вузла EEM розглядалася лише статична складова стану. Реалізація моделі KAC-CRDT на основі комбінованого представлення статичної та динамічної складової стану потребує додаткової формалізації, що є ключовим напрямком подальших досліджень. Додаткової уваги потребує формалізація процесу узгодження та передачі інформації між ВТО. Можна виділити потребу розробки кіберстійких моделей KAC-CRDT та дослідження можливості інтеграції запропонованої моделі зі смарт-контрактами.

Доцільним є розширення та адаптація запропонованої моделі для інших класів кіберфізичних та розподілених систем, де висувуються високі вимоги до синтаксично-семантичної узгодженості даних. Перспективним вбачається застосування KAC-CRDT для задач координації роїв автономних роботів та безпілотних апаратів, де узгоджене бачення стану оточення є критичним для виконання спільних завдань. Іншим важливим напрямком є розробка систем управління міською інфраструктурою, зокрема інтелектуальними транспортними системами та мережами IoT. Подальшого дослідження потребує розробка спеціалізованих АС та відповідних CRDT, оптимізованих для специфіки цих предметних областей.

Отримані результати сприятимуть розвитку теорії та практики побудови інтелектуальних систем оцінки та управління для критичних інфраструктур, зокрема, в електроенергетиці, шляхом створення науково обґрунтованого інструментарію для забезпечення інформаційної узгодженості в розподілених КФС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] G. Tembo, ‘Overview of the Microgrid Concept and its Hierarchical Control Architecture’, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 5, no. 3, Mar. 2016. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.ijert.org/research/overview-of-the-microgrid-concept-and-its-hierarchical-control-architecture-IJERTV5IS030080.pdf>
- [2] G. C. Konstantopoulos, A. T. Alexandridis, and P. C. Papageorgiou, ‘Towards the Integration of Modern Power Systems into a Cyber–Physical Framework’, *Energies*, vol. 13, no. 9, p. 2169, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13092169.
- [3] Nuhayd Nadi Omar and Mahsen Abdulkarim Saleh, ‘Power to the People: Advancing Resilient and Sustainable Decentralized Energy Distribution Systems’, *LJIS*, no. 4, pp. 10–24, Feb. 2025, doi: 10.31039/ljis.2025.4.300.
- [4] N. El Assri, S. Chabaa, K. Lmesri, M. A. Jallal, and A. Zeroual, ‘Modeling techniques for decentralized energy systems applied in smart grids’, *E3S Web Conf.*, vol. 297, p. 01068, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202129701068.
- [5] K. Zhou and S. Yang, ‘5.11 Smart Energy Management’, in *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier, 2018, pp. 423–456. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00525-3.
- [6] C. Qu and R. N. Bang, ‘European grid development modeling and analysis: established frameworks, research trends, and future opportunities’, *Discov Energy*, vol. 4, no. 1, p. 9, June 2024, doi: 10.1007/s43937-024-00033-9.
- [7] M. E. El-hawary, ‘The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends’, *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 3–4, pp. 239–250, Mar. 2014, doi: 10.1080/15325008.2013.868558.
- [8] ‘ADVANCED METERING INFRASTRUCTURE’, National Energy Technology Laboratory for the U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, White Paper, Feb. 2008. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/AMI-White-paper-final-021108--2--APPROVED_2008_02_12.pdf

- [9] І. Бойко, 'Динамічна тарифікація у системі електроживлення', КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО, Київ, Україна, 2021. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8c0317f9-ee4d-46ad-b28d-161467b94323/content>
- [10] М. Б. Паласевич, О. В. Савка, and Т. А. Лепак, 'Вплив смарт-технологій на економічний розвиток та підвищення енергоефективності національної економіки', Aug. 2024, doi: 10.5281/ZENODO.13268557.
- [11] О. Яндульський, А. Нестерко, О. Тимохін, and А. Тимохніа, 'МОНІТОРИНГ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ МІКРО-PMU', presented at the XXV ЮВІЛЕЙНА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ "ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТІ", Кафедра автоматизації енергосистем Національний технічний університет України 'Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського'. [Online]. Available: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/KPI_PMU_VDE.pdf
- [12] M. H. Rehmani, M. Reisslein, A. Rachedi, M. Erol-Kantarci, and M. Radenkovic, 'Integrating Renewable Energy Resources Into the Smart Grid: Recent Developments in Information and Communication Technologies', *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 14, no. 7, pp. 2814–2825, July 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2819169.
- [13] I. Alotaibi, M. A. Abido, M. Khalid, and A. V. Savkin, 'A Comprehensive Review of Recent Advances in Smart Grids: A Sustainable Future with Renewable Energy Resources', *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6269, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13236269.
- [14] S. Sakib, Md. B. Hossain, M. A. Zamee, M. J. Hossain, and Md. A. Habib, 'Role of battery energy storage systems: A comprehensive review on renewable energy zones integration in weak transmission networks', *Journal of Energy Storage*, vol. 128, p. 117223, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.117223.

- [15] P. Kumar *et al.*, ‘A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future’, *Energy Conversion and Management: X*, vol. 25, p. 100864, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100864.
- [16] F. Liu *et al.*, ‘Vehicle-To-Grid Technology Acceptance for Electric Vehicle Users: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda’, *Int J Consumer Studies*, vol. 49, no. 3, p. e70065, May 2025, doi: 10.1111/ijcs.70065.
- [17] R. Zafar, A. Mahmood, S. Razzaq, W. Ali, U. Naeem, and K. Shehzad, ‘Prosumer based energy management and sharing in smart grid’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1675–1684, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.018.
- [18] Y. Parag and B. K. Sovacool, ‘Electricity market design for the prosumer era’, *Nat Energy*, vol. 1, no. 4, p. 16032, Mar. 2016, doi: 10.1038/nenergy.2016.32.
- [19] ‘ДТЕК створює цифрові двійники енергомереж’, <https://ua-energy.org/>.
[Online]. Available:
<https://ua-energy.org/uk/posts/dtek-stvoriuiie-tsyfrovykh-dviinykiv-enerhomerezh>
- [20] R. Alharbey, A. Shafiq, A. Daud, H. Dawood, A. Bukhari, and B. Alshemaimri, ‘Digital twin technology for enhanced smart grid performance: integrating sustainability, security, and efficiency’, *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1397748, June 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1397748.
- [21] L. G. Manescu *et al.*, ‘Complex Software System for Data Management and Analysis of Power Distribution Grids’, in *2017 Fourth International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI)*, Corfu: IEEE, Aug. 2017, pp. 51–56. doi: 10.1109/MCSI.2017.18.
- [22] N. Bui, A. Castellani, P. Casari, and M. Zorzi, ‘The internet of energy: a web-enabled smart grid system’, *IEEE Network*, vol. 26, no. 4, pp. 39–45, 2012, doi: 10.1109/MNET.2012.6246751.
- [23] Державна інспекція енергетичного нагляду України, ‘Розподілена генерація: енергетичний щит України в умовах війни, - Держенергонагляд’, Урядовий портал. Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available:

<https://www.kmu.gov.ua/news/rozpodilena-heneratsiia-enerhetychnyi-shchyt-ukrainy-v-umovakh-viiny-derzhenerhonahliad>

- [24] ‘Renewable Energy Trends in 2025’, BDO Ukraine. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.bdo.ua/en-gb/insights-1/information-materials/2025/what-will-be-the-trends-in-alternative-energy-in-2025>
- [25] О. Медведєва, З. Гальченко, and О. Демченко, ‘Сучасний стан розвитку відновлювальної енергетики в Україні та можливі рішення’, *Chall. issue mod. sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 145–151, June 2025, doi: 10.15421/cims.4.298.
- [26] C. Ozansoy, ‘Design of an adaptive protection system for microgrids with distributed energy resources in accordance with IEC 61850-7-420’, in *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey: IEEE, Nov. 2015, pp. 474–478. doi: 10.1109/ELECO.2015.7394597.
- [27] S. Rezaei, ‘An adaptive bidirectional protective relay algorithm for ferroresonance in renewable energy networks’, *Electric Power Systems Research*, vol. 212, p. 108625, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108625.
- [28] WORKING GROUP C30, ‘Microgrid Protection Systems’. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://pes-psrc.org/kb/report/114.pdf>
- [29] M. Singh and P. Basak, ‘Adaptive protection methodology in microgrid for fault location and nature detection using q 0 components of fault current’, *IET Generation Trans & Dist*, vol. 13, no. 6, pp. 760–769, Mar. 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6347.
- [30] ‘Solar Inverters Harmonic Distortion: What You Need to Know’, <https://invertersystem.com.ng/>. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://invertersystem.com.ng/solar-inverters-harmonic-distortion/>
- [31] R. R. A. Fortes, R. F. Buzo, and L. C. O. De Oliveira, ‘Harmonic distortion assessment in power distribution networks considering DC component injection from PV inverters’, *Electric Power Systems Research*, vol. 188, p. 106521, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106521.

- [32] G. Notton *et al.*, ‘Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences, cost of intermittence and benefit of forecasting’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 87, pp. 96–105, May 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.007.
- [33] C. Voyant *et al.*, ‘Stochastic Coefficient of Variation: Assessing the Variability and Forecastability of Solar Irradiance’, *Renewable Energy*, vol. 256, p. 123913, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.renene.2025.123913.
- [34] P. Seljom, L. Kvalbein, L. Hellemo, M. Kaut, and M. M. Ortiz, ‘Stochastic modelling of variable renewables in long-term energy models: Dataset, scenario generation & quality of results’, *Energy*, vol. 236, p. 121415, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121415.
- [35] R. Cespedes, ‘A reference model for the electrical energy system based on Smart Grids’, in *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, Montevideo: IEEE, Sept. 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319068.
- [36] P. Casau, P. Rosa, S. M. Tabatabaeipour, and C. Silvestre, ‘Fault Detection and Isolation and Fault Tolerant Control of Wind Turbines using Set-Valued Observers’, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 20, pp. 120–125, Jan. 2012, doi: 10.3182/20120829-3-MX-2028.00214.
- [37] A. Safari, M. Sabahi, and A. Oshnoei, ‘ResFaultyMan: An intelligent fault detection predictive model in power electronics systems using unsupervised learning isolation forest’, *Heliyon*, vol. 10, no. 15, p. e35243, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35243.
- [38] S. A. S. Nizam, Z.-A. Ibrahim, F. A. Rahim, H. S. Fadzil, H. I. M. Abdullah, and M. Z. Mustaffa, ‘Forensic Analysis on False Data Injection Attack on IoT Environment’, *IJACSA*, vol. 12, no. 10, 2021, doi: 10.14569/IJACSA.2021.0121029.
- [39] X. Wang *et al.*, ‘Coordinated cyber-physical attack on power grids based on malicious power dispatch’, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 155, p. 109678, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109678.

- [40] Kelvin Edem Bassey, Shahab Anas Rajput, and Kabir Oyewale, 'Peer-to-peer energy trading: Innovations, regulatory challenges, and the future of decentralized energy systems', *World J. Adv. Res. Rev.*, vol. 24, no. 2, pp. 172–186, Nov. 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.24.2.3324.
- [41] H. Zhou, B. Li, X. Zong, and D. Chen, 'Transactive energy system: Concept, configuration, and mechanism', *Front. Energy Res.*, vol. 10, p. 1057106, Jan. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2022.1057106.
- [42] P. Sudta and J. G. Singh, 'An approach to prosumer modeling and financial assessment with load clustering algorithm in an active power distribution network', *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 38, p. 101249, June 2024, doi: 10.1016/j.segan.2023.101249.
- [43] O. Prokopenko, 'Digital contracts in renewable energy markets: challenges and opportunities', *LBSHerald*, vol. 2, no. 4, pp. 17–30, Nov. 2022.
- [44] M. Choobineh, A. Arabnya, B. Sohrabi, A. Khodaei, and A. Paaso, 'Blockchain technology in energy systems: A state-of-the-art review', *IET Blockchain*, vol. 3, no. 1, pp. 35–59, Mar. 2023, doi: 10.1049/blc2.12020.
- [45] J. Iria and F. Soares, 'An energy-as-a-service business model for aggregators of prosumers', *Applied Energy*, vol. 347, p. 121487, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121487.
- [46] O. H. Asuni *et al.*, 'Energy as a Service (EaaS) in Emerging Green Economy: Opportunities for Creating and Selling Energy', in *Advances in Environmental Engineering and Green Technologies*, F. Özsungur, M. Chaychi Semsari, and H. Küçük Bayraktar, Eds, IGI Global, 2025, pp. 421–452. doi: 10.4018/979-8-3693-8814-3.ch015.
- [47] R. Santodomingo *et al.*, 'IEC 61970 for Energy Management System Integration', in *Smart Grid Handbook*, 1st edn, C.-C. Liu, S. McArthur, and S.-J. Lee, Eds, Wiley, 2016, pp. 1–29. doi: 10.1002/9781118755471.sgd094.
- [48] L. Guo *et al.*, 'Design of IEC-61968-Based Distribution Network Information Exchange Interface', *Procedia Engineering*, vol. 24, pp. 69–77, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2604.

- [49] Y. You, ‘The Studying of Power Grid Planning Based on Complex Adaptive System thoery’, in *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Maharashtra, India: IEEE, Apr. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418213.
- [50] D. Das and D. K. Rout, ‘Adaptive algorithm for optimal real-time pricing in cognitive radio enabled smart grid network’, *ETRI Journal*, vol. 42, no. 4, pp. 585–595, Aug. 2020, doi: 10.4218/etrij.2018-0446.
- [51] U. Pandey, A. Pathak, A. Kumar, and S. Mondal, ‘Applications of artificial intelligence in power system operation, control and planning: a review’, *Clean Energy*, vol. 7, no. 6, pp. 1199–1218, Dec. 2023, doi: 10.1093/ce/zkad061.
- [52] D. K. Mishra, M. J. Ghadi, A. Azizivahed, L. Li, and J. Zhang, ‘A review on resilience studies in active distribution systems’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110201, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110201.
- [53] A. V. Jha *et al.*, ‘Smart grid cyber-physical systems: communication technologies, standards and challenges’, *Wireless Netw*, vol. 27, no. 4, pp. 2595–2613, May 2021, doi: 10.1007/s11276-021-02579-1.
- [54] A. K. Tyagi and N. Sreenath, ‘Cyber Physical Systems: Analyses, challenges and possible solutions’, *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 1, pp. 22–33, 2021, doi: 10.1016/j.iotcps.2021.12.002.
- [55] M. K. Hasan, A. A. Habib, Z. Shukur, F. Ibrahim, S. Islam, and M. A. Razzaque, ‘Review on cyber-physical and cyber-security system in smart grid: Standards, protocols, constraints, and recommendations’, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 209, p. 103540, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jnca.2022.103540.
- [56] M. Nikpour *et al.*, ‘Intelligent Energy Management with IoT Framework in Smart Cities Using Intelligent Analysis: An Application of Machine Learning Methods for Complex Networks and Systems’, Dec. 03, 2024, *arXiv*: arXiv:2306.05567. doi: 10.48550/arXiv.2306.05567.

- [57] J. Vergne, ‘Decentralized vs. Distributed Organization: Blockchain, Machine Learning and the Future of the Digital Platform’, *Organization Theory*, vol. 1, no. 4, p. 2631787720977052, Oct. 2020, doi: 10.1177/2631787720977052.
- [58] S. Misik, A. Cela, and Z. Bradac, ‘Distributed Systems - A brief review of theory and practice’, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 25, pp. 318–323, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.12.057.
- [59] J. L. King, ‘Centralized versus decentralized computing: organizational considerations and management options’, *ACM Comput. Surv.*, vol. 15, no. 4, pp. 319–349, Dec. 1983, doi: 10.1145/289.290.
- [60] W. Yeoh and M. Yokoo, ‘Distributed Problem Solving’, *AI Magazine*, vol. 33, no. 3, pp. 53–65, Sept. 2012, doi: 10.1609/aimag.v33i3.2429.
- [61] S. Luzipo and A. Gerber, ‘A Systematic Literature Review of Blockchain Consensus Protocols’, in *Responsible AI and Analytics for an Ethical and Inclusive Digitized Society*, vol. 12896, D. Dennehy, A. Griva, N. Pouloudi, Y. K. Dwivedi, I. Pappas, and M. Mäntymäki, Eds, in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12896. , Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 580–595. doi: 10.1007/978-3-030-85447-8_48.
- [62] M. Khan, F. Den Hartog, and J. Hu, ‘A Survey and Ontology of Blockchain Consensus Algorithms for Resource-Constrained IoT Systems’, *Sensors*, vol. 22, no. 21, p. 8188, Oct. 2022, doi: 10.3390/s22218188.
- [63] G. Kormpakis *et al.*, ‘Home Energy Management Systems: Challenges, Heterogeneity & Integration Architecture Towards A Smart City Ecosystem’, Aug. 07, 2024, *arXiv*: arXiv:2408.03707. doi: 10.48550/arXiv.2408.03707.
- [64] G. Xu, W. Yu, D. Griffith, N. Golmie, and P. Moulema, ‘Towards Integrating Distributed Energy Resources and Storage Devices in Smart Grid’, *IEEE Internet Things J.*, pp. 1–1, 2016, doi: 10.1109/JIOT.2016.2640563.
- [65] P. Johansson, M. Vendel, and C. Nuur, ‘Integrating distributed energy resources in electricity distribution systems: An explorative study of challenges facing DSOs in Sweden’, *Utilities Policy*, vol. 67, p. 101117, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jup.2020.101117.

- [66] B. Dong *et al.*, ‘Leveraging heterogeneous networks to analyze energy storage systems in power systems and renewable energy research: a scientometric study’, *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1424928, July 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1424928.
- [67] F. Ding, Y. Zhang, and A. Bernstein, *Real-Time Distributed Energy Resource Energy Dispatch Using Distributed Control*. (2019). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States). doi: 10.11578/DC.20191119.1.
- [68] S. Park *et al.*, ‘Distributed Energy IoT-Based Real-Time Virtual Energy Prosumer Business Model for Distributed Power Resource’, *Sensors*, vol. 21, no. 13, p. 4533, July 2021, doi: 10.3390/s21134533.
- [69] J. Huang, S. Zhou, G. Li, and Q. Shen, ‘Real-time monitoring and optimization methods for user-side energy management based on edge computing’, *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 24890, July 2025, doi: 10.1038/s41598-025-07592-4.
- [70] V. Gomathy, V. Kavitha, C. Nayantara, J. M. F. Khan, G. Vimalarani, and S. S. Rani, ‘Internet of Things-Based Advanced Metering Infrastructure (AMI) for Smart Grids’, in *Integration of Renewable Energy Sources with Smart Grid*, 1st edn, M. Kathires, A. Mahaboob Subahani, and G. R. Kanagachidambaresan, Eds, Wiley, 2021, pp. 77–100. doi: 10.1002/9781119751908.ch4.
- [71] S. R. Samantaray, I. Kamwa, and G. Joos, ‘Phasor measurement unit based wide-area monitoring and information sharing between micro-grids’, *IET Generation Trans & Dist*, vol. 11, no. 5, pp. 1293–1302, Mar. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1419.
- [72] ‘Embracing the Future: Why Data CAMP Outshines Traditional SCADA’, AHHA Labs. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://ahha.ai/2023/11/28/en-scada/>
- [73] M. Alanazi, A. Mahmood, and M. J. M. Chowdhury, ‘SCADA vulnerabilities and attacks: A review of the state-of-the-art and open issues’, *Computers & Security*, vol. 125, p. 103028, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.cose.2022.103028.

- [74] S. Rustamova and F. Rustamov, ‘Problems of integrating artificial intelligence with SCADA systems’, *SR*, no. 2, pp. 106–117, Dec. 2024, doi: 10.21303/2313-8416.2024.003691.
- [75] DTEK, ‘ДТЕК Мережі впроваджує цифрові диспетчерські для управління інфраструктурою мереж’, DTEK. [Online]. Available: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-seti-vnedryaet-tsifrovye-dispetcherskie-dlya-upravleniya-infrastrukturoy-elektrosetey/>
- [76] A. H. Bagdadee and L. Zhang, ‘A Review of the Smart Grid Concept for Electrical Power System’, *International Journal of Energy Optimization and Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 105–126, Oct. 2019, doi: 10.4018/IJEOE.2019100105.
- [77] P. Biswas *et al.*, ‘An Extensive and Methodical Review of Smart Grids for Sustainable Energy Management-Addressing Challenges with AI, Renewable Energy Integration and Leading-edge Technologies’, Jan. 23, 2025, *arXiv*: arXiv:2501.14143. doi: 10.48550/arXiv.2501.14143.
- [78] J. Ugwu, K. C. Odo, C. P. Ohanu, J. García, and R. Georgious, ‘Comprehensive Review of Renewable Energy Communication Modeling for Smart Systems’, *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 409, Dec. 2022, doi: 10.3390/en16010409.
- [79] A. Ipakchi, ‘Smart grid of the future with large scale DR/DER penetration’, in *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, WA, USA: IEEE, Mar. 2009, pp. 1–1. doi: 10.1109/PSCE.2009.4840234.
- [80] A. Malcom, ‘Smart Grid Technologies and Their Role in Sustainable Energy Management’, *IJCE*, vol. 6, no. 2, pp. 49–64, July 2024, doi: 10.47941/ijce.2136.
- [81] M. E. El-hawary, ‘The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends’, *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 3–4, pp. 239–250, Mar. 2014, doi: 10.1080/15325008.2013.868558.
- [82] M. K. Raza *et al.*, ‘Integration of very small modular reactors and renewable energy resources in the microgrid’, *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1365735, May 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1365735.

- [83] S. Khunkitti, P. Boonluk, and A. Siritaratiwat, ‘Optimal Location and Sizing of BESS for Performance Improvement of Distribution Systems with High DG Penetration’, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2022, pp. 1–16, June 2022, doi: 10.1155/2022/6361243.
- [84] P. Shi, Y. Cui, K. Xu, M. Zhang, and L. Ding, ‘Data Consistency Theory and Case Study for Scientific Big Data’, *Information*, vol. 10, no. 4, p. 137, Apr. 2019, doi: 10.3390/info10040137.
- [85] C. J. Matheus *et al.*, ‘Semantic network management for next-generation networks’, *Computational Intelligence*, vol. 35, no. 2, pp. 285–309, May 2019, doi: 10.1111/coin.12180.
- [86] Y. Wang, ‘Semantic Communication Networks Empowered Artificial Intelligence of Things’, July 04, 2024, *arXiv*: arXiv:2407.06082. doi: 10.48550/arXiv.2407.06082.
- [87] H. Zheng and L. Shi, ‘Coherence in Intelligent Systems’, in *Artificial General Intelligence*, vol. 13921, P. Hammer, M. Alirezaie, and C. Strannegård, Eds, in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13921. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 357–366. doi: 10.1007/978-3-031-33469-6_36.
- [88] ‘Кармазін, О. О., and І. В. Іванченко. “ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ КОМПЛЕКСНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ–ПІДСУМКИ XXV НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ 2024 р.”’,
- [89] R. J. Schalkoff, *Artificial intelligence: an engineering approach*. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [90] M. Q. Raza and A. Khosravi, ‘A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 1352–1372, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.065.
- [91] N. Kamel and Z. Baharudin, ‘Short term load forecast using Burg autoregressive technique’, in *2007 International Conference on Intelligent and*

- Advanced Systems*, Kuala Lumpur: IEEE, Nov. 2007, pp. 912–916. doi: 10.1109/ICIAS.2007.4658519.
- [92] A. Entezari, A. Aslani, R. Zahedi, and Y. Noorollahi, ‘Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective’, *Energy Strategy Reviews*, vol. 45, p. 101017, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.esr.2022.101017.
- [93] M. M. Forootan, I. Larki, R. Zahedi, and A. Ahmadi, ‘Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review’, *Sustainability*, vol. 14, no. 8, p. 4832, Apr. 2022, doi: 10.3390/su14084832.
- [94] E. Mohammadi, M. Alizadeh, M. Asgarimoghaddam, X. Wang, and M. G. Simoes, ‘A Review on Application of Artificial Intelligence Techniques in Microgrids’, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 878–890, Oct. 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3198504.
- [95] H. Szczepaniuk and E. K. Szczepaniuk, ‘Applications of Artificial Intelligence Algorithms in the Energy Sector’, *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 347, Dec. 2022, doi: 10.3390/en16010347.
- [96] O. A. Omitaomu and H. Niu, ‘Artificial Intelligence Techniques in Smart Grid: A Survey’, *Smart Cities*, vol. 4, no. 2, pp. 548–568, Apr. 2021, doi: 10.3390/smartcities4020029.
- [97] S. Srinivasan, S. Kumarasamy, Z. E. Andreadakis, and P. G. Lind, ‘Artificial Intelligence and Mathematical Models of Power Grids Driven by Renewable Energy Sources: A Survey’, *Energies*, vol. 16, no. 14, p. 5383, July 2023, doi: 10.3390/en16145383.
- [98] W. Guo, N. M. F. Qureshi, M. A. Jarwar, J. Kim, and D. R. Shin, ‘AI-oriented Smart Power System Transient Stability: The Rationality, Applications, Challenges and Future Opportunities’, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 102990, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2022.102990.
- [99] A. K. Bashir *et al.*, ‘Comparative analysis of machine learning algorithms for prediction of smart grid stability[†]’, *Int Trans Electr Energ Syst*, vol. 31, no. 9, Sept. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12706.

- [100] Z. Shi *et al.*, ‘Convolutional neural network-based power system transient stability assessment and instability mode prediction’, *Applied Energy*, vol. 263, p. 114586, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114586.
- [101] S. Liu *et al.*, ‘A Data-Driven and Data-Based Framework for Online Voltage Stability Assessment Using Partial Mutual Information and Iterated Random Forest’, *Energies*, vol. 14, no. 3, p. 715, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14030715.
- [102] R. Zahedi, A. Ahmadi, R. Eskandarpanah, and M. Akbari, ‘Evaluation of Resources and Potential Measurement of Wind Energy to Determine the Spatial Priorities for the Construction of Wind-Driven Power Plants in Damghan City’, *13*, vol. 11, no. 1, pp. 1–22, Feb. 2022, doi: 10.18488/13.v11i1.2928.
- [103] N. Moslemi *et al.*, ‘Thermal response analysis and parameter prediction of additively manufactured polymers’, *Applied Thermal Engineering*, vol. 212, p. 118533, July 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118533.
- [104] M. Lei, L. Shiyan, J. Chuanwen, L. Hongling, and Z. Yan, ‘A review on the forecasting of wind speed and generated power’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 4, pp. 915–920, May 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.02.002.
- [105] S. Barja-Martinez, M. Aragüés-Peñalba, Í. Munné-Collado, P. Lloret-Gallego, E. Bullich-Massagué, and R. Villafafila-Robles, ‘Artificial intelligence techniques for enabling Big Data services in distribution networks: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111459, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111459.
- [106] R. Nawaz, R. Akhtar, M. A. Shahid, I. M. Qureshi, and M. H. Mahmood, ‘Machine learning based false data injection in smart grid’, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, p. 106819, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106819.
- [107] S. K. Kauwe, T. D. Rhone, and T. D. Sparks, ‘Data-Driven Studies of Li-Ion-Battery Materials’, *Crystals*, vol. 9, no. 1, p. 54, Jan. 2019, doi: 10.3390/cryst9010054.

- [108] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, 'Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications', *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [109] G. Bedi, G. K. Venayagamoorthy, and R. Singh, 'Navigating the challenges of Internet of Things (IoT) for power and energy systems', in *2016 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, Clemson, SC, USA: IEEE, Mar. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/PSC.2016.7462853.
- [110] M. S. Bakay and Ü. Ağbulut, 'Electricity production based forecasting of greenhouse gas emissions in Turkey with deep learning, support vector machine and artificial neural network algorithms', *Journal of Cleaner Production*, vol. 285, p. 125324, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125324.
- [111] B. Yabana Kiremit and E. Dikmetaş Yardan, 'A comparative study of neuro-fuzzy and neural network models in predicting length of stay in university hospital', *BMC Health Serv Res*, vol. 25, no. 1, p. 446, Mar. 2025, doi: 10.1186/s12913-025-12623-x.
- [112] A. Turki and M. Chtourou, 'A neuro-fuzzy modular system for modeling nonlinear systems', *Journal of Algorithms & Computational Technology*, vol. 18, p. 17483026241232294, Jan. 2024, doi: 10.1177/17483026241232294.
- [113] T. Ahmad and H. Chen, 'A review on machine learning forecasting growth trends and their real-time applications in different energy systems', *Sustainable Cities and Society*, vol. 54, p. 102010, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.102010.
- [114] C. Voyant *et al.*, 'Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review', *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 569–582, May 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.095.
- [115] K. B. Debnath and M. Mourshed, 'Forecasting methods in energy planning models', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 297–325, May 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.002.

- [116] U. Fiore, F. Palmieri, A. Castiglione, and A. De Santis, ‘Network anomaly detection with the restricted Boltzmann machine’, *Neurocomputing*, vol. 122, pp. 13–23, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.neucom.2012.11.050.
- [117] T. Chen, Y. Guo, and S. Hao, ‘Unsupervised feature selection based on joint spectral learning and general sparse regression’, *Neural Comput & Applic*, vol. 32, no. 11, pp. 6581–6589, June 2020, doi: 10.1007/s00521-019-04117-9.
- [118] S. Srinivasan, S. Kumarasamy, Z. E. Andreadakis, and P. G. Lind, ‘Artificial Intelligence and Mathematical Models of Power Grids Driven by Renewable Energy Sources: A Survey’, *Energies*, vol. 16, no. 14, p. 5383, July 2023, doi: 10.3390/en16145383.
- [119] A. Ayub Khan, A. Ali Laghari, M. Rashid, H. Li, A. Rehman Javed, and T. Reddy Gadekallu, ‘Artificial intelligence and blockchain technology for secure smart grid and power distribution Automation: A State-of-the-Art Review’, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103282, June 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103282.
- [120] B. Ibrahim, L. Rabelo, E. Gutierrez-Franco, and N. Clavijo-Buritica, ‘Machine Learning for Short-Term Load Forecasting in Smart Grids’, *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8079, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15218079.
- [121] N. R. Pal, ‘In Search of Trustworthy and Transparent Intelligent Systems With Human-Like Cognitive and Reasoning Capabilities’, *Front. Robot. AI*, vol. 7, p. 76, June 2020, doi: 10.3389/frobt.2020.00076.
- [122] S. S. Arslan, ‘Artificial Human Intelligence: The role of Humans in the Development of Next Generation AI’, Feb. 02, 2025, *arXiv*: arXiv:2409.16001. doi: 10.48550/arXiv.2409.16001.
- [123] J. E. (Hans). Korteling, G. C. Van De Boer-Visschedijk, R. A. M. Blankendaal, R. C. Boonekamp, and A. R. Eikelboom, ‘Human- versus Artificial Intelligence’, *Front. Artif. Intell.*, vol. 4, p. 622364, Mar. 2021, doi: 10.3389/frai.2021.622364.
- [124] G. A. Kravtsov, N. V. Kravtsova, O. V. Khodakovskaya, V. V. Nikitchenko, and A. N. Prymushko, ‘Brain Mathematics and Language. I’, *Elektron. model.*, vol. 43, no. 3, pp. 87–108, June 2021, doi: 10.15407/emodel.43.03.087.

- [125] G. A. Kravtsov, N. V. Kravtsova, O. V. Khodakovskaya, V. V. Nikitchenko, and A. N. Prymushko, ‘Brain Mathematics and Language. II’, *Elektron. model.*, vol. 43, no. 4, pp. 69–88, Aug. 2021, doi: 10.15407/emodel.43.04.069.
- [126] G. A. Kravtsov, V. V. Levitin, V. I. Koshel‘, V. V. Nikitchenko, and A. N. Primushko, ‘Strong Artificial Intelligence: Background Precondition’, *Elektron. model.*, vol. 41, no. 5, pp. 35–58, Oct. 2019, doi: 10.15407/emodel.41.05.035.
- [127] D. T. Speckhard, ‘Graph topology estimation of power grids using pairwise mutual information of time series data’, Aug. 21, 2025, *arXiv*: arXiv:2505.11517. doi: 10.48550/arXiv.2505.11517.
- [128] E. D. Gireesh and V. P. Gurupur, ‘Information Entropy Measures for Evaluation of Reliability of Deep Neural Network Results’, *Entropy*, vol. 25, no. 4, p. 573, Mar. 2023, doi: 10.3390/e25040573.
- [129] Y. Koç, M. Warnier, R. E. Kooij, and F. M. T. Brazier, ‘An entropy-based metric to quantify the robustness of power grids against cascading failures’, *Safety Science*, vol. 59, pp. 126–134, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.ssci.2013.05.006.
- [130] C. E. Shannon, ‘A Mathematical Theory of Communication’, *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, July 1948, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- [131] C. E. Shannon, ‘Communication in the Presence of Noise’, *Proc. IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10–21, Jan. 1949, doi: 10.1109/JRPROC.1949.232969.
- [132] A. De Martino and D. De Martino, ‘An introduction to the maximum entropy approach and its application to inference problems in biology’, *Heliyon*, vol. 4, no. 4, p. e00596, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00596.
- [133] Z. Huang and Q. Cai, ‘On the generic increase of entropy in isolated systems’, May 29, 2025, *arXiv*: arXiv:2505.23041. doi: 10.48550/arXiv.2505.23041.
- [134] W. Hur, ‘Entropy, heterogeneity, and their impact on technology progress’, *Journal of Informetrics*, vol. 18, no. 2, p. 101506, May 2024, doi: 10.1016/j.joi.2024.101506.

- [135] Y. Huang, ‘An overview of the development and applications of information entropy’, *TNS*, vol. 42, no. 1, pp. 180–185, Aug. 2024, doi: 10.54254/2753-8818/42/20240663.
- [136] Robert M. Gray, *Entropy and Information Theory*, Information Systems Laboratory Electrical Engineering Department Stanford University. New York: Springer-Verlag, 2023. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://ee.stanford.edu/~gray/it.pdf>
- [137] T. F. Varley, ‘Information Theory for Complex Systems Scientists’, Jan. 17, 2025, *arXiv*: arXiv:2304.12482. doi: 10.48550/arXiv.2304.12482.
- [138] X. Lian, X. Ning, M. Xie, and F. Yu, ‘Cache Coherence Protocols in Shared-Memory Multiprocessors’, presented at the 2015 International Conference on Computational Science and Engineering, Qingdao, China, 2015. doi: 10.2991/iccse-15.2015.52.
- [139] L. Lamport, R. Shostak, and M. Pease, ‘The Byzantine Generals Problem’, *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 382–401, July 1982, doi: 10.1145/357172.357176.
- [140] M. Castro and B. Liskov, ‘Practical Byzantine Fault Tolerance’, *OSDI*, 1999.
- [141] M. Starke *et al.*, ‘Agent-Based Distributed Energy Resources for Supporting Intelligence at the Grid Edge’, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 69–78, Jan. 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2021.3110737.
- [142] D. D. Sharma, S. N. Singh, and J. Lin, ‘Multi-agent based distributed control of distributed energy storages using load data’, *Journal of Energy Storage*, vol. 5, pp. 134–145, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.est.2015.12.004.
- [143] K. Tazi, F. M. Abbou, and F. Abdi, ‘Multi-agent system for microgrids: design, optimization and performance’, *Artif Intell Rev*, vol. 53, no. 2, pp. 1233–1292, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10462-019-09695-7.
- [144] M. Elgamal, N. Korovkin, A. Elmitwally, and Z. Chen, ‘Robust multi-agent system for efficient online energy management and security enforcement in a grid-connected microgrid with hybrid resources’, *IET Generation Trans & Dist*, vol. 14, no. 9, pp. 1726–1737, May 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1284.

- [145] F. Nejati, A. A. A. Ghani, N. K. Yap, and A. Jaafar, ‘Handling state space explosion in verification of component-based systems: A review’, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77526–77544, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3081742.
- [146] J. F. Groote, T. W. D. M. Kouters, and A. Osaiweran, ‘Specification guidelines to avoid the state space explosion problem: SPECIFICATION GUIDELINES TO AVOID THE STATE SPACE EXPLOSION PROBLEM’, *Softw. Test. Verif. Reliab.*, vol. 25, no. 1, pp. 4–33, Jan. 2015, doi: 10.1002/stvr.1536.
- [147] S. K. Rathor and D. Saxena, ‘Energy management system for smart grid: An overview and key issues’, *Int J Energy Res*, vol. 44, no. 6, pp. 4067–4109, May 2020, doi: 10.1002/er.4883.
- [148] Z. Cheng, L. Yang, Q. Yuan, Y. Long, and H. Ren, ‘Distributed Consensus Estimation for Networked Multi-Sensor Systems under Hybrid Attacks and Missing Measurements’, *Sensors*, vol. 24, no. 13, p. 4071, June 2024, doi: 10.3390/s24134071.
- [149] Y. Li, J. Huang, Y. Lv, and J. Zhou, ‘Distributed State Estimation for Multi-agent Systems Under Consensus Control’, in *Neural Information Processing*, vol. 14447, B. Luo, L. Cheng, Z.-G. Wu, H. Li, and C. Li, Eds, in Lecture Notes in Computer Science, vol. 14447. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 214–225. doi: 10.1007/978-981-99-8079-6_17.
- [150] J. Huang, Y. Li, and Y. Lv, ‘Integrated Design of Fully Distributed Adaptive State Estimation and Consensus Control for Multi-agent Systems’, in *Neural Information Processing*, vol. 14447, B. Luo, L. Cheng, Z.-G. Wu, H. Li, and C. Li, Eds, in Lecture Notes in Computer Science, vol. 14447. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 226–237. doi: 10.1007/978-981-99-8079-6_18.
- [151] Z. Chen, ‘Optimal Power Flow in Renewable-Integrated Power Systems: A Comprehensive Review’, Aug. 09, 2024, *arXiv*: arXiv:2408.05254. doi: 10.48550/arXiv.2408.05254.
- [152] C. Zhang, J. Jiang, C. Cai, H. Yu, D. Yang, and Z. Li, ‘Optimal economic dispatching strategy for power systems considering distributed controllable load

- clusters', *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1364395, Feb. 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1364395.
- [153] T. Aziz, Z. Lin, M. Waseem, and S. Liu, 'Review on optimization methodologies in transmission network reconfiguration of power systems for grid resilience', *Int Trans Electr Energ Syst*, vol. 31, no. 3, Mar. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12704.
- [154] M. Z. Islam, Y. Lin, V. M. Vokkarane, and V. Venkataramanan, 'Cyber-physical cascading failure and resilience of power grid: A comprehensive review', *Front. Energy Res.*, vol. 11, p. 1095303, Feb. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1095303.
- [155] D. Abraham, Ø. Toftegaard, B. B. J. D. R., A. Gebremedhin, and S. Yildirim Yayilgan, 'Consequence simulation of cyber attacks on key smart grid business cases', *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1395954, July 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1395954.
- [156] B. Xie, X. Tian, L. Kong, and W. Chen, 'The Vulnerability of the Power Grid Structure: A System Analysis Based on Complex Network Theory', *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 7097, Oct. 2021, doi: 10.3390/s21217097.
- [157] H. Li, 'Does Feedback Control Always Reduce Entropy/Communication Requirement in Smart Grid?', in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore: IEEE, Dec. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254459.
- [158] D. Marelli, B. Ninness, and M. Fu, 'Distributed Weighted Least-Squares Estimation for Power Networks', *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 28, pp. 562–567, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.12.188.
- [159] C. Muscas, P. A. Pegoraro, S. Sulis, M. Pau, F. Ponci, and A. Monti, 'Fast multi-area approach for distribution system state estimation', in *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Taipei, Taiwan: IEEE, May 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/I2MTC.2016.7520463.
- [160] S. Mohsen, M. Bajaj, H. Kotb, M. Pushkarna, S. Alphonse, and S. S. M. Ghoneim, 'Efficient Artificial Neural Network for Smart Grid Stability

- Prediction’, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2023, pp. 1–13, May 2023, doi: 10.1155/2023/9974409.
- [161] B. Angel and M. Duraisamy, ‘Dynamic State Estimation of Electric Power Systems Using Kalman Filtering Techniques’, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2335, no. 1, p. 012053, Sept. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2335/1/012053.
- [162] A. Prymushko, I. Puchko, M. Yaroshynskyi, D. Sinko, H. Kravtsov, and V. Artemchuk, ‘Efficient State Synchronization in Distributed Electrical Grid Systems Using Conflict-Free Replicated Data Types’, *IoT*, vol. 6, no. 1, p. 6, Jan. 2025, doi: 10.3390/iot6010006.
- [163] J. Zheng, R. Chen, Z. Zhang, X. Wei, and J. Xue, ‘Analysis and comprehensive assessment method of power quality in advanced distribution networks based on complex network theory’, *Front. Energy Res.*, vol. 12, p. 1501006, Dec. 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1501006.
- [164] I. Roychoudhury, M. Daigle, G. Biswas, X. Koutsoukos, A. Patterson-Hine, and S. Poll, ‘Comprehensive Diagnosis of Complex Electrical Power Distribution Systems’, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, no. 8, pp. 722–727, 2009, doi: 10.3182/20090630-4-ES-2003.00120.
- [165] Z. Hu *et al.*, ‘Low-Observability Distribution System State Estimation by Graph Computing with Enhanced Numerical Stability’, *Eng*, vol. 6, no. 7, p. 134, June 2025, doi: 10.3390/eng6070134.
- [166] A. Sajadi, J. A. Rañola, R. W. Kenyon, B.-M. Hodge, and B. Mather, ‘Dynamics and Stability of Power Systems With High Shares of Grid-Following Inverter-Based Resources: A Tutorial’, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 29591–29613, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3260778.
- [167] M. Ebeed and S. H. E. A. Aleem, ‘Overview of uncertainties in modern power systems: uncertainty models and methods’, in *Uncertainties in Modern Power Systems*, Elsevier, 2021, pp. 1–34. doi: 10.1016/B978-0-12-820491-7.00001-3.
- [168] J. M. Moloney, S. J. Williamson, and C. L. Hall, ‘Optimisation of Power Grid Stability Under Uncertainty’, Jan. 26, 2023, *arXiv*: arXiv:2301.11215. doi: 10.48550/arXiv.2301.11215.

- [169] P. Tripathi, J. Rahul, and N. A. Radhamohan, ‘Considering weighted least square techniques on power system state estimation’, in *2015 International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE)*, Greater Noida, India: IEEE, Mar. 2015, pp. 1–5. doi: 10.1109/EnergyEconomics.2015.7235115.
- [170] D. Marelli, B. Ninness, and M. Fu, ‘Distributed Weighted Least-Squares Estimation for Power Networks’, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 28, pp. 562–567, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.12.188.
- [171] E. Caro, R. Mínguez, and A. J. Conejo, ‘Robust WLS estimator using reweighting techniques for electric energy systems’, *Electric Power Systems Research*, vol. 104, pp. 9–17, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2013.05.021.
- [172] M. S. Chetan Sheth, ‘Power System State Estimation using Weighted Least Square Method’, *cienc.eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 1721–1727, Feb. 2023, doi: 10.52783/cienceng.v11i1.327.
- [173] ‘Measurement Challenges identified in the Strategic Research Agenda (SRA)’, EURAMET. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.euramet.org/european-metrology-networks/old-smart-electricity-grids/measurement-challenges-in-the-sra>
- [174] Z. Pan, L. Che, and C. Tu, ‘Pseudo-measurement-based state estimation for railway power supply systems with renewable energy resources’, *IET Generation Trans & Dist*, vol. 18, no. 4, pp. 871–880, Feb. 2024, doi: 10.1049/gtd2.13120.
- [175] T. Zufferey and G. Hug, ‘Impact of data availability and pseudo-measurement synthesis on distribution system state estimation’, *IET Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 29–44, Feb. 2021, doi: 10.1049/stg2.12004.
- [176] F. G. Yem Souhe, A. T. Boum, P. Ele, C. F. Mbey, and V. J. Foba Kakeu, ‘A Novel Smart Method for State Estimation in a Smart Grid Using Smart Meter Data’, *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, vol. 2022, pp. 1–14, May 2022, doi: 10.1155/2022/7978263.

- [177] M. Gillioz, G. Dubuis, and P. Jacquod, ‘A large synthetic dataset for machine learning applications in power transmission grids’, *Sci Data*, vol. 12, no. 1, p. 168, Jan. 2025, doi: 10.1038/s41597-025-04479-x.
- [178] E. M. Lourenço and J. Bosco Augusto London Junior, Eds, *Power Distribution System State Estimation*. Institution of Engineering and Technology, 2022. doi: 10.1049/PBPO183E.
- [179] M. Hamdi, S. Kamoun, L. Idoumghar, M. Chaoui, and A. Kachouri, ‘Distributed joint parameter and state estimation algorithm for large-scale interconnected systems’, *Adaptive Control & Signal*, vol. 38, no. 4, pp. 1403–1419, Apr. 2024, doi: 10.1002/acs.3756.
- [180] X. Du, A. Engelmann, Y. Jiang, T. Faulwasser, and B. Houska, ‘Distributed State Estimation for AC Power Systems using Gauss-Newton ALADIN’, Mar. 21, 2019, *arXiv*: arXiv:1903.08956. doi: 10.48550/arXiv.1903.08956.
- [181] E. Talebi Ghadikolaei, A. Kazemi, and H. A. Shayanfar, ‘MULTI-AREA state estimation in a distribution network using TAKAGI-SUGENO model estimated by Kalman filter’, *Int Trans Electr Energ Syst*, vol. 30, no. 8, Aug. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12466.
- [182] M. Pau, F. Ponci, A. Monti, S. Sulis, C. Muscas, and P. A. Pegoraro, ‘An Efficient and Accurate Solution for Distribution System State Estimation with Multiarea Architecture’, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 5, pp. 910–919, May 2017, doi: 10.1109/TIM.2016.2642598.
- [183] M. J. Hossain and M. Naeini, ‘Multi-Area Distributed State Estimation in Smart Grids Using Data-Driven Kalman Filters’, *Energies*, vol. 15, no. 19, p. 7105, Sept. 2022, doi: 10.3390/en15197105.
- [184] R. Blankinship, A. R. Hevner, and S. Bing Yao, ‘An iterative method for distributed database optimization’, *Data & Knowledge Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 1–30, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0169-023X(96)00023-7.
- [185] G. E. Gévy, J. Soto, and V. Markl, ‘Handling Iterations in Distributed Dataflow Systems’, *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 9, pp. 1–38, Dec. 2022, doi: 10.1145/3477602.

- [186] S. Alemzadeh, S. Talebi, and M. Mesbahi, ‘Data-Driven Structured Policy Iteration for Homogeneous Distributed Systems’, Nov. 16, 2023, *arXiv*: arXiv:2103.11572. doi: 10.48550/arXiv.2103.11572.
- [187] H. Zhai and Y. Zhang, ‘A recursive weighted least squares optimization algorithm based on RSS in wireless sensor networks’, *Internet Technology Letters*, vol. 4, no. 6, p. e313, Nov. 2021, doi: 10.1002/itl2.313.
- [188] Z. Li and Z. Duan, ‘Distributed consensus protocol design for general linear multi-agent systems: a consensus region approach’, *IET Control Theory & Appl*, vol. 8, no. 18, pp. 2145–2161, Dec. 2014, doi: 10.1049/iet-cta.2014.0012.
- [189] S. Liu, Z. Li, W. Zhang, and Y. Liang, ‘Distributed Weighted Least Squares Estimator Based on ADMM’, Mar. 29, 2021, *arXiv*: arXiv:2011.02827. doi: 10.48550/arXiv.2011.02827.
- [190] K. Antoniadis *et al.*, ‘Leaderless consensus’, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 176, pp. 95–113, June 2023, doi: 10.1016/j.jpdc.2023.01.009.
- [191] L. Liu *et al.*, ‘Distributed State Estimation for Dynamic Positioning Systems with Uncertain Disturbances and Transmission Time Delays’, *Complexity*, vol. 2020, pp. 1–15, July 2020, doi: 10.1155/2020/7698504.
- [192] R. Yu, Z. Yuan, M. Zhu, and Z. Zhou, ‘Data-driven Distributed State Estimation and Behavior Modeling in Sensor Networks’, in *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, Oct. 2020, pp. 8192–8199. doi: 10.1109/IROS45743.2020.9340838.
- [193] M. Hamdi, S. Kamoun, L. Idoumghar, M. Chaoui, and A. Kachouri, ‘Distributed joint parameter and state estimation algorithm for large-scale interconnected systems’, *Adaptive Control & Signal*, vol. 38, no. 4, pp. 1403–1419, Apr. 2024, doi: 10.1002/acs.3756.
- [194] R. Yu, Z. Yuan, M. Zhu, and Z. Zhou, ‘Data-Driven Distributed State Estimation and Behavior Modeling in Sensor Networks’, Sept. 24, 2020, *arXiv*: arXiv:2009.10827. doi: 10.48550/arXiv.2009.10827.

- [195] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, ‘New extension of the Kalman filter to nonlinear systems’, presented at the AeroSense ’97, I. Kadar, Ed., Orlando, FL, USA, July 1997, p. 182. doi: 10.1117/12.280797.
- [196] A. Bernard and A. Alwan, ‘Source and channel coding for remote speech recognition over error-prone channels’, in *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221)*, Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2001, pp. 2613–2616. doi: 10.1109/ICASSP.2001.940537.
- [197] N. Bhusal and M. Gautam, ‘Power System Dynamic State Estimation Using Extended and Unscented Kalman Filters’, Dec. 11, 2020, *arXiv*: arXiv:2012.06069. doi: 10.48550/arXiv.2012.06069.
- [198] G. O. Kravtsov, A. N. Prymushko, and V. I. Koshell, ‘Koshell Combined Autoregressive-Neural Network Method for Predicting Time Series’, *Elektron. model.*, vol. 42, no. 4, pp. 3–14, Aug. 2020, doi: 10.15407/emodel.42.04.003.
- [199] L. Zhang, G. Wang, and G. B. Giannakis, ‘Real-time Power System State Estimation and Forecasting via Deep Neural Networks’, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 67, no. 15, pp. 4069–4077, Aug. 2019, doi: 10.1109/TSP.2019.2926023.
- [200] D. Mukherjee, S. Chakraborty, S. Ghosh, and R. K. Mishra, ‘Application of deep learning for power system state forecasting’, *Int Trans Electr Energ Syst*, vol. 31, no. 9, Sept. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12901.
- [201] S. Mohsen, M. Bajaj, H. Kotb, M. Pushkarna, S. Alphonse, and S. S. M. Ghoneim, ‘Efficient Artificial Neural Network for Smart Grid Stability Prediction’, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 2023, pp. 1–13, May 2023, doi: 10.1155/2023/9974409.
- [202] J. Comden, M. Colombino, A. Bernstein, and Z. Liu, ‘Sample Complexity of Power System State Estimation using Matrix Completion’, Sept. 18, 2019, *arXiv*: arXiv:1905.01789. doi: 10.48550/arXiv.1905.01789.

- [203] P. L. Donti, Y. Liu, A. J. Schmitt, A. Bernstein, R. Yang, and Y. Zhang, ‘Matrix Completion for Low-Observability Voltage Estimation’, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2520–2530, May 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2956906.
- [204] B. Rout, S. Dahale, and B. Natarajan, ‘Dynamic Matrix Completion Based State Estimation in Distribution Grids’, *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 18, no. 11, pp. 7504–7511, Nov. 2022, doi: 10.1109/TII.2022.3162210.
- [205] X.-B. Jin, R. J. Robert Jeremiah, T.-L. Su, Y.-T. Bai, and J.-L. Kong, ‘The New Trend of State Estimation: From Model-Driven to Hybrid-Driven Methods’, *Sensors*, vol. 21, no. 6, p. 2085, Mar. 2021, doi: 10.3390/s21062085.
- [206] A. Pandey, ‘Parameter Robustness in Data-Driven Estimation of Dynamical Systems’, Sept. 08, 2025, *arXiv*: arXiv:2509.06534. doi: 10.48550/arXiv.2509.06534.
- [207] Y. Liu, P. Ning, and M. K. Reiter, ‘False data injection attacks against state estimation in electric power grids’, *ACM Trans. Inf. Syst. Secur.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–33, May 2011, doi: 10.1145/1952982.1952995.
- [208] A. Anwar and A. N. Mahmood, ‘Vulnerabilities of Smart Grid State Estimation against False Data Injection Attack’, Nov. 11, 2014, *arXiv*: arXiv:1411.2671. doi: 10.48550/arXiv.1411.2671.
- [209] T. P. Bagchi, ‘Models for software defects and testing strategies’, *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 34, no. 2, pp. 1–4, Feb. 2009, doi: 10.1145/1507195.1507202.
- [210] V. D’Silva, D. Kroening, and G. Weissenbacher, ‘A Survey of Automated Techniques for Formal Software Verification’, *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 27, no. 7, pp. 1165–1178, July 2008, doi: 10.1109/TCAD.2008.923410.
- [211] A. Reid, L. Church, S. Flur, S. de Haas, M. Johnson, and B. Laurie, ‘Towards making formal methods normal: meeting developers where they are’, Oct. 30, 2020, *arXiv*: arXiv:2010.16345. doi: 10.48550/arXiv.2010.16345.

- [212] I. Grobelna and P. Szczesniak, ‘Model Checking Autonomous Components within Electric Power Systems Specified by Interpreted Petri Nets’, *Sensors*, vol. 22, no. 18, p. 6936, Sept. 2022, doi: 10.3390/s22186936.
- [213] V. V. Shkarupylo, I. V. Blinov, A. A. Chemeris, V. V. Dusheba, and J. A. J. Alsayaydeh, ‘On Applicability of Model Checking Technique in Power Systems and Electric Power Industry’, in *Systems, Decision and Control in Energy III*, vol. 399, A. Zaporozhets, Ed., in Studies in Systems, Decision and Control, vol. 399. , Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 3–21. doi: 10.1007/978-3-030-87675-3_1.
- [214] E. Yuksel, H. Zhu, H. R. Nielson, H. Huang, and F. Nielson, ‘Modelling and Analysis of Smart Grid: A Stochastic Model Checking Case Study’, in *2012 Sixth International Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering*, Beijing, China: IEEE, July 2012, pp. 25–32. doi: 10.1109/TASE.2012.44.
- [215] S. Li, W. Yang, J. Lu, N. Tang, and S. Zhang, ‘State Estimation in Smart Grids Using Spatio-Temporal Graph Convolutional Networks’, in *2024 IEEE PES 16th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Nanjing, China: IEEE, Oct. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/APPEEC61255.2024.10922653.
- [216] J. I. Requeno, ‘Detection of Smart Grid Integrity Attacks Using Signal Temporal Logic’, 2022, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2209.06722.
- [217] C. Lv, W. Sheng, K. Liu, X. Dong, and P. Deng, ‘Multi-status modelling and event simulation in smart distribution network based on finite state machine’, *IET Generation Trans & Dist*, vol. 13, no. 13, pp. 2846–2855, July 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.7034.
- [218] J. Zhao, Y.-L. Chen, Z. Chen, F. Lin, C. Wang, and H. Zhang, ‘Modeling and control of discrete event systems using finite state machines with variables and their applications in power grids’, *Systems & Control Letters*, vol. 61, no. 1, pp. 212–222, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.sysconle.2011.10.010.
- [219] M. MacGregor and K. Stacey, ‘Cognitive models underlying algebraic and non-algebraic solutions to unequal partition problems’, *Math Ed Res J*, vol. 10, no. 2, pp. 46–60, Sept. 1998, doi: 10.1007/BF03217342.

- [220] H. O. Kravtsov, S. M. Hrechko, V. V. Nikitchenko, and A. M. Prymushko, ‘Cognitive Algebraic System’, *Elektron. model.*, vol. 44, no. 3, pp. 14–30, June 2022, doi: 10.15407/emodel.44.03.014.
- [221] N. H. Anderson, ‘Cognitive Algebra: Integration Theory Applied to Social Attribution’, in *Advances in Experimental Social Psychology*, vol. 7, Elsevier, 1974, pp. 1–101. doi: 10.1016/S0065-2601(08)60035-0.
- [222] N. H. Anderson, *A Functional Theory of Cognition*, 0 edn. Psychology Press, 2014. doi: 10.4324/9781315805924.
- [223] H. Howard and R. Mortier, ‘Paxos vs Raft: have we reached consensus on distributed consensus?’, in *Proceedings of the 7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*, Heraklion Greece: ACM, Apr. 2020, pp. 1–9. doi: 10.1145/3380787.3393681.
- [224] H. Meling and L. Jehl, ‘Tutorial Summary: Paxos Explained from Scratch’, in *Principles of Distributed Systems*, vol. 8304, R. Baldoni, N. Nisse, and M. Van Steen, Eds, in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8304. , Cham: Springer International Publishing, 2013, pp. 1–10. doi: 10.1007/978-3-319-03850-6_1.
- [225] M. Stübs, ‘Hierarchical Distributed Consensus for Smart Grids’, 2020, doi: 10.18420/SICHERHEIT2020_15.
- [226] A. Prymushko, M. Yaroshynskyi, and I. Puchko, ‘Representation and synchronization of states of distributed electrical grid systems based on conflict free replicated data types’, in *2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece: IEEE, Oct. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/DESSERT65323.2024.11122143.
- [227] R. Mogk, J. Drechsler, G. Salvaneschi, and M. Mezini, ‘A fault-tolerant programming model for distributed interactive applications’, *Proc. ACM Program. Lang.*, vol. 3, no. OOPSLA, pp. 1–29, Oct. 2019, doi: 10.1145/3360570.
- [228] X. Lv, F. He, Y. Cheng, and Y. Wu, ‘A novel CRDT-based synchronization method for real-time collaborative CAD systems’, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 38, pp. 381–391, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.08.008.

- [229] M. Shapiro, P. Preguiça, C. Baquero, and M. Zawirski, ‘Conflict-free Replicated Data Types’, INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE, INRIA & LIP6, Paris, France, Research N° 7687 — version 2. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://pages.lip6.fr/Marc.Shapiro/papers/RR-7687.pdf>
- [230] ‘Perspectives in Semantic Interoperability’., in *Proceedings of the International Workshop on Semantic Interoperability*, Rome, Italy: SciTePress - Science and Technology Publications, 2011, pp. 13–22. doi: 10.5220/0003346700130022.
- [231] F. Villa, S. Balbi, I. N. Athanasiadis, and C. Caracciolo, ‘Semantics for interoperability of distributed data and models: Foundations for better-connected information’, *F1000Res*, vol. 6, p. 686, May 2017, doi: 10.12688/f1000research.11638.1.
- [232] ‘Common Information Model (CIM) for Energy Markets’. ENTSO-E. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/digital/common-information-model/cim-for-energy-markets/#the-iec-62325-series-of-standards>
- [233] ‘Technical committees and subcommittees’. IEC. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.iec.ch/technical-committees-and-subcommittees>
- [234] M. Ayello and Y. Lopes, ‘Interoperability based on IEC 61850 standard: Systematic literature review, certification method proposal, and case study’, *Electric Power Systems Research*, vol. 220, p. 109355, July 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109355.
- [235] T. Bhattacharjee, M. Jamil, M. A. Alotaibi, H. Malik, and M. E. Nassar, ‘Hardware Development and Interoperability Testing of a Multivendor-IEC-61850-Based Digital Substation’, *Energies*, vol. 15, no. 5, p. 1785, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15051785.
- [236] Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa and N. N. Shangase, ‘Interoperability Challenges in Multivendor IEC 61850 Devices for

- Parallel Power Transformer Differential Protection’, *IJEETC*, vol. 13, no. 1, pp. 45–57, 2024, doi: 10.18178/ijeetc.13.1.45-57.
- [237] J. Zhang, H. Li, Y. Zhao, and G. Ren, ‘An ontology-based approach supporting holistic structural design with the consideration of safety, environmental impact and cost’, *Advances in Engineering Software*, vol. 115, pp. 26–39, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.08.010.
- [238] I. Osman, S. F. Pileggi, S. Ben Yahia, and G. Diallo, ‘An Alignment-Based Implementation of a Holistic Ontology Integration Method’, *MethodsX*, vol. 8, p. 101460, 2021, doi: 10.1016/j.mex.2021.101460.
- [239] S. Gilbert and N. Lynch, ‘Brewer’s conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services’, *SIGACT News*, vol. 33, no. 2, pp. 51–59, June 2002, doi: 10.1145/564585.564601.
- [240] W. Vogels, ‘Eventually consistent’, *Commun. ACM*, vol. 52, no. 1, pp. 40–44, Jan. 2009, doi: 10.1145/1435417.1435432.
- [241] ‘Brewer, Eric A. “Towards robust distributed systems.” PODC. Vol. 7. No. 10.1145. 2000.’,
- [242] Q. Salem and K. Alzaaree, ‘Detailed analysis of grid connected and islanded operation modes based on P/U and Q/f droop characteristics’, *IJPEDS*, vol. 12, no. 2, p. 772, June 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i2.pp772-782.
- [243] E. Brewer, ‘CAP Twelve Years Later: How the “Rules” Have Changed’. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.infoq.com/articles/cap-twelve-years-later-how-the-rules-have-changed/>
- [244] N. Milošević, D. Cason, Z. Milošević, and F. Pedone, ‘How Robust Are Synchronous Consensus Protocols?’, *LIPICs, Volume 324, OPODIS 2024*, vol. 324, p. 20:1-20:25, 2025, doi: 10.4230/LIPICS.OPODIS.2024.20.
- [245] Z. Ji, X. Zhang, J. Hu, Y. Lu, and J. Liu, ‘A Review of Asynchronous Byzantine Consensus Protocols’, *Sensors*, vol. 24, no. 24, p. 7927, Dec. 2024, doi: 10.3390/s24247927.

- [246] J. Johnson, ‘CAP Theorem Explained: Consistency, Availability & Partition Tolerance’, bmc. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.bmc.com/blogs/cap-theorem/>
- [247] ‘Balancing Strong and Eventual Consistency with Datastore’. Google Cloud, Sept. 04, 2025. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/datastore/docs/articles/balancing-strong-and-eventual-consistency-with-google-cloud-datastore>
- [248] T. Haerder and A. Reuter, ‘Principles of transaction-oriented database recovery’, *ACM Comput. Surv.*, vol. 15, no. 4, pp. 287–317, Dec. 1983, doi: 10.1145/289.291.
- [249] M. Kleppmann, ‘A Critique of the CAP Theorem’, Apollo - University of Cambridge Repository, Sept. 2015. doi: 10.17863/CAM.13083.
- [250] M. Kleppmann, *Please stop calling databases CP or AP*, May 11, 2015. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://martin.kleppmann.com/2015/05/11/please-stop-calling-databases-cp-or-ap.html>
- [251] Ashwin Chavan, ‘Eventual consistency vs. strong consistency: Making the right choice in microservices’, *Int. J. Sci. Res. Arch.*, vol. 1, no. 2, pp. 071–096, Feb. 2021, doi: 10.30574/ijrsra.2021.1.2.0036.
- [252] C. S. Wright, ‘Resolving CAP Through Automata-Theoretic Economic Design: A Unified Mathematical Framework for Real-Time Partition-Tolerant Systems’, July 03, 2025, *arXiv*: arXiv:2507.02464. doi: 10.48550/arXiv.2507.02464.
- [253] K. Birman, D. Freedman, Q. Huang, and P. Dowell, ‘Overcoming CAP with Consistent Soft-State Replication’. Dept. of Computer Science; Cornell University, Ithaca NY 14850. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.cs.cornell.edu/projects/mrc/IEEE-CAP.16.pdf>
- [254] H. Zhang, G. Jiang, and D. Quan, ‘A Theory of Formalisms for Representing Knowledge’, Dec. 29, 2024, *arXiv*: arXiv:2412.11855. doi: 10.48550/arXiv.2412.11855.

- [255] W. S. Saba, ‘Ontology and Formal Semantics - Integration Overdue’, Dec. 13, 2007, *arXiv*: arXiv:0712.1529. doi: 10.48550/arXiv.0712.1529.
- [256] M. V. Ferrer and S. Hernández, ‘The weak compactification of locally compact groups’, Mar. 24, 2021, *arXiv*: arXiv:2102.12207. doi: 10.48550/arXiv.2102.12207.
- [257] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsayah, J. Zhu, and J. M. Guerrero, ‘Microgrids: A review, outstanding issues and future trends’, *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, p. 101127, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.esr.2023.101127.
- [258] M. Y. Worku, M. A. Hassan, L. S. Maraaba, and M. A. Abido, ‘Islanding Detection Methods for Microgrids: A Comprehensive Review’, *Mathematics*, vol. 9, no. 24, p. 3174, Dec. 2021, doi: 10.3390/math9243174.
- [259] A. Djoudi, S. Bacha, A. Rennane, S. Bellarbi, and A. Hadj Arab, ‘Brief Review of Current Research on Electrical Grids’, *J. Ren. Energies*, vol. 27, no. 2, Dec. 2024, doi: 10.54966/jreen.v27i2.1324.
- [260] B. K. Dora *et al.*, ‘The Global Electricity Grid: A Comprehensive Review’, *Energies*, vol. 18, no. 5, p. 1152, Feb. 2025, doi: 10.3390/en18051152.
- [261] W. P. Stevens, G. J. Myers, and L. L. Constantine, ‘Structured design’, *IBM Syst. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 115–139, 1974, doi: 10.1147/sj.132.0115.
- [262] P. Hines, S. Blumsack, E. C. Sanchez, and C. Barrows, ‘The Topological and Electrical Structure of Power Grids’, in *2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, Honolulu, Hawaii, USA: IEEE, 2010, pp. 1–10. doi: 10.1109/HICSS.2010.398.
- [263] A. M. Prymushko, T. V. Puchko, M. S. Yaroshynskyi, and D. P. Sinko, ‘Software Design of a Distributed High-Load Power Grid System Based on the Actor Model with the Use of Smart Contracts’, *Elektron. model.*, vol. 46, no. 3, pp. 57–72, June 2024, doi: 10.15407/emodel.46.03.057.
- [264] S. Chen, B. Ma, and K. Zhang, ‘On the similarity metric and the distance metric’, *Theoretical Computer Science*, vol. 410, no. 24–25, pp. 2365–2376, May 2009, doi: 10.1016/j.tcs.2009.02.023.

- [265] D. S. Dummit and R. M. Foote, *Abstract algebra*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2004.
- [266] P. M. Cohn, *Universal Algebra*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1981. doi: 10.1007/978-94-009-8399-1.
- [267] S. Mac Lane, *Categories for the Working Mathematician*, vol. 5. in Graduate Texts in Mathematics, vol. 5. New York, NY: Springer New York, 1978. doi: 10.1007/978-1-4757-4721-8.
- [268] S. V. Sam and A. Snowden, ‘The representation theory of Brauer categories II: Curried algebra’, *J. Comb. Algebra*, Aug. 2024, doi: 10.4171/jca/96.
- [269] T. Wyller, *What Is Time? An Enquiry*. London: Reaktion Books, Limited, 2020.
- [270] O. Haponenko, ‘Cognitive Modeling And Features Of Its Application During The Time Of Military Conflict’, June 2018, doi: 10.5281/ZENODO.1297159.
- [271] L. Chernova and L. Chernova, ‘COGNITIVE MODELING OF KNOWLEDGE MANAGEMENT MECHANISMS IN THE TRAINING OF SPECIALISTS’, *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, vol. 0, no. 4 (14), pp. 86–93, Dec. 2020, doi: 10.30837/ITSSI.2020.14.086.
- [272] V. Starko, ‘A Category With Multiple Centers: The Case of the Ukrainian Verbal Prefix Za-’, *eejpl*, vol. 9, no. 1, June 2022, doi: 10.29038/eejpl.2022.9.1.sta.
- [273] V. B. F. Gomes, M. Kleppmann, D. P. Mulligan, and A. R. Beresford, ‘Verifying strong eventual consistency in distributed systems’, *Proc. ACM Program. Lang.*, vol. 1, no. OOPSLA, pp. 1–28, Oct. 2017, doi: 10.1145/3133933.
- [274] N. Preguiça, ‘Conflict-free Replicated Data Types: An Overview’, June 27, 2018, *arXiv*: arXiv:1806.10254. doi: 10.48550/arXiv.1806.10254.
- [275] Y. Saito and M. Shapiro, ‘Optimistic replication’, *ACM Comput. Surv.*, vol. 37, no. 1, pp. 42–81, Mar. 2005, doi: 10.1145/1057977.1057980.
- [276] X. Lv, F. He, Y. Cheng, and Y. Wu, ‘A novel CRDT-based synchronization method for real-time collaborative CAD systems’, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 38, pp. 381–391, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.08.008.

- [277] X. Zhao and P. Haller, ‘Replicated data types that unify eventual consistency and observable atomic consistency’, *Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming*, vol. 114, p. 100561, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jlamp.2020.100561.
- [278] A. Barreto, H. Paulino, J. A. Silva, and N. Preguiça, ‘PS-CRDTs: CRDTs in highly volatile environments’, *Future Generation Computer Systems*, vol. 141, pp. 755–767, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.future.2022.12.013.
- [279] J. Galeas, A. Tudela, Ó. Pons, J. P. Bandera, A. Bandera, and P. Bustos, ‘CRDT-based knowledge synchronisation in an Internet of Robotics Things ecosystem for Ambient Assisted Living’, *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 259, p. 104437, Sept. 2025, doi: 10.1016/j.cviu.2025.104437.
- [280] P. Nasirifard, R. Mayer, and H.-A. Jacobsen, ‘OrderlessChain: a CRDT-enabled blockchain without total global order of transactions: poster abstract’, in *Proceedings of the 23rd International Middleware Conference Demos and Posters*, Quebec Quebec City Canada: ACM, Nov. 2022, pp. 5–6. doi: 10.1145/3565386.3565486.
- [281] L. E. Ward, ‘Completeness in Semi-Lattices’, *Can. j. math.*, vol. 9, pp. 578–582, 1957, doi: 10.4153/CJM-1957-065-3.
- [282] J. D. Lawson, ‘Idempotent analysis and continuous semilattices’, *Theoretical Computer Science*, vol. 316, no. 1–3, pp. 75–87, May 2004, doi: 10.1016/j.tcs.2004.01.024.
- [283] P. S. Almeida, A. Shoker, and C. Baquero, ‘Delta State Replicated Data Types’, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 111, pp. 162–173, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jpdc.2017.08.003.
- [284] M. Shapiro, N. Preguiça, C. Baquero, and M. Zawirski, ‘A comprehensive study of Convergent and Commutative Replicated Data Types’, Jan. 2011.
- [285] G. Zakhour, P. Weisenburger, and G. Salvaneschi, ‘Type-Checking CRDT Convergence’, *Proc. ACM Program. Lang.*, vol. 7, no. PLDI, pp. 1365–1388, June 2023, doi: 10.1145/3591276.
- [286] P. S. Almeida, ‘Approaches to Conflict-free Replicated Data Types’, *ACM Comput. Surv.*, vol. 57, no. 2, pp. 1–36, Feb. 2025, doi: 10.1145/3695249.

- [287] E. Lavoie, ‘GOC-Ledger: State-based Conflict-Free Replicated Ledger from Grow-Only Counters’, 2023, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2305.16976.
- [288] C. Tschudin, ‘A connectionless grow-only set CRDT’, in *Proceedings of the 3rd International Workshop on Distributed Infrastructure for the Common Good*, Quebec Quebec City Canada: ACM, Nov. 2022, pp. 25–30. doi: 10.1145/3565383.3566110.
- [289] S. Burckhardt, A. Gotsman, H. Yang, and M. Zawirski, ‘Replicated data types: specification, verification, optimality’, *SIGPLAN Not.*, vol. 49, no. 1, pp. 271–284, Jan. 2014, doi: 10.1145/2578855.2535848.
- [290] M. Zawirski, C. Baquero, A. Bieniusa, N. Preguiça, and M. Shapiro, ‘Eventually Consistent Register Revisited’, Nov. 16, 2015, *arXiv*: arXiv:1511.05010. doi: 10.48550/arXiv.1511.05010.
- [291] B. Nédelec, P. Molli, A. Mostefaoui, and E. Desmontils, ‘LSEQ: an adaptive structure for sequences in distributed collaborative editing’, in *Proceedings of the 2013 ACM symposium on Document engineering*, Florence Italy: ACM, Sept. 2013, pp. 37–46. doi: 10.1145/2494266.2494278.
- [292] M. Kleppmann and A. R. Beresford, ‘A Conflict-Free Replicated JSON Datatype’. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://members.loria.fr/CIgnat/files/replication/CRDT-JSON.pdf>
- [293] E. Borth, P. Lersch, and A. Bieniusa, ‘Directed Acyclic Graph CRDTs’, in *Proceedings of the 12th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*, World Trade Center Rotterdam Netherlands: ACM, Mar. 2025, pp. 30–37. doi: 10.1145/3721473.3722141.
- [294] M. Kleppmann, ‘Making CRDTs Byzantine fault tolerant’, in *Proceedings of the 9th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data*, Rennes France: ACM, Apr. 2022, pp. 8–15. doi: 10.1145/3517209.3524042.
- [295] M. Barbosa, B. Ferreira, J. Marques, B. Portela, and N. Preguiça, ‘Secure Conflict-free Replicated Data Types’, in *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing and Networking*, Nara Japan: ACM, Jan. 2021, pp. 6–15. doi: 10.1145/3427796.3427831.

- [296] Y. Mao, G. Zhang, Z. Liu, P. Nasirifard, S. Tijanic, and H.-A. Jacobsen, ‘Making CRDTs Not So Eventual’, *Proc. VLDB Endow.*, vol. 18, no. 2, pp. 349–362, Oct. 2024, doi: 10.14778/3705829.3705850.
- [297] C. Baquero, P. S. Almeida, and A. Shoker, ‘Pure Operation-Based Replicated Data Types’, Oct. 12, 2017, *arXiv*: arXiv:1710.04469. doi: 10.48550/arXiv.1710.04469.
- [298] L. Lamport, R. Shostak, and M. Pease, ‘The Byzantine Generals Problem’, *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 382–401, July 1982, doi: 10.1145/357172.357176.
- [299] C. G. Cassandras and S. Lafortune, Eds, ‘Markov Chains’, in *Introduction to Discrete Event Systems*, Boston, MA: Springer US, 2008, pp. 369–428. doi: 10.1007/978-0-387-68612-7_7.
- [300] O. Sirotkin, A. Prymushko, I. Puchko, H. Kravtsov, M. Yaroshynskyi, and V. Artemchuk, ‘Parallel Simulation Using Reactive Streams: Graph-Based Approach for Dynamic Modeling and Optimization’, *Computation*, vol. 13, no. 5, p. 103, Apr. 2025, doi: 10.3390/computation13050103.
- [301] L. Lamport, ‘Specifying Concurrent Systems with TLA+’, Apr. 23, 1999. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20160304085618/http://research.microsoft.com/en-us/um/people/lamport/pubs/lamport-spec-tla-plus.pdf>
- [302] C. Paulin-Mohring, ‘Introduction to the Coq Proof-Assistant for Practical Software Verification’, in *Tools for Practical Software Verification*, vol. 7682, B. Meyer and M. Nordio, Eds, in Lecture Notes in Computer Science, vol. 7682. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 45–95. doi: 10.1007/978-3-642-35746-6_3.
- [303] ‘ДСТУ IEC 61850-7-4:2014. Communication networks and systems for power utility automation — Part 7-4: Basic communication structure — Compatible logical node classes and data object classes (62155)’. МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available:

https://dnaop.com/html/62155/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_IEC_61850-7-4_2014

- [304] International Electrotechnical Commission, ‘IEC 61850-7-410’. International Electrotechnical Commission. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/20081>
- [305] International Electrotechnical Commission, ‘Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-420: Basic communication structure – Distributed energy resources and distribution automation logical nodes’. International Electrotechnical Commission. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/en/iec_catalog/product/preview/?id=L3B1Yi9wZGYvcHJldmllZy9pbmZvX2llYzYxODUwLTctNDIwe2VkMi4wfWIucGRm
- [306] A.-T. P. Nguyen and V.-D. Hoang, ‘Development of Code Evaluation System based on Abstract Syntax Tree’, *JTE*, vol. 19, no. 1, pp. 15–24, Feb. 2024, doi: 10.54644/jte.2024.1514.
- [307] Muhammad Raza, ‘Stateful vs. Stateless: Understanding Key Differences for Apps and IT Systems’, splunk. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: https://www.splunk.com/en_us/blog/learn/stateful-vs-stateless.html
- [308] G. Di Crescenzo, M. Khodjaeva, D. Kahrobaei, and V. Shpilrain, ‘A Survey on Delegated Computation’, in *Developments in Language Theory*, vol. 13257, V. Diekert and M. Volkov, Eds, in Lecture Notes in Computer Science, vol. 13257. , Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 33–53. doi: 10.1007/978-3-031-05578-2_3.
- [309] C. Braghin, E. Riccobene, and S. Valentini, ‘Modeling and verification of smart contracts with Abstract State Machines’, in *Proceedings of the 39th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, Avila Spain: ACM, Apr. 2024, pp. 1425–1432. doi: 10.1145/3605098.3636040.
- [310] A. Prymushko, ‘Competitive drafting and execution of terms of smart contracts presented in the form of high-level transition functions between contract states using denotational semantics’, presented at the Collection of materials of the XLI

- Scientific and technical conference of young scientists and specialists of G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of National Academy of Sciences of Ukraine, Київ, Україна: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, May 2023, p. 191. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/370854172_Collection_of_materials_of_the_XLI_Scientific_and_technical_conference_of_young_scientists_and_specialists_of_GE_Pukhov_Institute_for_Modelling_in_Energy_Engineering_of_National_Academy_of_Sciences_of
- [311] E. Kindler and I. Krivy, ‘Object-oriented simulation of systems with sophisticated control’, *International Journal of General Systems*, vol. 40, no. 3, pp. 313–343, Apr. 2011, doi: 10.1080/03081079.2010.539975.
- [312] I. V. Puchko, A. M. Prymushko, and H. O. Kravtsov, ‘Development of Methodical Recommendations Usage of Functional Paradigm Programming in Scala’, *Elektron. model.*, vol. 43, no. 6, pp. 95–106, Dec. 2021, doi: 10.15407/emodel.43.06.095.
- [313] S. Jackson, N. Cummings, and S. Khan, ‘Streaming Technologies and Serialization Protocols: Empirical Performance Analysis’, Nov. 04, 2024, *arXiv*: arXiv:2407.13494. doi: 10.48550/arXiv.2407.13494.
- [314] F. Rosenblatt, ‘The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain.’, *Psychological review*, vol. 65 6, pp. 386–408, 1958.
- [315] B. Zhu, S. Jajodia, and M. S. Kankanhalli, ‘Building trust in peer-to-peer systems: a review’, *IJSN*, vol. 1, no. 1/2, p. 103, 2006, doi: 10.1504/IJSN.2006.010827.
- [316] H. P. Bhupathi, V. K. Pandraka, and L. S. Malladi, ‘Internet of Things (IoT) in Smart Grid Technology and its Applications’, in *2024 IEEE International Conference on Intelligent Systems, Smart and Green Technologies (ICISSGT)*, Visakhapatnam, India: IEEE, Nov. 2024, pp. 91–96. doi: 10.1109/ICISSGT58904.2024.00028.

- [317] A. Goudarzi, F. Ghayoor, M. Waseem, S. Fahad, and I. Traore, ‘A Survey on IoT-Enabled Smart Grids: Emerging, Applications, Challenges, and Outlook’, *Energies*, vol. 15, no. 19, p. 6984, Sept. 2022, doi: 10.3390/en15196984.
- [318] O. Kaya, E. Van Der Roest, D. Vries, and T. Keviczky, ‘Hierarchical Model Predictive Control for Energy Management of Power-to-X Systems’, in *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands: IEEE, Oct. 2020, pp. 1094–1098. doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248892.
- [319] F. A. Sarwar, I. Hernando-Gil, and I. Vechiu, ‘Review of energy management systems and optimization methods for hydrogen-based hybrid building microgrids’, *Energy Conversion and Econom*, vol. 5, no. 4, pp. 259–279, Aug. 2024, doi: 10.1049/enc2.12126.
- [320] B. Alami Milani and N. Jafari Navimipour, ‘A comprehensive review of the data replication techniques in the cloud environments: Major trends and future directions’, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 64, pp. 229–238, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2016.02.005.
- [321] A. М. Примушко and Л. М. Рижков, ‘Research of the complementary filter on MEMS-measurers’, *ISMC*, vol. 0, no. 20, pp. 47–53, June 2019, doi: 10.20535/2219-3804202019171836.
- [322] M. Yaroshynskyi, I. Puchko, A. Prymushko, H. Kravtsov, and V. Artemchuk, ‘Investigating the Evolution of Resilient Microservice Architectures: A Compatibility-Driven Version Orchestration Approach’, *Digital*, vol. 5, no. 3, p. 27, July 2025, doi: 10.3390/digital5030027.
- [323] Y. Zhang, R. Yang, J. Zhang, Y. Weng, and B.-M. Hodge, ‘Predictive Analytics for Comprehensive Energy Systems State Estimation’, in *Big Data Application in Power Systems*, Elsevier, 2018, pp. 343–376. doi: 10.1016/B978-0-12-811968-6.00016-4.
- [324] Cosimo Laneve and Gérard Boudol, ‘Lambda-Calculus, Multiplicities and the pi-Calculus’. INRIA, 1995. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://inria.hal.science/inria-00074103/document>

- [325] L. Cai, G. Cai, S. Lu, G. Li, and Y. Wang, ‘Observational equivalence and security games: Enhancing the formal analysis of security protocols’, *Computers & Security*, vol. 140, p. 103785, May 2024, doi: 10.1016/j.cose.2024.103785.
- [326] B. Charron-Bost, F. Mattern, and G. Tel, ‘Synchronous, asynchronous, and causally ordered communication’, *Distrib Comput*, vol. 9, no. 4, pp. 173–191, Feb. 1996, doi: 10.1007/s004460050018.
- [327] R. H. B. Netzer and B. P. Miller, ‘What are race conditions?: Some issues and formalizations’, *ACM Lett. Program. Lang. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 74–88, Mar. 1992, doi: 10.1145/130616.130623.
- [328] C. Hewitt, ‘Actor Model of Computation: Scalable Robust Information Systems’, Jan. 21, 2015, *arXiv*: arXiv:1008.1459. doi: 10.48550/arXiv.1008.1459.
- [329] R. Kogler, A. Plietzsch, P. Schultz, and F. Hellmann, ‘A normal form for grid forming power grid actors’, Jan. 13, 2022, *arXiv*: arXiv:2106.00644. doi: 10.48550/arXiv.2106.00644.
- [330] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation: Classic Actors’. Lightbend, Inc. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://doc.akka.io/libraries/akka-core/current/actors.html>
- [331] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation: Supervisor Strategy’. Lightbend, Inc. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://doc.akka.io/libraries/akka-core/current/general/actors.html#supervisor-strategy>
- [332] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation: State’. Lightbend, Inc. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://doc.akka.io/libraries/akka-core/current/general/actors.html#state>
- [333] ‘History of Actors’. Oct. 19, 2016. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://groups.seas.harvard.edu/courses/cs252/2016fa/12.pdf>
- [334] C. Camilleri, J. G. Vella, and V. Nezval, ‘Horizontally Scalable Implementation of a Distributed DBMS Delivering Causal Consistency via the Actor Model’, *Electronics*, vol. 13, no. 17, p. 3367, Aug. 2024, doi: 10.3390/electronics13173367.

- [335] Agha, G. A., Mason, I. A., Smith, S. F., and Talcott, C. L., ‘A foundation for actor computation’. *Journal of functional programming*, 1997. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://surl.li/wnamev>
- [336] E. D. Ugwuanyi, C. T. Jones, J. Velkey, and T. R. Josephson, ‘Benchmarking Energy Calculations Using Formal Proofs’, *Molecular Physics*, p. e2539421, Aug. 2025, doi: 10.1080/00268976.2025.2539421.
- [337] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation: Become/Unbecome’. Lightbend, Inc. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://doc.akka.io/libraries/akka-core/current/actors.html#become-unbecome>
- [338] M. Yaroshynskyi, A. Prymushko, I. Puchko, O. Sirotkin, and D. Sinko, ‘Akka as a tool for modelling and managing a smart grid system’, *J. Edge Comp.*, vol. 4, no. 1, pp. 105–115, May 2025, doi: 10.55056/jec.822.
- [339] D. Montenegro, G. A. Ramos, and S. Bacha, ‘Actor systems for flexible, scalable and modular simulation of electrical power systems’, in *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, National Harbor, MD, USA: IEEE, July 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2014.6939229.
- [340] B. M. D. de Sousa, R. C. Ferreira, and A. Goldman, ‘Functional vs. Object-Oriented: Comparing How Programming Paradigms Affect the Architectural Characteristics of Systems’, Aug. 01, 2025, *arXiv*: arXiv:2508.00244. doi: 10.48550/arXiv.2508.00244.
- [341] ‘Scala 3 — Book’. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://docs.scala-lang.org/scala3/book/fp-intro.html>
- [342] M. Odersky, L. Spoon, B. Venners, and F. Sommers, *Programming in Scala*, Fifth edition. Walnut Creek, California: Artima Press, 2021.
- [343] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation’. Lightbend, Inc. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://doc.akka.io/index.html>
- [344] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation: Actor Systems’. Lightbend, Inc. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available: <https://doc.akka.io/libraries/akka-core/current/general/actor-systems.html>

- [345] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation: Cluster Specification’. Lightbend, Inc.
Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available:
<https://doc.akka.io/libraries/akka-core/current/typed/cluster-concepts.html>
- [346] Lightbend, Inc., ‘Akka Documentation: Distributed Data’. Lightbend, Inc.
Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available:
<https://doc.akka.io/libraries/akka-core/current/typed/distributed-data.html>
- [347] ‘The Reactive Manifesto’. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available:
<https://www.reactivemanifesto.org/>
- [348] ‘Vigilant Hawk’. Accessed: June 11, 2025. [Online]. Available:
<https://github.com/ipk0/vigilant-hawk>
- [349] Q.-C. To, J. Soto, and V. Markl, ‘A survey of state management in big data processing systems’, *The VLDB Journal*, vol. 27, no. 6, pp. 847–872, Dec. 2018, doi: 10.1007/s00778-018-0514-9.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. G.O. Kravtsov, **A.N. Prymushko**, and V.I. Koshell, ‘Koshell Combined Autoregressive-Neural Network Method for Predicting Time Series’, *Elektron. model.*, vol. 42, no. 4, pp. 3–14, Aug. 2020, doi: 10.15407/emodel.42.04.003. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у формулюванні концептуального підходу та визначенні ключових вимог до комбінованої моделі, зокрема умови її побудови без залучення фахівця з машинного навчання).
2. G.A. Kravtsov, V.V. Levitin, V.I. Koshel', V. V. Nikitchenko, and **A.N. Primushko**, ‘Strong Artificial Intelligence: Background Precondition’, *Elektron. model.*, vol. 41, no. 5, pp. 35–58, Oct. 2019, doi: 10.15407/emodel.41.05.035. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробці теоретичних передумов створення сильного ШІ, провів аналіз застосовності онтологій як алгебраїчних структур та брав участь у проведенні натурних експериментів для валідації гіпотез).
3. G.A. Kravtsov, N.V. Kravtsova, O.V. Khodakovskaya, V.V. Nikitchenko, and **A.N. Prymushko**, ‘Brain Mathematics and Language. I’, *Elektron. model.*, vol. 43, no. 3, pp. 87–108, June 2021, doi: 10.15407/emodel.43.03.087. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – дослідив можливість розробки уніфікованої онтології, що описує предмети, дії, якості і відношення; провів дослідження природи контексту і подання його однозначними концептами уніфікованої онтології).
4. G.A. Kravtsov, N.V. Kravtsova, O.V. Khodakovskaya, V.V. Nikitchenko, and **A.N. Prymushko**, ‘Brain Mathematics and Language. II’, *Elektron. model.*, vol. 43, no. 4, pp. 69–88, Aug. 2021, doi: 10.15407/emodel.43.04.069. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь в розробці формальної моделі для опису предметів, дій та відношень у рамках

розробки уніфікованої онтології, а також в описі механізму суб'єктивного вибору семантичних категорій на основі їх релевантності в заданому контексті).

5. І.В. Пучко, **А.М. Примушко**, Г.О. Кравцов, 'Розробка методичних рекомендацій використання функціональної парадигми програмування в мові Scala', Електрон. моделювання, Т. 43, № 6, с. 95–106, 2021, doi: 10.15407/emodel.43.06.095. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у структуруванні та написанні методичних рекомендацій, зокрема в частині, присвяченій використанню операцій високого рівня для побудови декларативних програм).
6. Г.О. Кравцов, С.М. Гречко, В.В. Нікітченко, **А.М. Примушко**, 'Когнітивна алгебраїчна система', Електрон. моделювання, Т. 44, № 3, с. 14–30, 2022, doi: 10.15407/emodel.44.03.014. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – брав участь у розробці та введенні поняття КАС як математичного формалізму для моделювання когнітивних агентів. Дослідив та описав механізм оцінки міри толерантності між контекстами когнітивної діяльності та об'єктами носія в рамках КАС).
7. **А.М. Примушко**, І.В. Пучко, М.С. Ярошинський, Д.П. Сінько, 'Програмний дизайн розподіленої високонавантаженої системи електроенергетичної мережі на базі моделі акторів із застосуванням смарт-контрактів', Електрон. моделювання, Т. 46, № 3, с. 57–72, 2024, doi: 10.15407/emodel.46.03.057. Фахове видання категорії Б. (Особистий внесок – запропонував високорівневий дизайн розподіленої електроенергетичної системи на основі моделі акторів та кластерної топології. Провів аналіз типового навантаження на вузли кластерної системи, що стало основою для подальшої формалізації. Вивів формулу, що формалізує відношення між вузлами кластера на основі аналізу навантаження).
8. **A. Prymushko**, I. Puchko, M. Yaroshynskyi, D. Sinko, H. Kravtsov, and V. Artemchuk, 'Efficient State Synchronization in Distributed Electrical Grid

Systems Using Conflict-Free Replicated Data Types', IoT, vol. 6, no. 1, p. 6, Jan. 2025, doi: 10.3390/iot6010006. **Indexed in Scopus Q1.** (Особистий внесок – запропонував загальну структуру для розподілених електроенергетичних систем, що базується на безконфліктних реплікованих типах даних. Обґрунтував використання моделі конвергентних реплікованих типів даних з поширенням дельти-станів для оптимізації комунікації в системі. Брав участь у розробці фреймворку “Vigilant Hawk” на базі моделі акторів та інструментарію Akka для симуляції асинхронної природи DEGS. Спланував серію експериментів для дослідження впливу мережових умов на ефективність синхронізації стану).

9. O. Sirotkin, **A. Prymushko**, I. Puchko, H. Kravtsov, M. Yaroshynskyi, and V. Artemchuk, ‘Parallel Simulation Using Reactive Streams: Graph-Based Approach for Dynamic Modeling and Optimization’, Computation, vol. 13, no. 5, p. 103, Apr. 2025, doi: 10.3390/computation13050103. **Indexed in Scopus Q2.** (Особистий внесок – брав участь в розробці математичної моделі для динамічного моделювання і оптимізації симуляції на основі графів та реактивних потоків з урахуванням попередньо визначених функцій переходу. Приймав участь у формалізації процесу переходу між станами системи на основі визначеної множини підстанів та ймовірностей переходу між ними).
10. M. Yaroshynskyi, **A. Prymushko**, I. Puchko, O. Sirotkin, and D. Sinko, ‘Akka as a tool for modelling and managing a smart grid system’, J. Edge Comp., vol. 4, no. 1, pp. 105–115, May 2025, doi: 10.55056/jec.822. **Indexed in Scopus.** (Особистий внесок – проаналізував ключові виклики в управлінні інтелектуальними мережами та брав участь в розробці моделі управління інтелектуальною мережею на основі ієрархічної структури акторів Akka).
11. M. Yaroshynskyi, I. Puchko, **A. Prymushko**, H. Kravtsov, and V. Artemchuk, ‘Investigating the Evolution of Resilient Microservice Architectures: A Compatibility-Driven Version Orchestration Approach’, Digital, vol. 5, no. 3,

p. 27, July 2025, doi: 10.3390/digital5030027. **Indexed in Scopus Q2.**
(Особистий внесок – брав участь в аналізі існуючих стратегій управління еволюцією API. Запропонував високорівневу концепцію зворотної сумісності мікросервісів за допомогою версіонування в контексті хеш функцій).

ПРОДОВЖ. ДОД. А

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **А.М. Примушко**, ‘Конкурентне укладання та виконання умов смарт контрактів представлених у вигляді високорівневих функцій переходу між станами контракту за допомогою детонаційної семантики’, XLI науково-технічна конференція молодих вчених Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, с. 69–72, Київ, Україна, 2023.
2. **A.M. Prymushko**, ‘The use of artificial intelligence methods for analyzing risk factors in the formation of smart contracts’, Матеріали круглого столу ‘Meaningful Artificial Intelligence’ Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, с. 4–6, Київ, Україна, 2024.
3. **І.В. Пучко, А.М. Примушко, М.С. Ярошинський, Г.О. Кравцов**, ‘Підвищення резильєнтності динамічних систем при синхронізації станів за допомогою CRDT’, Матеріали науково-практичної конференції ‘Резильєнтність динамічних систем, с. 50–52, Київ, Україна, 2024 URL: <https://ipme.kiev.ua/konferencii/naukovo-praktichna-konferenciya-rds-2024/>
4. **A. Prymushko, M. Yaroshynskyi, and I. Puchko**, ‘Representation and synchronization of states of distributed electrical grid systems based on conflict free replicated data types’, in 2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece: IEEE, Oct. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/DESSERT65323.2024.11122143.
Indexed in Scopus.

ДОДАТОК Б

Код для обробки даних та візуалізації графіків

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Load the data (change 'csv_file_path' to your file location)
csv_file_path = './data/LNDC-700-50-H-local.csv'
df = pd.read_csv(csv_file_path, header=None, names=["x", "y", "value"])
df["value"] = df["value"].replace({0: "g", 1: "y", 2: "r"})

# Count occurrences for each (time, value)
counts = df.groupby("x")["value"].value_counts().unstack(fill_value=0)

# Ensure all columns exist even if one category is missing
for col in ["g", "y", "r"]:
    if col not in counts:
        counts[col] = 0

# Rename columns and reset index as required
result = counts.reset_index().rename(columns={"x": "t"})[["t", "g", "y", "r"]]
result.to_csv("./data/transformed-node-state.csv", index=False)

print(result.head())

# Load CSV with columns ["t", "g", "y", "r"]
df = pd.read_csv('./data/transformed-node-state.csv')

def shannon_entropy(row):
    total = row['g'] + row['y'] + row['r']
    if total == 0:
        return 0
    entropy = 0
    for count in [row['g'], row['y'], row['r']]:
        if count > 0:
            p = count / total
            entropy -= p * np.log2(p)
    return entropy

df['H'] = df.apply(shannon_entropy, axis=1)
df[['t', 'H']].to_csv('./data/node-entropy.csv', index=False)

# The maximum entropy of 1.0 on your resulting graph means that the probabilities of the states ("g", "y", "r")
# are distributed evenly or nearly evenly at that time t.
# Here, you have three states  $N = 3$ , so maximum entropy would be  $\log_2(3) \approx 1.585$ 
# However, if in your data only two states dominate or are considered in the calculation, max entropy can be 1.0 (which
# is  $\log_2(2) = 1$ ).

entropy_df = pd.read_csv('./data/node-entropy.csv')
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(entropy_df['t'], entropy_df['H'], marker='o')
plt.xlabel('t (Час)')
plt.ylabel('H (Ентропія Шеннона)')
plt.title('Зміна ентропії збудованої ноди з точки зору EEM')
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig('./data/entropy_chart.png', dpi=300)

import pandas as pd
```

```

import matplotlib.pyplot as plt

# Зчитування CSV у DataFrame
df = pd.read_csv('../data/LNDC-700-50-entropy.csv', header=None, names=['T', 'H', 'MUC', 'Anomaly'])

# Перетворення у числові типи
df['T'] = pd.to_numeric(df['T'], errors='coerce')
df['MUC'] = pd.to_numeric(df['MUC'], errors='coerce')
df['Anomaly'] = pd.to_numeric(df['Anomaly'], errors='coerce')

plt.figure(figsize=(10, 6))

# Побудова графіка MUC від T з підписом для легенди
plt.plot(df['T'], df['MUC'], marker='o', linestyle='-', label='MUC')

# Додавання тонких вертикальних ліній для аномалій з підписом для легенди
# Щоб легенда не дублювалася, додамо label лише для першої лінії
anomaly_plotted = False
for t, anomaly in zip(df['T'], df['Anomaly']):
    if anomaly == 1:
        if not anomaly_plotted:
            plt.axvline(x=t, color='red', linestyle='--', linewidth=1, alpha=0.7, label='Аномалії')
            anomaly_plotted = True
        else:
            plt.axvline(x=t, color='red', linestyle='--', linewidth=1, alpha=0.7)

plt.xlabel('t')
plt.ylabel('MUC')
plt.title('LNDC=700, Збурення=50%')
plt.grid(True)
plt.legend() # Відображення легенди
plt.xlim(0, 15000)
# plt.show()

# Save the plot as a high-resolution image
output_file_path = '../data/output_MUC_700_50.png' # Change this to your desired file path
plt.savefig(output_file_path, dpi=300, bbox_inches='tight', format='png')

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Зчитування даних
df = pd.read_csv('../data/LNDC-700-50-H-global.csv', header=None, names=['T', 'H', 'MUC', 'Anomaly'])
df['T'] = pd.to_numeric(df['T'], errors='coerce')
df['H'] = pd.to_numeric(df['H'], errors='coerce')

entropy_df = pd.read_csv('../data/node-entropy.csv')

plt.figure(figsize=(10, 6))
x_limit = 25000
plt.xlim(0, x_limit)

def extend_line(x, y, x_max):
    # Якщо останнє значення x менше за x_max, додаємо точку (x_max, останнє y)
    if x.iloc[-1] < x_max:
        x_ext = np.append(x.values, x_max)
        y_ext = np.append(y.values, y.iloc[-1])
        return x_ext, y_ext
    else:
        return x.values, y.values

# Побудова першої лінії з продовженням

```

```

T_ext, H_ext = extend_line(df['T'], df['H'], x_limit)
plt.plot(T_ext, H_ext, marker='o', linestyle='-', label='$H_{global}$')

# Побудова другої лінії з продовженням
t_ext, h_ext = extend_line(entropy_df['t'], entropy_df['H'], x_limit)
plt.plot(t_ext, h_ext, marker='o', linestyle='-', label='$H_{local}$')

plt.xlabel('t')
plt.ylabel('H')
plt.title('LNDC=700, Збурення=50%')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()

output_file_path = './data/output_H_700_50.png'
plt.savefig(output_file_path, dpi=300, bbox_inches='tight', format='png')
plt.show()

# FSDT

import csv
import matplotlib.pyplot as plt

file_paths = [
    './data/LNDC-400-25-FSDT.csv',
    './data/LNDC-400-50-FSDT.csv',
    './data/LNDC-700-25-FSDT.csv',
    './data/LNDC-700-50-FSDT.csv'
]

plt.figure(figsize=(10, 6))

for file_path in file_paths:
    with open(file_path, 'r') as csvfile:
        reader = csv.reader(csvfile)
        rows = list(reader)
        if len(rows) >= 2:
            time = [float(value.strip()) for value in rows[0]]
            percentages = [float(value.strip()) for value in rows[1]]
            label = file_path.split('/')[-1].replace('.csv', '')
            plt.plot(time, percentages, marker='o', markersize=5, linewidth=1, label=label)

plt.title('FSDT')
plt.xlabel('t')
plt.ylabel('N')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.xlim(0, 10000)
# plt.show()

# Save the plot as a high-resolution image
output_file_path = './data/output_FSDT.png' # Change this to your desired file path
plt.savefig(output_file_path, dpi=300, bbox_inches='tight', format='png')

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.image as mpimg

# Шляхи до ваших зображень
image_paths = [
    './data/output_MUC_400_25.png',
    './data/output_MUC_400_50.png',
    './data/output_MUC_700_25.png',
    './data/output_MUC_700_50.png'
]

```

```

]

fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(12, 10))

for ax, img_path in zip(axes.flatten(), image_paths):
    img = mpimg.imread(img_path)
    ax.imshow(img)
    ax.axis('off') # Сховати осі

plt.tight_layout()

# Save the plot as a high-resolution image
output_file_path = './data/output_combined_MUC.png' # Change this to your desired file path
plt.savefig(output_file_path, dpi=300, bbox_inches='tight', format='png')

```