

ШИНКАРЕНКО Олег

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-9225-9747>

e-mail: oshynkarenko1503@gmail.com

СІЛАГІН Олексій

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0006-0089-4800>

e-mail: avsilagin@vntu.edu.ua

ОНТОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗИ ЗНАНЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СТАНОМ ЗАМКНУТОГО ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

В роботі наведено результати дослідження онтологічного моделювання бази знань системи управління станом водного середовища. У межах дослідження запропоновано модель, що описує процес управління замкнутим водним середовищем. Розроблений підхід передбачає формалізацію предметної області на основі онтологічного моделювання із визначенням ключових сутностей, їх властивостей та взаємозв'язків. Розглянуто інтеграцію даних, отриманих із сенсорів та модулів аналізу зображень, у єдину семантичну структуру. Запропонована модель сприяє підвищенню ефективності моніторингу та керування параметрами водного середовища завдяки семантичній обробці даних і можливості інтелектуального аналізу.

Ключові слова: онтологічне моделювання, база знань, замкнуте водне середовище, нечітка логіка, інтелектуальні системи, семантичний аналіз.

SHYNKARENKO Oleh, SILAGIN Oleksiy

Vinnitsia National Technical University

ONTOLOGICAL MODELING OF THE KNOWLEDGE BASE FOR A CLOSED AQUATIC ENVIRONMENT CONDITION MANAGEMENT SYSTEM

The relevance of managing parameters of closed water environments is determined by the increasing complexity of modern monitoring systems, such as aquaculture installations, swimming pools, and laboratory setups, where it is necessary to maintain stable physicochemical conditions in real time. The large volume of heterogeneous data obtained from sensors and auxiliary sources significantly complicates data processing and decision-making, which highlights the need for intelligent approaches to knowledge organization and system design. In such conditions, traditional data processing methods often demonstrate limited efficiency due to the lack of semantic context and weak integration capabilities, which further emphasizes the importance of advanced knowledge representation models. The paper presents the results of research in which an ontological model describing the process of managing a closed water environment is proposed. The developed approach is based on domain formalization using ontological modeling, including the identification of key entities, their properties, and relationships. Special attention is given to the integration of heterogeneous data obtained from sensors and image analysis modules into a unified semantic structure, ensuring consistency and completeness of knowledge representation. The model also enables explicit representation of dependencies between environmental parameters, which is essential for comprehensive system analysis. The proposed model enhances the efficiency of monitoring and control processes by enabling semantic data processing, structured knowledge representation, and intelligent analysis. The use of ontological modeling allows for reducing the number of queries required to obtain relevant information, improving decision-making accuracy, and ensuring system flexibility and scalability. Additionally, the approach simplifies system modification and extension by allowing the inclusion of new parameters and data sources without significant restructuring. As a result, the approach provides a solid foundation for the development of intelligent information systems for managing complex dynamic environments, including closed water systems.

Keywords: ontological modeling, knowledge base, closed water environment, fuzzy logic, intelligent systems, semantic analysis.

Стаття надійшла до редакції / Received 22.06.2026

Прийнята до друку / Accepted 07.07.2026

Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ШИНКАРЕНКО Олег, СІЛАГІН Олексій

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасний етап розвитку аквакультури та промислових біотехнологій характеризується масовим переходом до замкнутих водних середовищ, таких як установки замкнутого водопостачання. Головною технологічною особливістю таких систем є критична залежність життєдіяльності біоресурсів від вузького діапазону фізико-хімічних параметрів середовища (рН, рівень розчиненого кисню, температура, вміст азотистих сполук).

Проблема полягає в тому, що традиційні автоматизовані системи керування будуються на принципах жорсткої детермінованості за схемою «реакція на поріг». Такі системи здатні підтримувати окремі показники,

але не мають механізмів контекстуального розуміння стану екосистеми в цілому. Наприклад, поєднання зміни кольору води, зафіксованої камерою, та незначного коливання рівня амонію потребує специфічного алгоритму дій, який неможливо реалізувати без єдиної семантичної оболонки. Відсутність інтеграції «сирих» даних сенсорів, результатів візуального аналізу та експертних знань створює інформаційний розрив, що призводить до запізнілих реакцій та підвищення ризиків для біокультури. Використання онтологічного моделювання дозволяє подолати цей розрив, переходячи від простого збору даних до управління знаннями, що базується на формальних специфікаціях концептуалізації предметної області [1-3].

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі [4] запропоновано систему моніторингу стічних вод із використанням сенсорних мереж та елементів онтологічного аналізу для обробки даних. Разом з тим онтологія застосовується обмежено, без побудови повноцінної бази знань, і відсутні механізми інтелектуального прийняття рішень та моделювання керуючих впливів.

У роботі [5] представлено онтологію процесів спостереження параметрів якості води, яка забезпечує формалізований опис показників та умов їх вимірювання. Однак основний акцент зроблено на репрезентації даних, без реалізації функцій управління, а також не розглядається інтеграція різнорідних джерел інформації та формування керуючих дій.

Незважаючи на успіхи у використанні семантичних технологій для моніторингу природних водойм, питання адаптації цих методів для замкнутих керованих систем залишається відкритим. Зокрема, потребує вирішення механізм формального опису взаємодії між модулями комп'ютерного зору, фізичними сенсорами та виконавчими механізмами в межах єдиної моделі, що реалізує семантичну конвергенцію даних.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розробка та верифікація онтологічної моделі бази знань, що реалізує механізми семантичної конвергенції різнорідних даних (фізико-хімічних показників та результатів відеоаналітики) для забезпечення інтелектуального прийняття рішень у системах управління замкнутим водним середовищем.

Об'єктом дослідження є процес інтелектуального моніторингу та автоматизованого управління станом замкнутого водного середовища (ЗВС) в умовах багатфакторного впливу та динамічної зміни параметрів екосистеми.

Предметом дослідження є методи, моделі та інструментальні засоби онтологічного інжинірингу, що застосовуються для формалізації знань про взаємозв'язки між сенсорним рівнем, аналітичними модулями та виконавчими механізмами системи керування.

Для досягнення мети дослідження необхідно розглянути наступні задачі:

- проаналізувати застосування онтологічного моделювання для управління замкнутими водними середовищами;
- розробити архітектуру онтологічної моделі бази знань, визначивши ієрархію класів, систему об'єктних властивостей та логічних обмежень для формалізації взаємозв'язків між станами середовища та діями виконавчих механізмів;
- здійснити програмну імплементацію розробленої моделі;
- провести порівняльний аналіз розробленої онтологічної моделі з традиційними реляційними структурами даних.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Традиційні підходи до побудови систем управління замкнутими водними середовищами зазвичай базуються на реляційних моделях даних. Однак, у контексті інтелектуального моніторингу, такі моделі мають суттєві обмеження: вони фіксують лише значення параметрів, але не описують семантичний зміст взаємозв'язків між ними.

Використання онтологій дозволяє перейти від простого збереження даних до **моделювання знань**. Основними особливостями такого підходу є:

- Декларативність: знання про структуру системи (датчики, норми параметрів, типи втручань) відокремлені від програмного коду управління.
- Можливість логічного виведення (Reasoning): онтологія дозволяє автоматично виявляти неявні зв'язки. Наприклад, якщо сенсор S_1 вимірює параметр P_1 , а P_1 критично впливає на життєдіяльність об'єкта O_1 , система може самостійно ідентифікувати загрозу без явного програмування кожного сценарію.
- Семантична інтеграція: онтологія виступає «спільною мовою» для інтеграції кількісних даних (числа з датчиків) та якісних даних (результати аналізу зображень, такі як «каламутність висока» або «поведінка риб аномальна») [6, 7].

Процес розробки запропонованої онтологічної моделі бази знань (ОМБЗ) включав декілька етапів: концептуалізацію, ідентифікацію об'єктів та визначення таксономії зв'язків.

Центральним об'єктом моделі є клас WaterEnvironment, який агрегує інформацію про фізичний стан середовища. Структура моделі побудована за принципом багаторівневої ієрархії:

1. Рівень сприйняття: класи Sensor та ImageAnalyzer. Вони відповідають за збір первинної інформації. Важливою особливістю моделі є те, що ImageAnalyzer розглядається як активний аналітичний агент, що має властивість analyzes відносно середовища та providesInputTo відносно логічного модуля.

2. Рівень параметризації: клас Parameter. Він слугує точкою конвергенції для даних. Об'єкти цього класу мають атрибути unit (одиниця вимірювання) та value (поточне значення). Це дозволяє уніфікувати дані незалежно від типу джерела (фізичний датчик чи програмний алгоритм обробки зображення).

3. Рівень прийняття рішень: класи FuzzyLogicSystem та Rule. Тут зосереджена інтелектуальна складова. Правила (Rule) формалізуються у форматі «Умова–Наслідок» (condition – consequence), що дозволяє використовувати механізми нечіткої логіки для інтерпретації параметрів.

4. Виконавчий рівень: класи Controller, Decision та Action. Вони замикають цикл управління. Клас Controller пов'язаний із конкретними діями (performs Action), які є результатом логічного виведення системи.

Для забезпечення цілісності моделі було визначено ключові предикати. Властивість measures пов'яже сенсори з параметрами, а властивість controls вказує, на які саме параметри впливає конкретний контролер. Зв'язок triggers між класами Rule та Action забезпечує автоматичний перехід від аналізу ситуації до виконавчої команди. Об'єднання отриманих рівнів дозволяє спроектувати повну діаграму класів в UML, що відображено на рисунку 1.

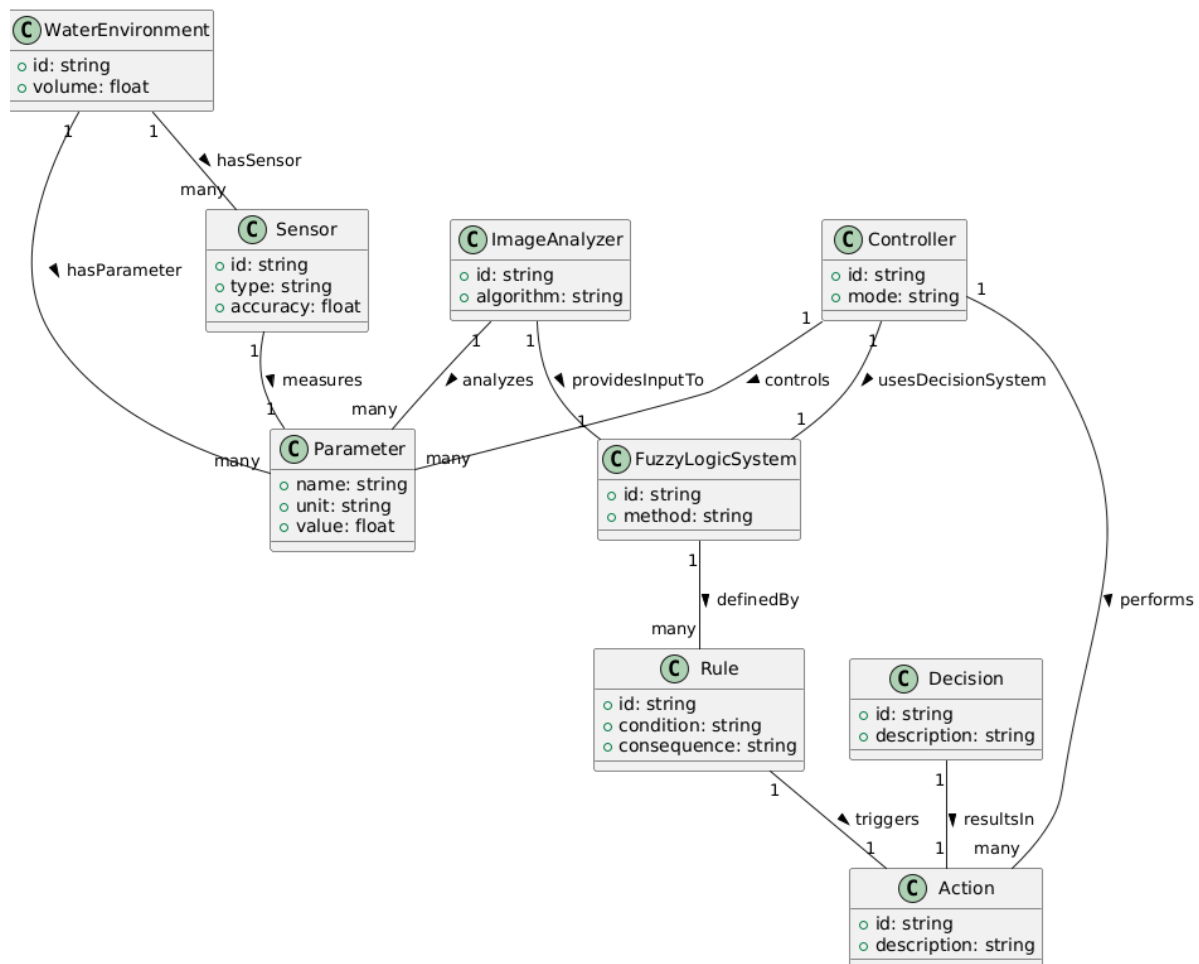


Рис. 1. Діаграма класів онтологічної моделі бази знань системи управління замкнутим водним середовищем

Спроекована діаграма класів дозволяє також побудувати репрезентативну семантичну діаграму онтологічної моделі, де можна визначити конкретні екземпляри класів та відобразити їх зв'язок одне з одним через систему об'єктних властивостей. На рисунку 2 зображена семантична схема для випадку відхилення температури від норми – зв'язок класів та рівнів ієрархії дозволяє прослідкувати шлях від фіксації явища підвищеної температури до активації результатуючих екземплярів на виконавчому рівні, а саме необхідності

ввімкнення охолодження. Така візуалізація демонструє механізм логічного виведення, де кожна технічна операція стає обґрунтованим наслідком аналізу поточного стану середовища, що забезпечує повну прозорість процесу прийняття рішень.

Для практичної реалізації розробленої моделі було використано середовище Protégé 5.5.0 — провідний інструментарій для створення онтологій, що підтримує стандарт мови веб-онтологій OWL 2 [8, 9].

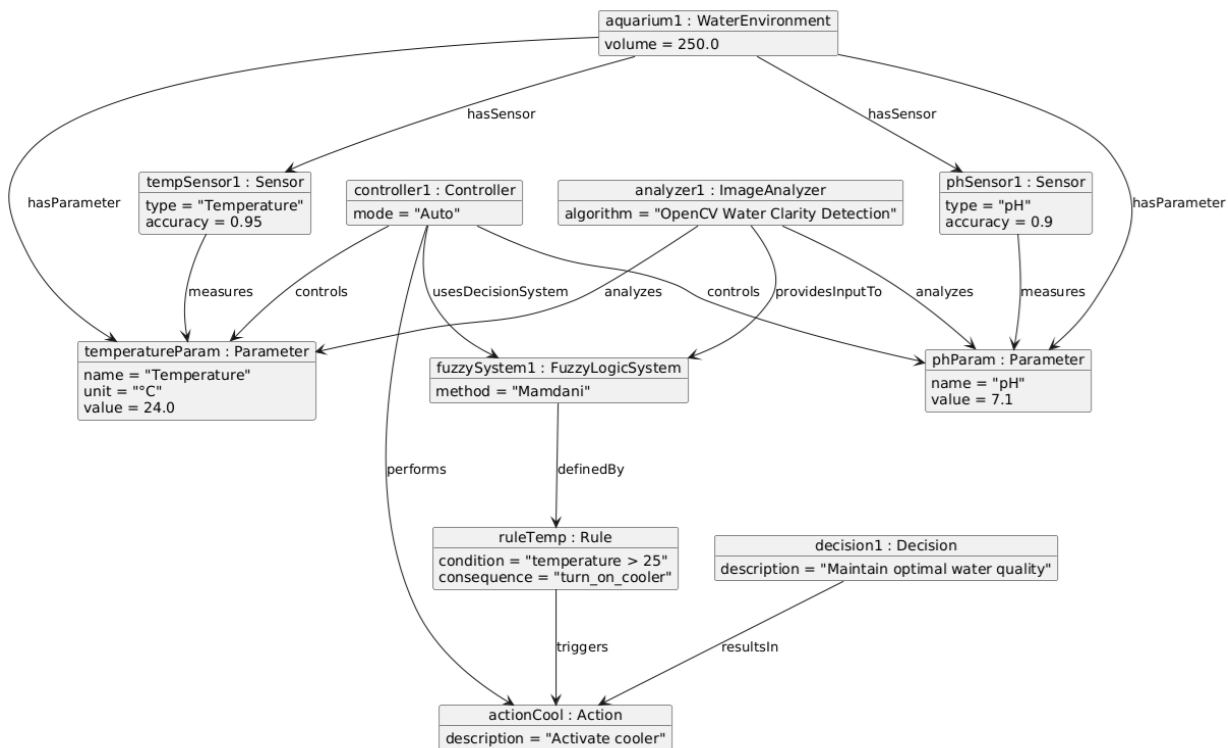


Рис. 2. Графічне зображення семантичної мережі на основі онтологічної моделі бази знань системи управління замкнутим водним середовищем

У вкладці Entities було сформовано дерево класів згідно з розробленою UML-структурою. Визначено диз'юнктивність (взаємне виключення) для базових класів (наприклад, Sensor не може бути Action), що є критичним для коректної роботи логічного виведення (Reasoner). Описано типи зв'язків між класами. Зокрема, для властивості measures (сенсор вимірює параметр) задано область визначення (Domain: Sensor) та область значень (Range: Parameter). Для властивості triggers встановлено характеристику Functional, оскільки конкретне правило ініціює визначену дію. Для верифікації моделі створено екземпляри класів, що описують реальну систему. Наприклад, індивідуум tempSensor1 (тип Sensor) пов'язаний з temperatureParam (тип Parameter) через об'єктну властивість measures. Результатом стала спроектована онтологія, графічне представлення якої наведено на рисунку 3.

Використання вбудованого плагіна HermiT Reasoner дозволило перевірити онтологію на логічну несуперечливість. Всі створені індивідууми пройшли тест на валідність, що підтверджує коректність спроектованої архітектури бази знань [10].

Важливою перевагою онтологічного моделювання є можливість виконання семантичних запитів до бази знань за допомогою мови SPARQL. На відміну від стандартних SQL-запитів, SPARQL дозволяє здійснювати пошук не лише за фіксованими значеннями, а й за логічними зв'язками [11].

Розглянемо деякі приклади застосування запитів для системи управління водним середовищем:

Для коректної роботи системи необхідно знати, які контролери відповідають за які фізичні параметри. Запит дозволяє отримати повну тріаду: параметр, сенсор, що його вимірює, та контролер, що ним керує.

```
PREFIX : <http://example.org/waterenv#>
SELECT ?parameter ?sensor ?controller
WHERE {
    ?sensor a :Sensor ;
           :measures ?parameter .
    ?controller a :Controller ;
           :controls ?parameter .
```

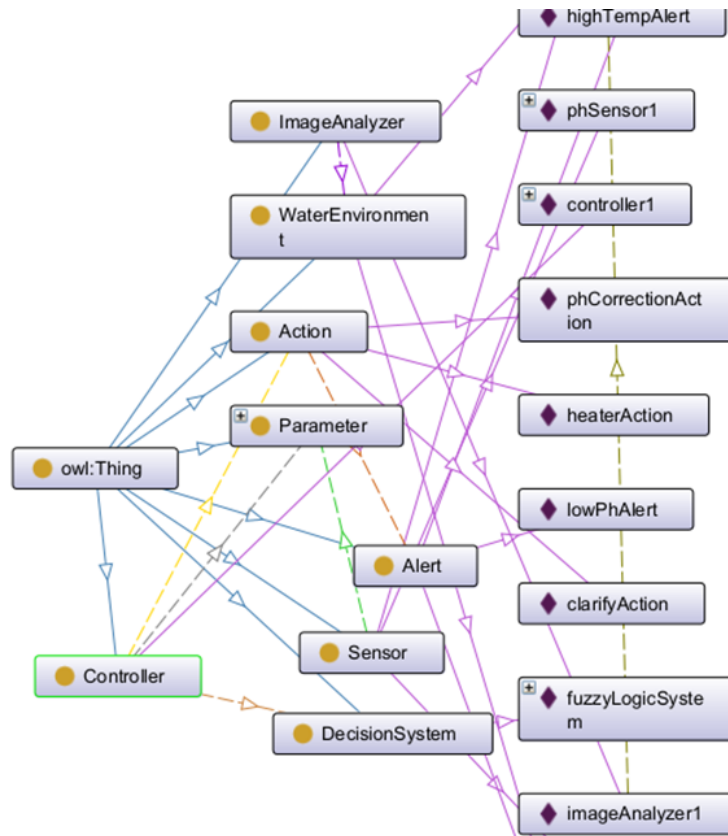


Рис. 3. Графічне представлення онтологічної моделі бази знань системи управління параметрами замкнутого водного середовища

Застосування SPARQL перетворює базу знань на динамічний інструмент, здатний надавати відповіді на складні запити про стан системи в режимі реального часу, що є недоступним для класичних табличних структур.

Якість онтології оцінено за метрикою SUM (Semiotic Quality Model). Даний підхід базується на теорії семіотики, що розглядає модель не лише як набір технічних інструкцій, а як цілісну систему знаків, що репрезентує знання про предметну область. Якість моделі визначається через три фундаментальні рівні семіозису:

1. Синтаксична якість (Q_{syn}): Характеризує ступінь відповідності моделі формальним правилам обраної мови опису (OWL 2 або SQL). Вона визначає структурну цілісність, правильність оголошення зв'язків та відсутність граматичних суперечностей. Високий бал за цим показником гарантує, що модель може бути коректно інтерпретована відповідними програмними засобами (ревзонерами або СУБД).

2. Семантична якість (Q_{sem}): Відображає повноту та достовірність відображення понять реального світу в термінах моделі. Цей рівень оцінює «значеннєве багатство»: здатність моделі описувати складні взаємозв'язки, ієрархії та контекстуальні залежності. Саме на цьому рівні проявляється перевага онтологій у задачах семантичної конвергенції, оскільки вони дозволяють формалізувати не лише дані, а й їхнє внутрішнє значення.

3. Прагматична якість (Q_{pra}): Визначає придатність моделі для досягнення цілей кінцевих користувачів та розробників. Критеріями оцінки є інтерпретованість моделі, її здатність до автоматичного логічного виведення (Inference) та гнучкість до розширення. Прагматичний аспект підкреслює цінність моделі як інструменту підтримки прийняття рішень, що спрощує взаємодію з інтелектуальною системою.

Інтегральний показник Q_{sum} обчислюється як середнє арифметичне зазначених факторів, що дозволяє отримати комплексну кількісну оцінку інтелектуального потенціалу бази знань та обґрунтувати доцільність переходу до онтологічно-орієнтованих архітектур у системах управління ЗВС.

Розрахунок проводився за формулою:

$$Q_{sum} = \frac{Q_{syn} + Q_{sem} + Q_{pra}}{3}, \quad (1)$$

де Q_{sum} – підсумковий показник якості, Q_{syn} – оцінка синтаксичної семіотики, Q_{sem} – оцінка семантичної семіотики, Q_{pra} – оцінка прагматичної семіотики [12].

Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Зведена таблиця оцінок користувачів від користувацького досвіду із табличною і онтологічною моделлю знань

Експерт	Модель	Q_{syn} (Синтаксис)	Q_{sem} (Семантика)	Q_{pra} (Прагматика)	Q_{sum} (Середнє)
Користувач 1	SQL / OWL	9.5 / 9.1	4.6 / 8.7	5.4 / 8.9	6.50 / 8.90
Користувач 2	SQL / OWL	9.4 / 9.3	4.2 / 9.1	5.0 / 9.2	6.20 / 9.20
Користувач 3	SQL / OWL	9.3 / 9.2	4.5 / 8.8	5.4 / 9.0	6.40 / 9.00
Користувач 4	SQL / OWL	9.5 / 9.2	4.8 / 8.4	5.8 / 8.8	6.70 / 8.80
Користувач 5	SQL / OWL	9.4 / 9.1	4.1 / 9.0	4.8 / 9.2	6.10 / 9.10
Користувач 6	SQL / OWL	9.2 / 9.4	4.4 / 9.2	5.3 / 9.3	6.30 / 9.30
Користувач 7	SQL / OWL	9.6 / 9.2	4.7 / 8.7	5.5 / 9.1	6.60 / 9.00
Користувач 8	SQL / OWL	9.4 / 9.2	4.6 / 9.0	5.2 / 9.1	6.40 / 9.10
Користувач 9	SQL / OWL	9.5 / 9.1	4.5 / 8.7	5.5 / 8.9	6.50 / 8.90
Користувач 10	SQL / OWL	9.2 / 9.2	4.3 / 8.8	5.4 / 9.0	6.30 / 9.00
Середнє	SQL / OWL	9.40 / 9.20	4.47 / 8.84	5.33 / 9.05	6.40 / 9.03

Аналіз результатів експертного оцінювання, наведених у таблиці, свідчить про суттєву перевагу розробленої онтологічної моделі (OWL) над традиційним реляційним підходом (SQL) у контексті управління інтелектуальними системами.

Обидві моделі показали високу стабільність із незначною перевагою SQL (9.40 проти 9.20). Найбільший розрив зафіксовано на семантичному рівні. Такі дані емпірично підтверджують, що реляційна схема здатна лише зберігати дані, тоді як онтологічна модель успішно реалізує концепцію семантичної конвергенції, описуючи складні внутрішні взаємозв'язки між сенсорами та біологічними параметрами середовища.

Порівняльний аналіз показав, що розроблена онтологія перевершує традиційні SQL-бази даних за інтегральним показником якості на 41.1%. Найбільший приріст зафіксовано в категоріях семантичного багатства та прагматичної якості, що підтверджує наукову новизну та практичну цінність запропонованого рішення.

Статистична однорідність оцінок усіх 10 користувачів підтверджує достовірність отриманих розрахунків. Таким чином, отримані результати математично обґрунтовують доцільність використання онтологічного моделювання як фундаменту для побудови систем підтримки прийняття рішень у складних екосистемах.

Таким чином, наукова новизна дослідження полягає у розробці комплексної онтологічної моделі бази знань замкнутого водного середовища, що вперше реалізує концепцію семантичної конвергенції різнорідних потоків даних (фізико-хімічних показників та дескрипторів) в межах єдиного логічного контуру. На відміну від традиційних підходів, що базуються на жорстко детермінованих алгоритмах реакції на порогові значення, запропонована модель забезпечує перехід до управління на основі знань, де стан екосистеми інтерпретується як цілісна семантична сукупність.

Практична цінність результатів полягає у створенні універсального інтелектуального ядра для систем підтримки прийняття рішень, використання якого дозволяє підвищити ефективність управління параметрами замкнутого водного середовища порівняно з реляційними архітектурами. Впровадження розробленої моделі у форматі OWL 2 суттєво знижує витрати на масштабування та модернізацію систем автоматизації, оскільки інтеграція нових типів сенсорів або аналітичних модулів потребує лише корекції бази знань без необхідності перепрограмування.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У результаті проведеного дослідження було розроблено та верифіковано онтологічну модель бази знань, яка базується на принципах семантичної конвергенції для інтелектуального управління замкнутими водними середовищами. Доведено, що об'єднання показників фізичних сенсорів та дескрипторів відеоаналітики в єдиному семантичному контурі дозволяє подолати проблему розрізненості даних, забезпечуючи системі цілісне розуміння стану екосистеми для превентивного реагування на аномалії. Сформована ієрархія класів та система об'єктних властивостей підтвердили можливість автономного формування керуючих впливів без втручання в програмний код виконавчих механізмів.

Ефективність запропонованого підходу була підтверджена результатами тестування фокус-групою з 10 профільних користувачів за семіотичною метрикою SUM, де розроблена модель продемонструвала перевагу над традиційними реляційними базами даних на 41,1%. Найбільш вагомий приріст якості зафіксовано в категоріях семантичного багатства та прагматичної гнучкості, що свідчить про високу здатність онтології до логічного виведення нових знань. Крім того, використання розроблених SPARQL-запитів дозволило верифікувати цілісність контурів управління, мінімізуючи ризики логічних помилок на етапі проєктування. Перспективи подальших досліджень полягають у динамічному розширенні бази знань через

інтеграцію апарату нечіткої логіки, що дозволить системі ефективно оперувати лінгвістичними змінними та приймати рішення в умовах природної невизначеності параметрів водного середовища.

Література

1. Li J., Poveda M., Garijo D. Large Language Models for Ontology Engineering: A Systematic Literature Review, 2025 – Режим доступу: <https://www.semantic-web-journal.net/content/large-language-models-ontology-engineering-systematic-literature-review>.
2. Chen J. et al. Ontology Embedding: A Survey of Methods, Applications and Resources. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.10964>.
3. Zhao J. et al. Research on Domain Ontology Construction Based on Content Features. Sci Rep 14, 12134 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62459-4>.
4. J. J. Yi, J. G. Fan, H. Jiang, Y. Cheng, and S. L. Chen, “Developing the Wastewater Monitoring System Based on Ontology,” AMR, vol. 452–453, pp. 1301–1306, Jan. 2012, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.452-453.1301>.
5. Wang, X.; Wei, H.; Chen, N.; He, X.; Tian, Z. An Observational Process Ontology-Based Modeling Approach for Water Quality Monitoring. Water 2020, 12, 715. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030715>.
6. Amini R. et al. Towards Complex Ontology Alignment using Large Language Models DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.10329>.
7. Aminu E. F. et al. A Review on Ontology Development Methodologies for Knowledge Representation Systems. MECS, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijieeb.2020.02.05>.
8. Mark A. Musen. 2015. The protégé project: a look back and a look forward. AI Matters 1, 4 (June 2015), 4–12. DOI: <https://doi.org/10.1145/2757001.2757003>
9. W3C OWL Working Group. (2012). OWL 2 Web Ontology Language Document Overview. W3C Recommendation. – Режим доступу: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>
10. Birte Glimm, Ian Horrocks, Boris Motik, Giorgos Stoilos, and Zhe Wang. 2014. HermiT: An OWL 2 Reasoner. J. Autom. Reason. 53, 3 (October 2014), 245–269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10817-014-9305-1>.
11. SPARQL 1.1 Query Language. W3C Recommendation 21 March 2013. – Режим доступу: <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>
12. Burton-Jones, Andrew & Storey, Veda & Sugumaran, Vijayan & Ahluwalia, Punit. (2005). A semiotic metrics suite for assessing quality of ontologies. Data & Knowledge Engineering. 55. 84-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2004.11.010>.

References

1. Li J., Poveda M., Garijo D. Large Language Models for Ontology Engineering: A Systematic Literature Review, 2025 – Rezhym dostupu: <https://www.semantic-web-journal.net/content/large-language-models-ontology-engineering-systematic-literature-review>.
2. Chen J. et al. Ontology Embedding: A Survey of Methods, Applications and Resources. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.10964>.
3. Zhao J. et al. Research on Domain Ontology Construction Based on Content Features. Sci Rep 14, 12134 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62459-4>.
4. J. J. Yi, J. G. Fan, H. Jiang, Y. Cheng, and S. L. Chen, “Developing the Wastewater Monitoring System Based on Ontology,” AMR, vol. 452–453, pp. 1301–1306, Jan. 2012, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.452-453.1301>.
5. Wang, X.; Wei, H.; Chen, N.; He, X.; Tian, Z. An Observational Process Ontology-Based Modeling Approach for Water Quality Monitoring. Water 2020, 12, 715. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030715>.
6. Amini R. et al. Towards Complex Ontology Alignment using Large Language Models DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.10329>.
7. Aminu E. F. et al. A Review on Ontology Development Methodologies for Knowledge Representation Systems. MECS, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijieeb.2020.02.05>.
8. Mark A. Musen. 2015. The protégé project: a look back and a look forward. AI Matters 1, 4 (June 2015), 4–12. DOI: <https://doi.org/10.1145/2757001.2757003>
9. W3C OWL Working Group. (2012). OWL 2 Web Ontology Language Document Overview. W3C Recommendation. – Rezhym dostupu: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>
10. Birte Glimm, Ian Horrocks, Boris Motik, Giorgos Stoilos, and Zhe Wang. 2014. HermiT: An OWL 2 Reasoner. J. Autom. Reason. 53, 3 (October 2014), 245–269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10817-014-9305-1>.
11. SPARQL 1.1 Query Language. W3C Recommendation 21 March 2013. – Rezhym dostupu: <https://www.w3.org/TR/sparql11-query>
12. Burton-Jones, Andrew & Storey, Veda & Sugumaran, Vijayan & Ahluwalia, Punit. (2005). A semiotic metrics suite for assessing quality of ontologies. Data & Knowledge Engineering. 55. 84-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2004.11.010>