

ШАПИРО ОЛЕКСІЙ

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0009-0005-3539-266X>e-mail: oleksii.shapYRO@nure.ua**ЛЯШИК ВОЛОДИМИР**

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0000-0001-7326-0813>e-mail: volodymyr.liashyk@nure.ua

МЕТОДИ ІНЖЕНЕРІЇ ОНТОЛОГІЙ В РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У даній статті представлено комплексний аналіз застосування математичного апарату інженерії онтологій для розробки, впровадження та підтримки розподілених інформаційних систем на прикладі енергетичних інформаційних систем. У роботі висвітлено детальний аналіз проблеми класифікації технологічних процесів при розробці розподілених інформаційних систем, огляд сучасних методів, запропоновані нові теоретичні підходи, а також проведено практичний експеримент щодо реалізації цих методів. Основний акцент робиться на строгості формалізації, використанні таксономічних і мерономічних методів, категоріальному аналізі і побудові моделей прийняття рішень. У роботі детально розкриваються поняття «природна класифікація», «архетип», «гомоморфізм», а також принципи організації інформаційних систем на основі онтологій. Метою дослідження є демонстрація можливостей використання описаного математичного апарату для розподілених інформаційних систем на прикладі енергетичних інформаційних систем.

Ключові слова: онтології, розподілені інформаційні системи, інженерія програмного забезпечення, енергетичні інформаційні системи, система підтримки прийняття рішень.

SHAPYRO OLEKSII**LIASHYK VOLODYMYR**

Kharkiv National University of Radio Electronics

METHODS OF ONTOLOGY ENGINEERING IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS

This paper presents a comprehensive analysis of the application of the mathematical apparatus of ontology engineering for the development, implementation, and maintenance of distributed information systems, demonstrated through the example of energy information systems. The study provides an in-depth examination of the classification problem of technological processes that accompany the design and deployment of distributed information systems. It reviews current methods and introduces novel theoretical approaches while reporting on practical experiments aimed at implementing these methods in real-world scenarios. A key emphasis of the work is placed on the rigor of formalization and the employment of both taxonomic and meronomic methods, combined with categorical analysis and the construction of decision-making models. Fundamental concepts such as “natural classification,” “archetype,” and “homomorphism” are explored in detail, alongside the underlying principles of organizing information systems based on ontologies. In doing so, the research demonstrates how formal mathematical models can capture both the structural and semantic nuances inherent in complex systems. Moreover, the paper investigates the integration of heterogeneous data sources and the unification of knowledge representation through ontological models. The proposed approaches allow for the identification and formalization of intrinsic relationships between system components, which are essential for establishing a coherent and adaptable classification framework. The research further includes the development and experimental evaluation of a prototype decision support system, implemented in Python, that utilizes clustering algorithms and production-rule mechanisms for automatic knowledge inference. Experimental results indicate that the ontology-based approach not only enhances classification accuracy—achieving figures close to 95% compared to expert assessments—but also improves system response times and adaptability in dynamic environments. Overall, the study demonstrates the potential of the described mathematical framework for managing and optimizing distributed information systems in the energy sector. It lays a robust theoretical foundation for future research in ontology-based system integration and adaptive decision support, outlining directions for further enhancements such as the incorporation of fuzzy logic techniques and the establishment of unified standards for interoperability among diverse ontological systems.

Keywords: ontologies, distributed information systems, software engineering, energy information systems, decision support system.

Стаття надійшла до редакції / Received 04.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.04.2025

Сутність проблеми класифікації в інформаційних системах

Сучасні енергетичні інформаційні системи характеризуються високим ступенем складності, різноманітністю функціональних модулів та необхідністю інтеграції різноманітних даних для забезпечення ефективного управління та прийняття рішень. Однією з фундаментальних проблем у даній предметній області є класифікація технологічних процесів, що супроводжують розробку, впровадження та експлуатацію енергетичних інформаційних систем. Як показує практика, розробка ефективної системи класифікації вимагає врахування безлічі релевантних факторів: технічних, економічних та організаційних. Для вирішення цієї проблеми використовується математичний апарат природної класифікації, в основі якого лежить єдність універсуму, ієрархічності і параметричності елементів класифікаційного поля.

Формальна постановка задачі полягає в наступному. Вихідні дані являють собою сукупність технологічних операцій, що використовуються при розробці енергетичних інформаційних систем, перелік типів операцій, а також сукупність показників ефективності, що характеризують результати їх застосування. Необхідно побудувати класифікаційну модель технологічних процесів, яка забезпечує можливість об'єктивного розподілу об'єктів предметної області за категоріями з урахуванням їх внутрішніх і зовнішніх зв'язків. У цьому контексті важливе місце займає поняття таксономії, що представляє собою поділ універсуму об'єктів на ієрархічно організовані класи, а також мерономії, що дозволяє оцінити ступінь подібності між об'єктами шляхом порівняння їх структурних характеристик.

Основна ідея полягає в тому, що класифікація об'єктів енергетичних інформаційних систем повинна відображати не тільки формальні ознаки, але й внутрішню семантику кожного об'єкта. З цією метою використовується підхід, розроблений в рамках теорії природної класифікації, де об'єкт класифікується за принципом наявності «природного класу», що визначається через його сутнісні властивості. Формальне вираження цієї ідеї можна записати за допомогою метричних характеристик. Наприклад, відстань між двома об'єктами x та y в таксономічній структурі визначається за формулою

$$p(x, y) = N - n, \quad (1)$$

де N – загальна кількість рівнів в ієрархії, а n – ранг найменшого таксона, що одночасно включає об'єкти x та y . Ця метрика задовольняє аксіомам невід'ємності, тотожності та трикутної нерівності, що дозволяє використовувати її для оцінки ступеня подібності між мінімальними таксонами, що складають універсум класифікації.

При цьому важливо відзначити, що універсальність обраного підходу дозволяє адаптувати його під будь-яку предметну область. В даному випадку клас об'єктів – це елементи енергетичних інформаційних систем, які можуть представляти програмні модулі, апаратні пристрої, алгоритми обробки даних і т.д.

Огляд таксономічного та мерономічного підходів

Таксономія в контексті енергетичних інформаційних систем представляє спосіб поділу об'єктів на класи за принципом їх подібності. У даній предметній області таксономічний універсум включає в себе всі елементи, що входять до складу енергетичних інформаційних систем, що дає можливість побудови чіткої ієрархічної структури. При цьому таксономія визначається як сукупність таксонів, які об'єднують об'єкти, що мають загальні структурні характеристики. Кожен таксон визначається не тільки назвою, а й відповідним до нього концептом, що відображає зміст поняття. Формально, якщо позначати через T множину мінімальних таксонів, то множину всіх таксонів можна представити як булеан $B(T)$, тобто множину всіх підмножин T .

Важливим аспектом побудови таксономії є визначення поняття «природного класу об'єктів». Природність класу служить онтологічною передумовою для створення ефективної класифікаційної моделі. Таким чином, природня система класифікації об'єктів енергетичних інформаційних систем повинна враховувати як реальні, так і потенційні об'єкти предметної області, забезпечуючи повноту опису за умови логічної послідовності.

Мерономія, в свою чергу, дозволяє аналізувати внутрішню структуру об'єктів шляхом їх розбиття на складові частини. При порівнянні двох об'єктів енергетичної інформаційної системи мерономічний підхід дозволяє визначити їх подібність на основі спільного архетипу – узагальненого уявлення, що характеризує сутнісний зміст об'єктів. Формальна модель архетипу записується у вигляді

$$K = \langle M, \{rf, \{P_j\}, \{A_k\}\} \rangle, \quad (2)$$

де M – множина меронів (складових частин об'єкта), rf – відношення між меронами, P_j – конкретні відношення, що визначають стани меронів, а A_k – аксіомами, що визначають допустимі стани. Перехід від конкретного об'єкта до узагальненого архетипу здійснюється за допомогою гомоморфізму, що дає можливість перенести внутрішню структуру одного об'єкта на інший, тим самим забезпечуючи можливість порівняння об'єктів на рівні їх внутрішніх характеристик.

Взаємозв'язок між таксономічним і мерономічним підходами виражається через принцип дуальності, згідно з яким кожному таксону відповідає певний архетип, що відображає його змістовну сутність. При цьому більш вузьким таксонам відповідають більш багатий зміст, що визначається сукупністю меронів. Цей взаємозв'язок дає можливість оцінити ступінь подібності об'єктів як за зовнішніми ознаками, так і за їх внутрішньою структурою, що є важливою умовою побудови ефективних систем підтримки прийняття рішень.

Проблеми реалізації класифікаційних моделей в інформаційних системах

Незважаючи на формальну строгість описаних підходів, при практичній реалізації класифікаційних моделей енергетичних інформаційних систем виникають певні труднощі.

Однією з ключових проблем є необхідність визначення універсального набору ознак, які будуть використовуватися для класифікації об'єктів. В енергетичних інформаційних системах об'єкти можуть мати як технічні характеристики (наприклад, продуктивність, надійність, енергоефективність), так і економічні та організаційні параметри. Об'єднання цих аспектів в єдину модель класифікації

вимагає використання складного математичного апарату, що дозволяє врахувати всі взаємозв'язки між ознаками.

Ще одна проблема пов'язана з динамічністю предметної області. Енергетичні інформаційні системи, як і будь-яка технологічна платформа, знаходяться в постійному розвитку, що призводить до появи нових об'єктів і змін в існуючих [1]. Як наслідок, традиційні таксономічні моделі можуть швидко застарівати, що вимагатиме регулярного оновлення класифікації та коригування меромічних критеріїв.

Крім того, процес класифікації повинен враховувати невизначеності, що виникають як з суб'єктивності оцінки індивідуальних ознак, так і з складності визначення класових кордонів. Наприклад, в контексті енергетичних інформаційних систем може виникнути необхідність враховувати якісні характеристики, такі як надійність інформаційних процесів або ступінь адаптивності системи. Для вирішення таких задач необхідно використовувати методи, засновані на теорії нечітких множин і імовірнісному моделюванні.

Таким чином, незважаючи на очевидні переваги використання математичних методів для класифікації, практична реалізація моделі вимагає інтеграції різних підходів, здатних адекватно відображати різноманіття і динаміку об'єктів енергетичних інформаційних систем.

Значення онтологічного підходу у розв'язанні проблем класифікації

Онтології відіграють ключову роль у розвитку сучасних інформаційних систем, оскільки дозволяють формалізувати та систематизувати знання про предметну область. В енергетичних інформаційних системах онтологічний підхід забезпечує єдине представлення знань, що сприяє вдосконаленню процесів прийняття рішень, оптимізації управління та підвищенню ефективності функціонування системи.

Онтології представляють собою формальні специфікації концептуалізації знання, де об'єкти описуються за допомогою класів, атрибутів, відношень і аксіом [2]. Формальне визначення онтології можна записати у вигляді трійки

$$O = \langle E, R, F \rangle, \quad (3)$$

де E – кінцева множина концептів, R – сукупність відношень між концептами, а F – функції інтерпретації, які задають аксіоматизацію понять. Такий підхід дозволяє створювати моделі, що відображають не тільки структуру знань, але і їх функціональне призначення. Використання онтологій в енергетичних інформаційних системах сприяє інтеграції різноманітних даних, автоматизації процесів обробки інформації та підвищенню адаптивності системи.

Крім того, онтології служать основою для побудови експертних систем, що підтримують прийняття рішень в умовах невизначеності. Система підтримки прийняття рішень на базі онтологічної моделі дозволяє поєднати експертні знання з формальними методами аналізу, що дає можливість ефективно вирішувати складні задачі управління. Використання таких систем особливо актуально в енергетиці, де висока динамічність і складність об'єктів вимагає постійного контролю і оперативного реагування на зміни в навколишньому середовищі.

Таким чином, інтеграція таксономічного, меромічного та онтологічного підходів дозволяє створити цілісну модель класифікації об'єктів, яка враховує всі актуальні параметри та забезпечує високу точність прийняття рішень.

Сучасні підходи до побудови онтологій

В даний час розробка онтологій для енергетичних інформаційних систем як напрямок досліджень активно розвивається. Наукові праці в цій галузі спрямовані на створення формальних моделей, що дозволяють описати як технічні, так і організаційні аспекти функціонування енергетичних інформаційних систем. Сучасні методи включають використання мов опису онтологій, таких як OWL, CycL та інших, що забезпечує можливість формального представлення знань і автоматичне виведення нової інформації.

Основний упор робиться на розробку так званих легких онтологій (lightweight ontologies), які мають достатню виразну здатність відображати основні характеристики об'єктів, але при цьому залишаються зрозумілими для фахівців і адаптивними до змін в предметній області. Застосування легких онтологій дозволяє забезпечити швидкий перехід від концептуального рівня до практичної реалізації системи, що особливо важливо для енергетичних інформаційних систем, що динамічно розвиваються.

Аналіз існуючих методологій показує, що найбільш ефективними є підходи, засновані на принципах узгодженості, розширюваності та мінімального впливу кодування. Ці принципи дозволяють створювати онтології, які залишаються актуальними при зміні вихідних даних і мають високу адаптивність. Важливим завданням також є інтеграція онтологій, розроблених для різних підсистем енергетичних інформаційних систем, що забезпечує створення єдиної інформаційної платформи для підтримки прийняття рішень.

Сучасні дослідження свідчать, що застосування онтологічного підходу в енергетиці сприяє вдосконаленню процесів управління, оптимізації використання ресурсів та підвищенню енергоефективності. Прикладами таких систем є платформи моніторингу енергоспоживання, системи

керування розподіленою енергією, а також інтелектуальні системи для аналізу стану енергетичних об'єктів. Всі ці рішення ґрунтуються на принципах формальної специфікації знань, що дозволяє забезпечити точність і прозорість прийнятих рішень.

Технології інтеграції даних і знань

Однією з найактуальніших проблем у сфері енергетичних інформаційних систем є інтеграція різнорідних даних, що надходять з різних джерел. Сучасні інформаційні системи стикаються з необхідністю обробки великих обсягів даних, які можуть включати як технічні параметри обладнання, так і результати експертних оцінок, прогнозів і аналітичних звітів [3]. Для вирішення цієї проблеми широко використовуються технології, засновані на використанні онтологій.

Онтології дозволяють уніфікувати представлення даних, що дозволяє проводити їх подальшу агрегацію та аналіз. Важливим аспектом є створення моделей, здатних описувати як статичні характеристики об'єктів, так і динамічні процеси, що відбуваються в рамках енергетичних інформаційних системах. Наприклад, відносини «part of» або «is a» використовуються для побудови таксономічних дерев, що відображають структуру об'єктів, у той час як меромічні відношення дозволяють оцінити ступінь їх взаємозв'язку.

У сучасних системах інтеграції даних використовуються методи семантичного пошуку, зіставлення концептів та автоматичного виведення, що дозволяє забезпечити високу релевантність отриманих результатів. Використання таких методів дозволяє не тільки оптимізувати процеси моніторингу і управління, але і значно підвищує якість прийнятих рішень за рахунок урахування складних взаємозв'язків між різними параметрами системи.

На практиці інтеграція онтологій здійснюється за допомогою спеціалізованих програмних платформ, які підтримують роботу з мовами опису онтологій і забезпечують реалізацію механізмів автоматичного виведення. Такі системи можуть експлуатуватися як в режимі онлайн, так і в режимі пакетної обробки даних, що дозволяє адаптувати їх до вимог різних типів енергетичних інформаційних систем.

Проблеми стандартизації та сумісності онтологій

Однією з істотних проблем впровадження онтологічного підходу в енергетичних інформаційних системах є стандартизація та забезпечення сумісності різних онтологій. У сучасних умовах кожна організація або дослідницька група розробляє власні моделі знань, що призводить до розбіжностей в термінології, структурі представлення даних і семантичних зв'язках між об'єктами. Це, в свою чергу, ускладнює обмін інформацією та інтеграцію систем, побудованих на основі різних онтологій.

Для вирішення цієї проблеми розроблені стандарти, спрямовані на уніфікацію представлення знань. Одним з ключових аспектів є застосування загальних метаонтологій, які визначають основні поняття і відносини, загальні для більшості предметних областей. Застосування таких метаонтологій дає можливість створювати спеціалізовані онтології з високим ступенем сумісності, що значно полегшує їх інтеграцію в єдині інформаційні платформи.

Незважаючи на існування стандартів, проблема сумісності залишається актуальною, оскільки динаміка розвитку енергетичних інформаційних систем вимагає постійного оновлення та адаптації онтологічних моделей. У цьому контексті важливу роль відіграє методологія підтримки життєвого циклу онтологій, яка передбачає регулярне оновлення, верифікацію та документування змін у моделі знань. Такий підхід мінімізує ризики виникнення неузгодженостей в онтологіях і забезпечує безперервний розвиток інформаційних систем.

Приклади впровадження онтологічних систем

Практичний досвід використання онтологічного підходу в енергетичних інформаційних системах демонструє високу ефективність цього методу. Одним із прикладів є розробка системи підтримки прийняття рішень для управління розподіленою енергією. У такій системі онтології використовуються для опису структури енергосистеми, характеристик обладнання, а також для формування та аналізу сценаріїв розвитку ситуації. Формальний опис моделі дозволяє інтегрувати дані з різних датчиків, джерел інформації та експертних оцінок, що значно підвищує точність прогнозування та швидкість прийняття рішень.

Іншим прикладом є система моніторингу та оптимізації енергоспоживання, яка використовує онтології для аналізу поведінки користувачів, прогнозування пікових навантажень та оптимізації продуктивності обладнання. Застосування таксономічного та меромічного підходів у цій системі дає можливість виявляти приховані закономірності у даних, проводити кластерний аналіз та розробляти рекомендації щодо оптимізації роботи енергетичної інфраструктури. Такі системи активно використовуються на великих промислових підприємствах, де ефективність використання енергії є критично важливим показником.

Також варто відзначити використання онтологічних систем для інтеграції даних про стан енергетичних об'єктів. В рамках єдиної інформаційної платформи об'єднуються дані з різних рівнів управління, що дає можливість проводити комплексний аналіз стану системи, оцінювати ризики і розробляти сценарії оперативного реагування на можливі збої. Такий підхід значно підвищує надійність і безпеку функціонування енергетичних інформаційних систем.

Формалізація понять і структурна декомпозиція

Одним з ключових напрямків нових досліджень є розробка формальних моделей онтологій, здатних адекватно описувати складні системи енергетичних інформаційних систем. Центральне місце в таких моделях займає формалізація понять за допомогою математичних засобів, що забезпечує строгість опису і можливість автоматичного виведення знань. Формальна модель онтології зазвичай задається у вигляді трійки

$$O = \langle E, R, F \rangle, \quad (4)$$

де E – множина концептів, R – сукупність відносин між ними, а F – набір функцій інтерпретації. При цьому особлива увага приділяється декомпозиції системи на підсистеми з метою виявлення основних компонентів, що мають стійкі властивості. Така декомпозиція дає можливість розділити систему на таксономічні та мерономічні аспекти, що є основою для побудови категоріальної моделі знання [4].

При структурному аналізі об'єктів енергетичних інформаційних систем важливо виявити мінімальні таксони, які в подальшому можуть бути об'єднані в більш складні структури. Якщо позначати як T множину мінімальних таксонів, то сукупність всіх таксонів буде представлено як булеан $B(T)$. При цьому відносини включення, що визначають ієрархічну структуру, визначаються за допомогою відповідної деревовидної моделі, де кожному таксону відповідає певний рівень в ієрархії. Формально відстань між об'єктами можна визначити за формулою

$$p(x, y) = N - n, \quad (5)$$

де N – число рангів в системі, а n – ранг найменшого таксона, який об'єднує об'єкти x та y . Ця метрика дозволяє кількісно оцінити ступінь подібності між об'єктами і є основою для подальшої класифікації.

Крім того, важливою складовою формалізації є поняття архетипу, яке представляється як узагальнене уявлення про структуру об'єкта. Архетип задається як

$$K = \langle M, \{rf, \{P_j\}, \{A_k\}\} \rangle, \quad (6)$$

де M – множина меронів, rf – відношення між меронами, P_j – конкретні реалізації відношень, а A_k – аксіомами, що визначають допустимі стани. Застосування гомоморфізму для переходу від конкретного об'єкта до узагальненого архетипу дає можливість перенесення структурних характеристик між об'єктами, що має вирішальне значення для порівняння та класифікації енергетичних інформаційних систем.

Категоріальний підхід до моделювання онтологій

В рамках нових теоретичних підходів велика увага приділяється застосуванню категоріальної теорії для опису взаємозв'язків між об'єктами і їх властивостями. Категорія об'єктів, що позначається як $\mathcal{A}$, включає в себе таксони, а морфізми між ними відображають родово-видові зв'язки, що дозволяють встановити ієрархічну структуру знань. Формальний опис категоріальної моделі починається з визначення функторів, які співставляють таксони відповідним до них архетипам.

Нахай існує категорія таксонів $\mathcal{T}$ і категорія архетипів $\mathcal{K}$. Відображення, що співставляє кожному таксону T його архетип $\alpha(T)$, задається функтором

$$F: \mathcal{T} \rightarrow \mathcal{K}, \quad (7)$$

таким чином, класифікація об'єктів енергетичних інформаційних систем зводиться до вивчення властивостей цього функтора, його ін'єктивності, сюр'єктивності та збереження структурних відношень.

Категоріальна модель більш детально описується через поняття морфізму типу перестановки, який задається трійкою

$$(f, M', g), \quad (8)$$

де f – гомоморфізм між множинами меронів, g – відображення, що індукує внутрішню структуру, а M' – є підмножиною образу вихідної моделі. Якщо для будь-якого елементу x виконується рівність

$$g(f(x)) = x, \quad (9)$$

тоді морфізм перестановки зводиться до звичайного гомоморфізму. Найменшим морфізмом перестановки є модель, отримана у вигляді мінімального зображення вихідної системи при відображенні f . Така конструкція дозволяє формально описати процес перенесення внутрішніх структур між об'єктами, що важливо для моделювання складних систем, таких як енергетичні інформаційні системи.

Принцип двоїстості таксономічного і мерономічного аспектів

Ключовим принципом в побудові онтологій є двоїстість таксономічних і мерономічних аспектів класифікації. З одного боку, таксономія забезпечує групування об'єктів за їх зовнішньою подібністю, а з іншого боку, мерономія дозволяє виявити їх внутрішню структурну подібність через поняття архетипу. Цей принцип забезпечує узгодженість моделі на двох рівнях, що дозволяє ітеративно уточнювати як таксономічну структуру, так і мерономічні критерії.

Якщо таксон T має архетип $\alpha(T)$, а всередині таксона виділяють підклас T_1 з архетипом $\alpha(T_1)$, то відношення між архетипами можна представити в наступному вигляді

$$T_1 \xrightarrow{\varphi} T \Rightarrow \alpha(T_1) \rightarrow \alpha(T). \quad (10)$$

Таке співвідношення вказує на гомоморфізм архетипу підкласу в архетип суперкласу, що підтверджує узгодженість представлення об'єктів на різних рівнях ієрархії. Ітераційний процес уточнення архетипів дозволяє оптимально налаштувати модель таким чином, щоб вона максимально точно відображала внутрішню структуру об'єктів енергетичних інформаційних систем.

Нові методології синтезу онтологій

З метою підвищення ефективності онтологічного моделювання в енергетичних інформаційних системах запропоновано інтегрований підхід, що включає синтез окремих онтологій в єдину онтологічну систему. Даний підхід ґрунтується на таких принципах: ясність, узгодженість, розширюваність, мінімальний вплив кодування та мінімальні онтологічні зобов'язання. Застосування цих принципів дозволяє забезпечити високу адаптивність моделі і її відповідність вимогам предметної області що динамічно розвивається.

Методологія синтезу онтологій передбачає послідовне виконання наступних етапів: специфікація, концептуалізація, формалізація та реалізація. Етап специфікації визначає призначення онтології, її сферу застосування та передбачуваних користувачів. Концептуалізація передбачає структурування предметних знань у вигляді значущих моделей, що відображають сутність об'єктів енергетичних інформаційних систем. Формалізація здійснюється шляхом перетворення концептуальної моделі в математично строгу форму за допомогою логічних тверджень і аксіом [5]. Етап реалізації передбачає програмну реалізацію формальної моделі з використанням відповідних мов опису онтологій, таких як OWL або DAML+OIL.

При цьому життєвий цикл онтології включає не тільки етапи розробки, але і процедури підтримки, такі як отримання знань, оцінка, інтеграція, документація та управління конфігурацією. Постійне оновлення онтології є необхідною умовою забезпечення її актуальності в умовах динаміки енергетичних інформаційних систем [6]. Такий комплексний підхід дозволяє створювати масштабовані та адаптивні онтологічні системи, які можуть ефективно підтримувати прийняття рішень на всіх етапах життєвого циклу енергетичних інформаційних систем.

Застосування онтологічного підходу до підтримки прийняття рішень

Одним з найважливіших напрямків застосування онтологій в енергетичних інформаційних системах є розробка систем підтримки прийняття рішень. В умовах високої динамічності і невизначеності енергетичних процесів прийняття швидких і точних рішень є критичним фактором ефективності [7]. Онтологічна система, побудована на основі синтезу таксономічних і меромічних моделей, забезпечує можливість автоматичного виведення знань та інтеграції різномірної інформації, що значно підвищує якість прийняття рішень.

Системи підтримки прийняття рішень в даній предметній області орієнтовані на вирішення складних завдань, таких як вибір оптимальних стратегій управління, оцінка ризиків, прогнозування стану системи і оптимізація розподілу ресурсів. Багаторівнева структура прийняття рішень включає в себе наступні шари: рівень вибору, рівень адаптації і рівень самоорганізації. Кожен з цих шарів характеризується певними параметрами, які відображають різні аспекти функціонування енергетичних інформаційних систем.

На нижчому рівні, рівні вибору, вирішуються оперативні завдання, пов'язані з безпосереднім формуванням завдань на управління процесами. Середній рівень, рівень адаптації, відповідає за конкретизацію невизначеностей, що виникають в результаті динаміки зовнішнього середовища і внутрішніх процесів. Верхній рівень, рівень самоорганізації, забезпечує стратегічне планування та оптимізацію загальної структури системи. Формальний опис кожного з рівнів може бути представлений за допомогою відображень і функцій, які пов'язують сигнали зворотного зв'язку, керуючі дії і вхідні параметри. Наприклад, рівень вибору можна формально охарактеризувати відображенням

$$\varphi: X \times U \times Y \rightarrow Z, \quad (11)$$

де X – сукупність сигналів зворотного зв'язку, U – керуючий вплив, Y – вхідні сигнали, а Z – множина допустимих рішень.

Такий підхід дозволяє структурувати процес прийняття рішень і забезпечити його розбивку на послідовність підзадач, що значно спрощує аналіз і оптимізацію системи в цілому.

Практичний експеримент з реалізації методів онтологічного моделювання

Практична реалізація описаних теоретичних підходів спрямована на створення прототипу онтологічної системи підтримки прийняття рішень в енергетичних інформаційних системах. Основною метою експерименту є розробка моделі, яка забезпечує класифікацію об'єктів, автоматичне виведення знань та інтеграції різномірної інформації для оптимізації управління енергією та розподілу ресурсів.

Вихідними даними для побудови моделі є: загальна номенклатура технологічних процесів розробки та експлуатації енергетичних інформаційних систем, перелік типів операцій, що використовуються при створенні та впровадженні систем, а також сукупність показників ефективності, що характеризують роботу системи. Необхідно розробити класифікаційну модель, що відповідає вимогам єдності універсуму, ієрархічності та параметричності, а також забезпечити можливість ітераційного уточнення моделі з урахуванням змін у предметній області.

Проектування системи починається з формування таксономії об'єктів, що включає визначення мінімальних таксонів і побудову ієрархічної структури на їх основі. Кожен таксон визначається за допомогою набору характерних ознак, які відображають його сутнісні властивості. Для опису внутрішньої структури об'єктів використовується мерономістичний підхід, що дозволяє виявити загальні архетипи. Формальне представлення архетипу об'єкта записується у вигляді

$$K = \langle M, \{rf, \{P_j\}, \{A_k\}\} \rangle, \quad (12)$$

де M – множина меронів, rf – відношення між меронами, P_j – конкретні реалізації цих відношень, а A_k – аксіомами, що визначають допустимі стани.

На етапі проектування також розробляється категоріальна модель, яка визначає відносини між таксонами та їх архетипами за допомогою функторів. Таке представлення дозволяє забезпечити передачу структурних характеристик між об'єктами і створити основу для автоматизованого виведення знань. Всі етапи проектування супроводжуються ретельною верифікацією моделі з використанням експериментальних даних, отриманих під час тестувань прототипа.

В якості практичної реалізації розроблена модель була реалізована у вигляді програмного прототипу, реалізованого на мові Python з використанням бібліотек для обробки логічних виразів та роботи з онтологіями. Прототип включає модулі для обробки вхідних даних, побудови таксономічної структури, розрахунку мерономічної подібності між об'єктами та автоматичного виведення знань. Система базується на базі даних, що містить формальні описи об'єктів енергетичних інформаційних систем, їх характеристики та взаємозв'язки [8].

Програмна реалізація прототипу включає в себе наступні ключові компоненти. Перший компонент відповідає за попередню обробку даних, що включає в себе агрегування інформації з різних джерел і попереднє визначення характеристик об'єктів. Другий компонент будує таксономію об'єктів за допомогою алгоритмів кластерного аналізу на основі метрики подібності. Третій компонент відповідає за побудову мерономічної моделі, яка обчислює ступінь подібності між об'єктами на основі їх архетипів. Нарешті у четвертому компоненті реалізований механізм автоматичного виведення, заснований на системі продукційних правил, що дозволяє генерувати рекомендації щодо оптимізації процесів управління.

Експериментальна оцінка і результати

Для оцінки ефективності прототипу було проведено серію експериментальних випробувань на реальних даних, отриманих із об'єктів енергетичних інформаційних систем. Експерименти включали моделювання сценаріїв оптимізації розподілу енергоресурсів, прогнозування пікових навантажень та оцінку надійності системи. Результати тестування показали, що використання онтологічного підходу дозволяє значно підвищити точність класифікації об'єктів, що призводить до підвищення якості прийняття рішень.

В рамках експерименту була оцінена точність алгоритмів класифікації шляхом порівняння результатів автоматичного висновку з експертними оцінками. Результати продемонстрували високий ступінь узгодженості між моделлю та експертними даними. Крім того, система продемонструвала здатність до адаптації при зміні вихідних параметрів, що критично важливо для енергетичних інформаційних систем, що динамічно розвиваються.

Для кількісної оцінки продуктивності використовувалися такі показники, як відсоток правильно класифікованих об'єктів, час відгуку системи та ступінь адаптивності моделі. У таблиці 1 представлений порівняльний аналіз показників, отриманих в ході випробувань прототипів.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз показників отриманих в ході випробувань прототипів

Індекс	Експертна оцінка	Результат роботи системи	Примітка
Точність класифікації	93%	95%	Відповідність між автоматичним висновком і рецензуванням
Час відгуку	—	0.45 сек	Середній час обробки запиту
Адаптивність моделі	—	Високий	Можливість регулювання моделі в режимі реального часу

Аналіз показав, що впровадження онтологічної системи значно підвищує ефективність управління та підтримки прийняття рішень в енергетичних інформаційних системах, що підтверджується як якісними, так і кількісними показниками. Практична реалізація показала, що використання онтологічного підходу дозволяє скоротити час реакції на зміни в стані системи, оптимізувати розподіл ресурсів і підвищити загальну ефективність роботи підприємства.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній роботі представлений детальний аналіз застосування математичного апарату онтологічної інженерії для розробки, впровадження та підтримки розподілених інформаційних систем на прикладі енергетичних інформаційних систем. У дослідженні висвітлено теоретичну базу, побудову таксономічних та мерономних моделей, а також практичну реалізацію системи підтримки прийняття

рішень. Наведена методологія демонструє, що використання онтологічного підходу дозволяє не тільки формалізувати знання про складні технологічні процеси, а й інтегрувати різномірні дані для оптимізації управління системою.

Основні висновки дослідження можна узагальнити таким чином. По-перше, використання природної класифікації на основі таксономічного і меромного аналізу дозволяє побудувати структуру, що відображає внутрішню і зовнішню семантику об'єктів енергетичних інформаційних систем. По-друге, категоріальний підхід і використання формальних моделей забезпечують можливість автоматичного виведення знань і інтеграції різномірних джерел інформації. По-третє, експериментальна реалізація прототипу показала високу ефективність розробленої системи, що підтверджено як якісними, так і кількісними показниками та продемонструвало її практичну застосовність для підтримки прийняття оперативних рішень у динамічному середовищі.

Перспективними напрямками подальших досліджень є поглиблення категорійного аналізу онтологій, розробка адаптивних алгоритмів оновлення моделей та інтеграція методів нечіткої логіки для врахування якісних характеристик об'єктів. Крім того, важливим напрямком є розробка стандартів для забезпечення сумісності різних онтологічних систем, що дозволить створити єдину інформаційну платформу для енергетичних інформаційних систем.

Розробка комплексного онтологічного підходу відкриває нові можливості для оптимізації процесів управління, підвищення енергоефективності та забезпечення безпеки функціонування сучасних енергетичних інформаційних систем. В умовах зростаючої складності технологічних процесів і динаміки зовнішнього середовища використання формальних методів онтологічного моделювання стає необхідною умовою успішного розвитку галузі. Отримані результати можуть бути використані для розробки нових інформаційних платформ, здатних забезпечити всебічну підтримку прийняття рішень на всіх етапах життєвого циклу енергетичних інформаційних систем.

Таким чином, представлена робота демонструє, що використання математичного апарату онтологічної інженерії є перспективним та ефективним інструментом для вирішення складних завдань у галузях де застосовуються розподілені інформаційні системи. Розроблені моделі та методології дозволяють формалізувати знання, інтегрувати різномірну інформацію та автоматизувати процеси прийняття рішень, що має важливе значення для підвищення ефективності управління сучасними енергетичними об'єктами.

Література

1. Sharonova, N., Doroshenko, A., Cherednichenko, O. (2021). Issues of Fact-based Information Analysis. *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*. CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2136. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2136/10000011.pdf>
2. Sarker, U., Deraman, A. B., Hasan, R. (2018). Descriptive Logic for Software Engineering Ontology: Aspect Software Quality Control. *4th International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*. Kuala Lumpur, Malaysia, P. 1–5. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICCOINS.2018.8510585>
3. Karataiev, O., Sitnikov, D., Sharonova, N. (2023). A Method for Investigating Links between Discrete Data Features in Knowledge Bases in the Form of Predicate Equations. *7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2023)*. CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3387. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper17.pdf>
4. Shubin, I. (2023). Development of conjunctive decomposition tools. *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*. CEUR Workshop Proceedings, Vol-2870. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper67.pdf>
5. Shubin, I., Snisar, S., Litvin, S. (2021). Formalization and Application of Algebraic Methods in Automated Intelligent Systems. *IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. Kharkiv, Ukraine, P. 67–70. DOI: <http://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772174>
6. Шубін І., Каратаєв О. (2023). Проблеми повторного використання знань у процесі проектування програмних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. No 2 (24). С. 62–71. DOI: <http://doi.org/10.30837/itssi.2023.24.062>
7. Козирев А., Шубін І. (2023). Метод планування завдань оброблення даних у розподілених системах з обмеженою інформацією про доступні ресурси. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. No. 3 (25). С. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.027>
8. Karataiev, O. Shubin, I. (2023). Formal Model of Multi-Agent Architecture of a Software System Based on Knowledge Interpretation. *Radioelectronic and Computer Systems*. No. 4 (108), P. 53–64. DOI: <http://doi.org/10.32620/reks.2023.4.05>

References

1. Sharonova, N., Doroshenko, A., Cherednichenko, O. (2021). Issues of Fact-based Information Analysis. *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*. CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2136. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2136/10000011.pdf>

2. Sarker, U., Deraman, A. B., Hasan, R. (2018). Descriptive Logic for Software Engineering Ontology: Aspect Software Quality Control. *4th International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*. Kuala Lumpur, Malaysia, P. 1–5. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICCOINS.2018.8510585>
3. Karataiev, O., Sitnikov, D., Sharonova, N. (2023). A Method for Investigating Links between Discrete Data Features in Knowledge Bases in the Form of Predicate Equations. *7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2023)*. CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3387. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper17.pdf>
4. Shubin, I. (2023). Development of conjunctive decomposition tools. *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*. CEUR Workshop Proceedings, Vol-2870. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper67.pdf>
5. Shubin, I., Snisar, S., Litvin, S. (2021). Formalization and Application of Algebraic Methods in Automated Intelligent Systems. *IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. Kharkiv, Ukraine, P. 67–70. DOI: <http://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772174>
6. Shubin, I., Karataiev, O. (2023). Reuse of Information Based on The Interpretation of Knowledge. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. No. 2 (24), P. 62–71. DOI: <http://doi.org/10.30837/itssi.2023.24.062>
7. Kozyriev, A., Shubin, I. (2023). Method of Planning Data Processing Tasks in Distributed Systems with Limited Information About Available Resources. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. No. 3 (25), P. 27–39. DOI: <http://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.027>
8. Karataiev, O. Shubin, I. (2023). Formal Model of Multi-Agent Architecture of a Software System Based on Knowledge Interpretation. *Radioelectronic and Computer Systems*. No. 4 (108), P. 53–64. DOI: <http://doi.org/10.32620/reks.2023.4.05>