

ОНТОЛОГІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.

Ч. 2. РЕАЛІЗАЦІЯ ОНТОЛОГІЇ ТА ЇЇ ПЕРЕВІРКА

О. С. Омельченко, аспірант

Н. М. Луцька, доктор технічних наук, доцент

Національний університет харчових технологій

Л. О. Власенко, кандидат технічних наук, доцент

Державний торговельно-економічний університет

E-mail: alexmir_98@ukr.net, lutskanm2017@gmail.com, vlasenko.lidia1@gmail.com

Анотація. У статті запропонована реалізація прикладної онтології математичних моделей технологічних об'єктів для проєктування підсистеми підтримки прийняття рішень, що видає рекомендації щодо математичного апарату відносно цілей розробки при автоматизованому управлінні харчовим підприємством. Вона складається з 46 сутностей з відповідними зв'язками, атрибутами та аксіомами, а також реалізована на мові OWL інструментами відкритої платформи Protege з урахуванням існуючих стандартів та рекомендацій. У структурі онтології математична модель представлена у вигляді гілок підкласів з відповідними наборами атрибутами, які характеризується своїм відношенням до моделі вищого рівня. У рамках цієї онтології представлено 17 різновидів відношень. Прикладна онтологія проходила два етапи перевірки: структурну – на основі загальноприйнятих оцінок; логічну – шляхом тестування запитів та мануальної перевірки коректності результатів. Зокрема, наведені приклади підбору моделей з використанням онтології для віртуальних сенсорів. Використання запропонованої онтології в структурі підсистеми підтримки прийняття управлінських рішень збільшує оперативність цих рішень, обґрунтованість керуючих дій та ефективність технологічної складової підприємства. Також онтологія може бути інтегрована в онтологію задач промислових підприємств або в інші доменні онтології.

Ключові слова: математична модель, онтологія, концепт, технологічний процес, зв'язок, автоматизація

Актуальність. Розробка сучасної системи підтримки прийняття управлінських рішень для об'єктів харчової промисловості з розвитком новітніх технологій набуває нового змісту та вимагає нових підходів. Одним з таких підходів є онтологічні бази знань, перевагою яких є поєднання різнотипних промислових даних, відносно швидкі розробка та доступ до інформації, можливість інтеграції з

існуючими онтологіями в різних сферах промислової діяльності, а також наявність стандартизованих методологічних підходів до їх проектування (онтології верхнього рівня) [1]. З іншого боку, через різноманітність задач та великої кількості існуючих онтологій майже неможливо знайти таку, що відповідає конкретній задачі. А існуючі онтології предметних областей або ядра, все ж таки орієнтовані на обмежену множину задач, а їх адаптація потребує суттєвих додаткових ресурсів.

Математичні моделі технологічних об'єктів харчової промисловості є ключовими складовими при розробці ефективних систем управління процесом, комплексом та виробництвом в цілому. Як було зазначено в [2], її розробка потребує значних інтелектуальних, часових та грошових ресурсів. Для скорочення цих витрат доцільно використати онтологічний класифікатор, який за допомогою резонера запропонує рекомендації щодо розробки математичної моделі відповідно з вимогами задачі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині в технічній літературі існує низка статей, які присвячені розробці онтологій в різних галузях та на різних рівнях [3]. Крім того, промислові онтології виділяються окремо від інформаційних. Перші, як правило, мають більше ознак онтологічної бази даних і призначені для семантичної сумісності промислової інформації [4, 5], другі – є більшою мірою семантичною мережею, яка направлена на підтримку прийняття управлінських рішень [6, 7].

У [8] оглядово розглядаються існуючі онтології, розроблені для моделювання виробничого процесу з точки зору життєвого циклу продукту. Класифікуючи ці онтології за трьома вимірами Продукт/Процес/Ресурс, автори прагнуть визначити, як онтології допомагають покращити інформаційну сумісність між різними виробничими системами, програмами та зацікавленими сторонами. Але загалом увага приділяється процесам планування і не охоплює особливостей технологічних процесів. У [9] розглядається використання семантичної мережі та графів знань для Industry 4.0 з точок зору керування інформацією, пов'язаною з обслуговуванням обладнання, оптимізація ресурсів, а також надання своєчасних і на вимогу

виробництва послуг. Увага дослідників зосереджена на покращенні моніторингу виробничих активів.

У [10] запропоновано концептуальну та формальну моделі онтології предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів на базі теорії циклічних функціональних відношень», яка покладена в основу розроблення онтоорієнтованих інформаційних систем для моделювання, аналізу, прогнозування, прийняття рішень циклічних сигналів. Для реалізації також використано Protégé.

Існують статті [11, 12], які намагаються поєднати сильні сторони онтологій як бази знань та як семантично сумісного ресурсу. Саме такий напрям має і ця розробка.

Мета дослідження – реалізація та перевірка онтологічного класифікатора існуючих математичних моделей, який можна інтерпретувати як онтологію ядра (Core ontology) та є основою онтології предметної області (Domain ontology), які разом (Core ontology + Domain ontology) використовуватимуться в системах підтримки прийняття управлінських рішень щодо вибору математичного апарату відносно цілей розробки при автоматизованому управлінні харчовим підприємством.

Матеріали та методи дослідження. Побудова онтології реалізована інструментами платформи Protege. Protege – це редактор онтології з відкритим кодом та система управління знаннями. Завдяки наявності вбудованого semantic reasoner, множині розширень, можливостей побудови різносторонніх зв'язків між сутностями, системи візуального відображення бази знань та підтримки структурованих запитів та параметризованих аксіом, Protege є однією з кращих платформ для побудови онтологій [13].

В обраному інструментальному засобі розроблена онтологія представляється у вигляді графу, який можна описати кортежем:

$$O = \langle X, R, F \rangle, \quad (1)$$

де $X = \{x_i \mid i = \overline{1, n}\}$ – кінцева непуста множина концептів (понять предметної області); $R = \{r_i \mid i = \overline{1, m}\}$ – кінцева множина семантично-значимих відношень між концептами; $F: X \times R$ – кінцева множина функцій інтерпретації, що задані на

концептах та відношеннях. До концептів відносяться класи, підкласи та екземпляри онтології. Відношення поділяються на два види: об'єктні відношення (Object Property) та відношення даних (Data Property). Функції інтерпретації розширюються аксіомами, які можна сформулювати для класів, відношень та екземплярів.

Кожен вид концептів математичної моделі (ММ) виділяє групи моделей за певними властивостями, що по суті є об'єкними відношеннями (рис. 1).

Як зазначалося в першій частині статті на верхньому рівні онтології розміщена модель, підкласом якої є ММ. У структурі онтології ММ представлені у вигляді гілок. Кожна гілка складається з підкласів ММ та характеризується своїм відношенням до моделі за певними властивостями. У рамках запропонованої онтології представлено наступні гілки.

✓	В_залежності_від_структури (Domain>Range)
✓	Використовує (Domain>Range)
✓	За_вмістом_вірогіднісних_компонентів (Domain>Range)
✓	За_належністю_до_ієрархічного_рівня (Domain>Range)
✓	За_способом_отримання (Domain>Range)
✓	За_способом_представлення_властивостей_об'єкта (Domain>Range)
✓	За_способом_представлення_об'єкта (Domain>Range)
✓	За_ступенем_деталізації (Domain>Range)
✓	За_типом_значення (Domain>Range)
✓	За_формою_обробки_та_представленням_інформації (Domain>Range)
✓	За_характером_властивостей (Domain>Range)
✓	За_характером_зміни_змінних (Domain>Range)
✓	Залежно_від_зв'язку_між_вхідними_даними_та_досліджуваними_властивостями (Domain>Range)
✓	Залежно_від_зв'язку_між_вхідною_та_вихідною_змінною (Domain>Range)
✓	Залежно_від_параметрів (Domain>Range)
✓	Залежно_від_поведінки_системи (Domain>Range)
✓	Залежно_від_цільового_моделювання (Domain>Range)

Рис. 1. Типи об'єктних відношень, які реалізує онтологія

□ В залежності від структури (рис. 2).

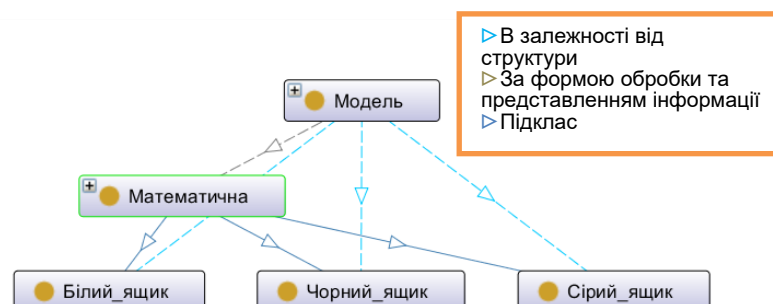


Рис. 2. Гілка типів моделей в залежності від структури

В залежності від вмісту ймовірнісних компонентів (рис. 3).

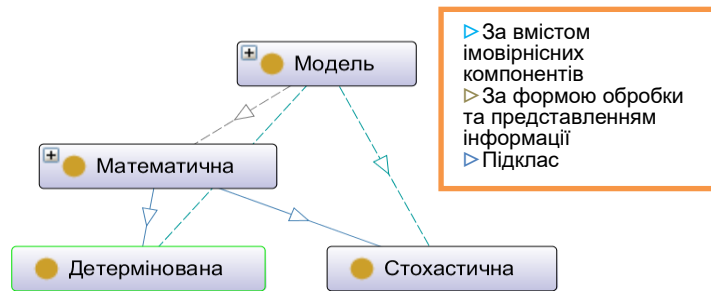


Рис. 3. Гілка типів моделей в залежності від вмісту ймовірнісних компонентів

В залежності від ієрархічного рівня (рис. 4).

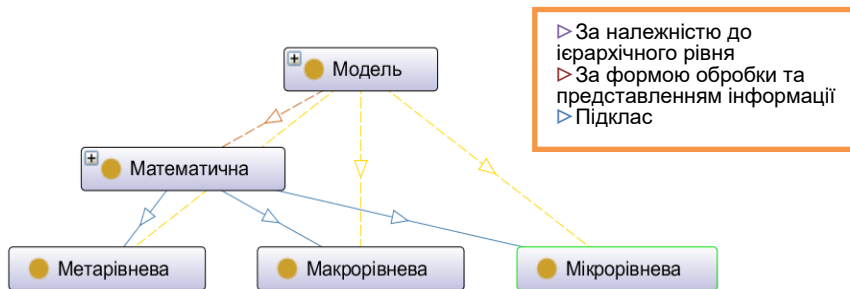


Рис. 4. Гілка типів моделей в залежності від ієрархічного рівня

В залежності від способу отримання (Рис. 5).

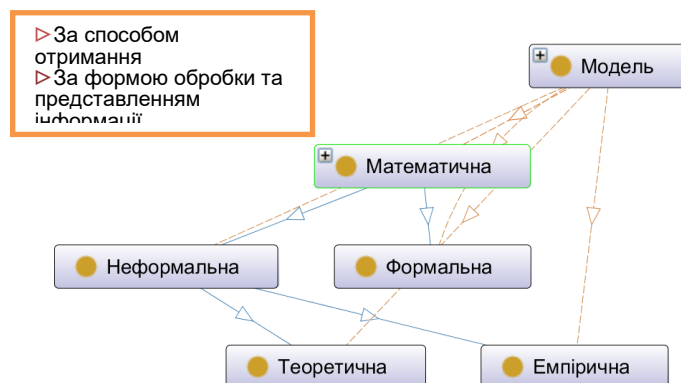


Рис. 5. Гілка типів моделей в залежності від способу отримання

За способом представлення:

- о за способом представлення властивостей об'єкта (рис. 6);
- о за способом представлення об'єкта (рис. 7).

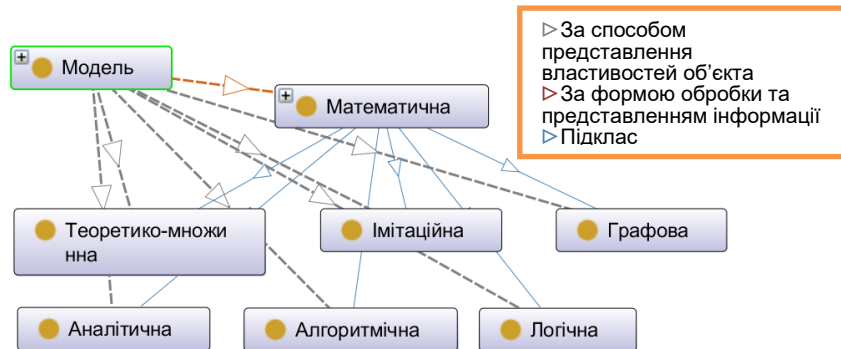


Рис. 6. Гілка типів моделей в залежності від способу представлення властивостей об'єкта

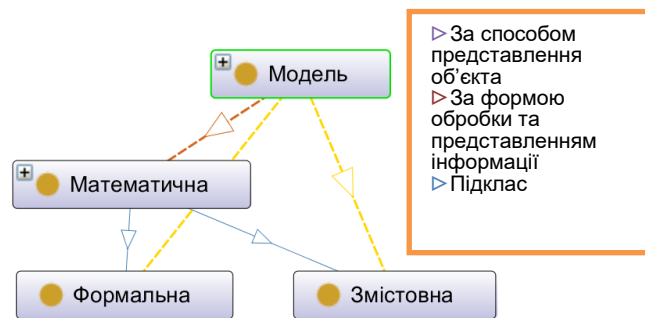


Рис. 7. Гілка типів моделей в залежності від способу представлення об'єкта

- За ступенем деталізації (рис. 8).

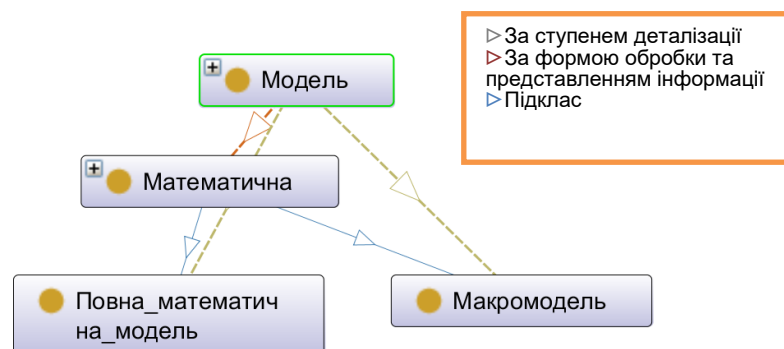


Рис. 8. Гілка типів моделей в залежності від ступеня деталізації

- За типом значення (рис. 9).

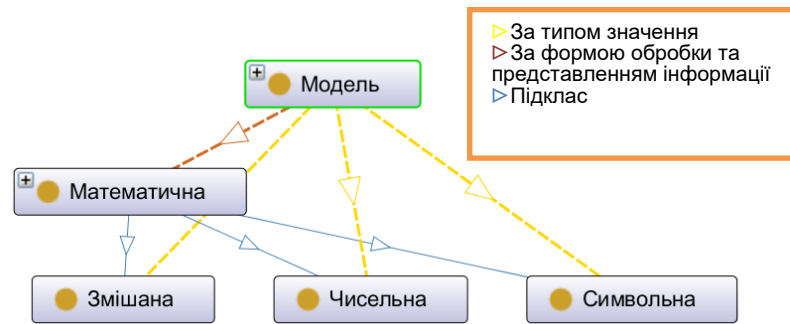


Рис. 9. Гілка типів моделей в залежності від типу значення

□ За характером властивостей (рис. 10).

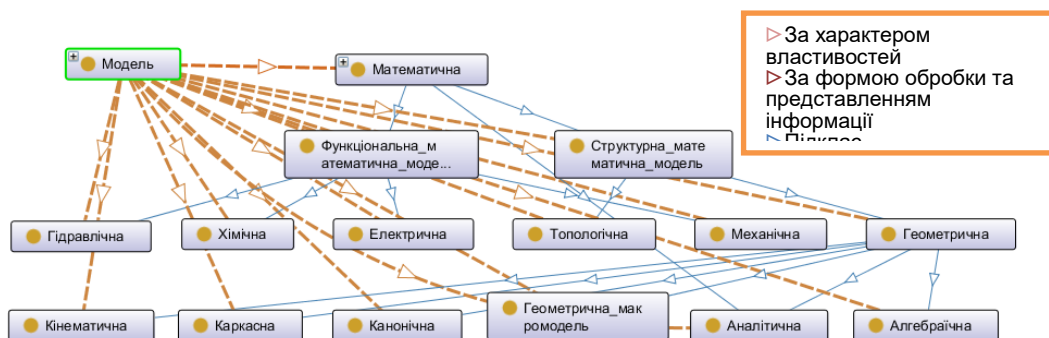


Рис. 10. Гілка типів моделей в залежності від характеру властивостей

□ За характером зміни змінних (Рис. 11).

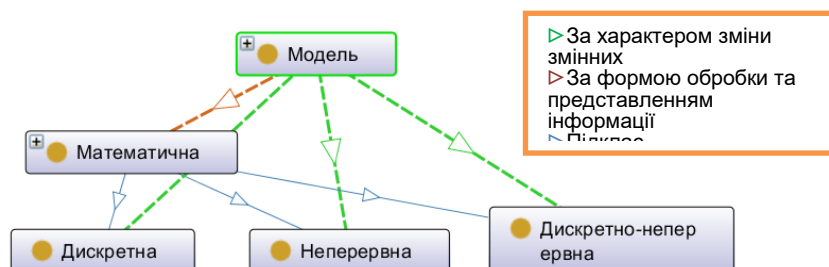


Рис. 11. Гілка типів моделей в залежності від характеру зміни змінних

□ Залежно від зв'язку:

○ залежно від зв'язку між вхідними даними та досліджуваними властивостями (рис. 12);

○ залежно від зв'язку між вхідною та вихідною змінною (рис. 13).

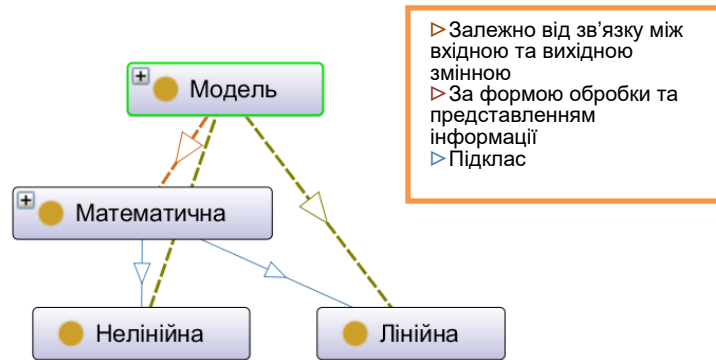


Рис. 12. Гілка типів моделей в залежності від зв'язку між вхідними даними та досліджуваними властивостями

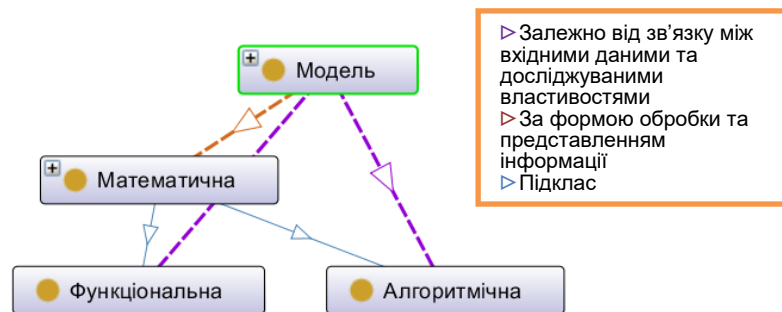


Рис. 13. Гілка типів моделей в залежності від зв'язку між вхідною та вихідною змінною

□ Залежно від параметрів (рис. 14).

□ Залежно від поведінки системи (рис. 15).

□ Залежно від цілей моделювання (рис. 16).

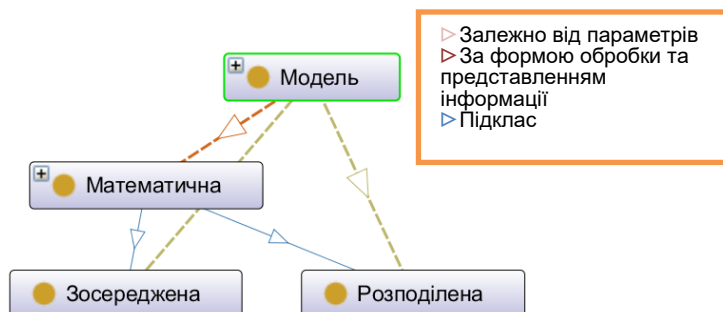


Рис. 14. Гілка типів моделей в залежності від параметрів

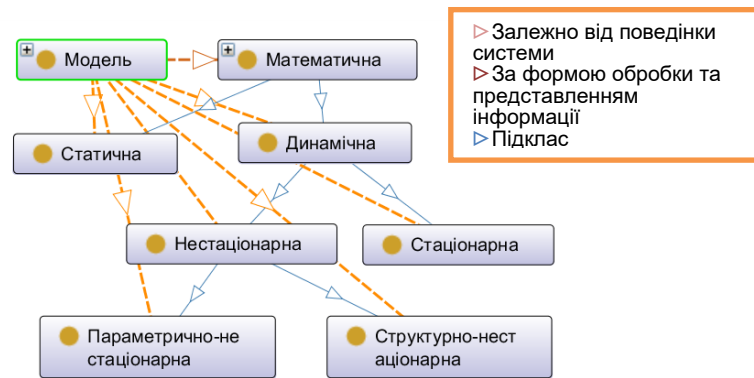


Рис. 15. Гілка типів моделей в залежності від параметрів

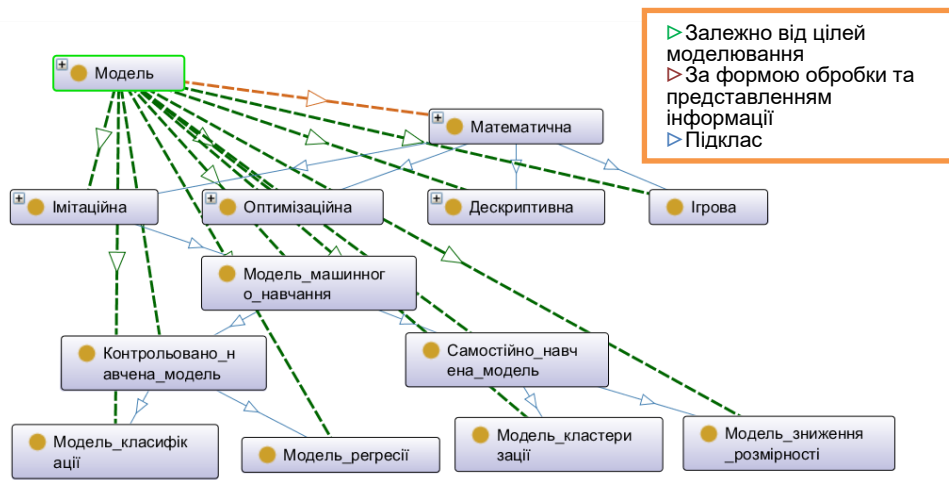


Рис. 16. Гілка типів моделей в залежності від цілей моделювання

Оцінка класичних критеріїв [14–16] цієї онтології показує такі результати:

1) *Узгодженість* – критерій оцінює логічну узгодженість онтології шляхом перевірки інваріантів. Використовуючи OntoDebug плагін, розроблена онтологія перевірялася на узгодженість. Отримали висновок про когерентність та консистентність онтології математичних моделей (рис. 17), що вказує на відсутність суперечливих знань, аксіом, визначень та логічних висновків.

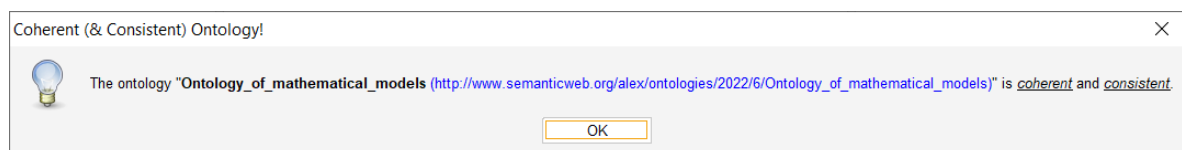


Рис. 17. Результат аналізу плагіном OntoDebug

2) *Класифікація* – цей критерій означає обчислення всіх супутніх підстановок класів між названими класами та задовольняє розробленій онтології.

3) *Тривалість обчислення*. Цей критерій для онтології математичних моделей в середньому складає 400 мс, що є відмінною швидкістю аргументатору та вказує на можливість подальшого розширення онтології без значного навантаження на роботу резонера.

4) *Повнота* – онтологія називається повною, якщо вся викладена інформація чітко визначена або може бути виведена з інших визначень та аксіом. Основна спеціалізація цієї онтології – слугування базою знань для системи підтримки прийняття рішень щодо моделей, які використовуються в межах технологічних об'єктів промислових підприємств. Спроби знайти баланс між надмірною надлишковістю онтології та практичною користю її використання призвели до компромісного результату у вигляді онтології, яка прагне в найбільш оптимальний спосіб задовольнити свою основну спеціалізацію в загальному вигляді. Спроектowana на реалізацію даних особливостей онтологія є неповною в плані моделей, які не застосовуються до технологічних об'єктів та надає базу, на яку можна, при необхідності, розмістити більш спеціалізовані/цільові моделі в залежності від області застосування.

5) *Стислість*. Цей критерій визначає, чи має онтологія зайві терміни. Як зазначалось вище, в процесі розробки надавалася перевага стислості та практичності онтології зі структурою, яка дозволяє потенційно розширювати базу знань за потреби.

6) *Чутливість*. Онтологія вважається чутливою, якщо мінімальні зміни у визначенні безпосередньо впливають на набір когерентних понять і чітко визначених відносин. З цієї точки зору онтологія математичних моделей є нечутливою, оскільки її структура орієнтована на додавання нових визначень, а зміна набору концепцій впливає на обмежену кількість класів завдяки ієрархічній побудові класифікації.

Результати досліджень та їх обговорення. Онтологія здатна оброблювати запити (query). Приклади підбору моделей з використанням онтології наведені для

віртуальних сенсорів. У залежності від вказаних значень Data Property (рис. 18) онтологія пропонує варіанти моделей, що задовольняють цим обмеженням (рис. 19).

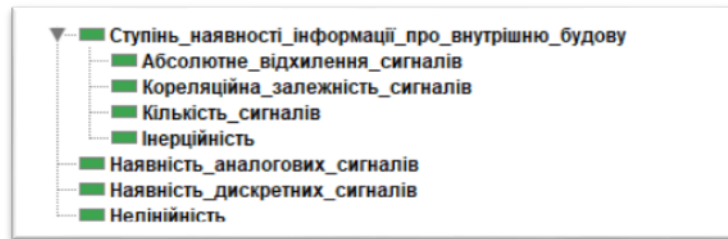


Рис. 18. Property для запиту до онтології

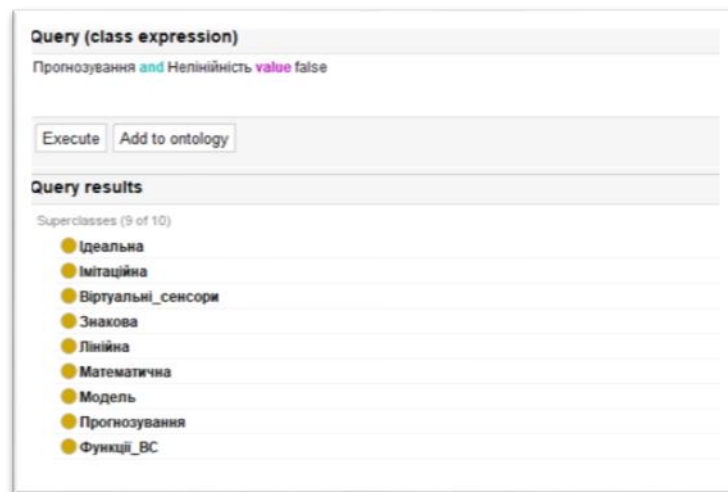


Рис. 19. Приклад простого параметризованого запиту до онтології

Зі збільшенням кількості параметрів запиту онтологія пропонує більш комплексні математичні моделі (рис. 20, 21).

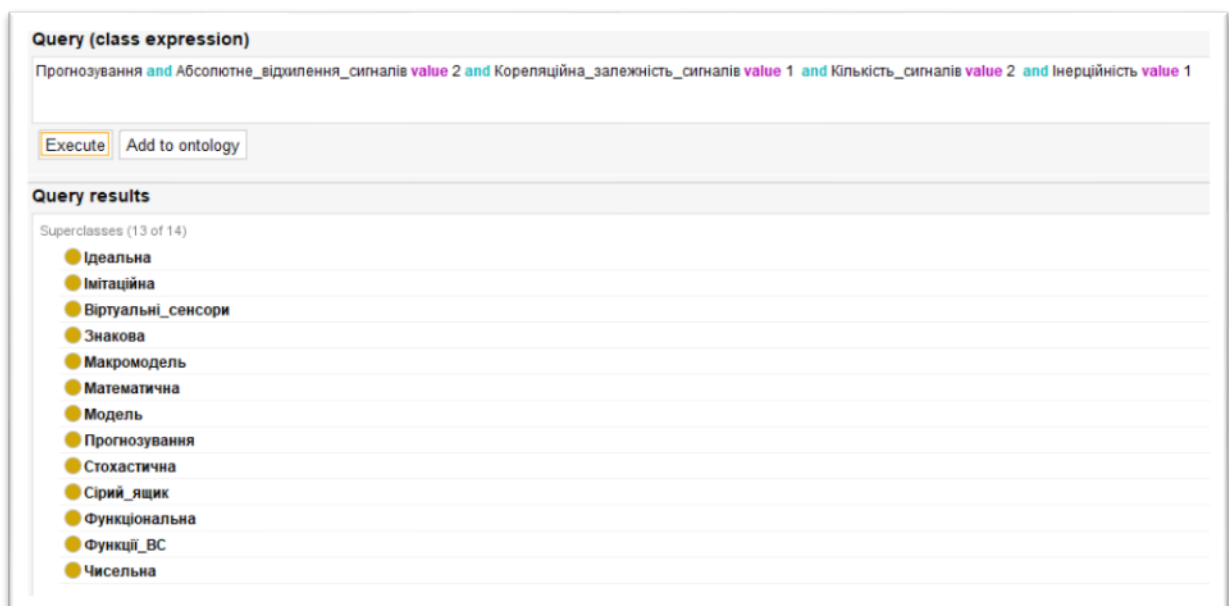


Рис. 20. Приклад комплексного запиту до онтології – рекомендація використання моделі Сірого ящика

Query (class expression)

Аналіз and Абсолютне_відхилення_сигналів value 4 and Кореляційна_залежність_сигналів value 1 and Кількість_сигналів value 2 and Інерційність value 1

Execute Add to ontology

Query results

Superclasses (12 of 13)

- Ідеальна
- Аналіз
- Віртуальні_сенсори
- Дескриптивна
- Знакова
- Математична
- Модель
- Стохастична
- Функціональна
- Функції_ВС
- Чисельна
- Чорний_ящик

Рис. 22. Приклад комплексного запиту до онтології – рекомендація використання моделі Чорного ящика

Таким чином, на основі побудованих зв'язків між концептами та доданих функціональних обмежень (аксіом) можна побудувати різнотипні запити та отримати адекватні результати. Результати тестування підтверджують успішність реалізації онтології математичних моделей.

Висновки та перспективи. Реалізовано прикладну онтологію, що є складовою частиною класифікатора математичних моделей, яка дозволяє формувати запити для науково-практичної діяльності та використовувати отриману інформацію для подальшого проектування систем управління. Ця онтологія є основою для системи підтримки прийняття управлінських рішень. Вона відповідає існуючим стандартам та реалізована мовою OWL, тому може бути легко інтегрована з іншими онтологіями та відповідним програмним забезпеченням за потребою. Перевірка на відповідність загальноприйнятим оцінкам підтвердила структурну коректність рішення. Проведене тестування розробленої онтології на основі різних запитів засвідчило логічну коректність та адекватність її роботи.

Використання класифікатора математичних моделей, що реалізований прикладною онтологією, в структурі підсистеми підтримки прийняття

управлінських рішень збільшує оперативність управлінських рішень, обґрунтованість керуючих дій та ефективність технологічної складової підприємства.

Розроблена онтологія може бути інтегрована в онтологію задач промислових підприємств, що планується в подальших дослідженнях.

Список використаних джерел

1. Cheng, H., Zeng, P., Xue, L., Shi, Z. (2016). Manufacturing Ontology Development Based on Industry 4.0 Demonstration Production Line. Conference: 2016 Third International Conference on Trustworthy Systems and their Applications (TSA), 42–47. doi:10.1109/TSA.2016.17.
2. Омельченко О. С., Луцька Н. М., Власенко Л. О. Онтологія математичних моделей технологічних об'єктів промислових підприємств. Частина 1. Формування основних концептів предметної області. Енергетика і автоматика. 2022. №1 . С. 23-41.
3. Kumar, V. R. S., Khamis, A., Fiorini, S., Carbonera, J. L., Alarcos, A. O., Habib, M., Olszewska, J. I. (2019). Ontologies for industry 4.0. The Knowledge Engineering Review, 34.
4. Bone, M., Blackburn, M., Kruse, B., Dzielski, J., Hagedorn, T., Grosse, I. (2018). Toward an interoperability and integration framework to enable digital thread. Systems, 6(4), 46. doi: 10.3390/systems6040046.
5. Chevallier, Z., Finance, B., Boulakia, B.C. (2020). A reference architecture for smart building digital twin. International Workshop on Semantic Digital Twins (SeDiT). Extended Semantic Web Conference.
6. Dibowski, H., Massa Gray, F. (2020). Applying knowledge graphs as integrated semantic information model for the computerized engineering of building automation systems. Extended Semantic Web Conference, 12123, 616–631. doi: 10.1007/978-3-030-49461-2_36.
7. Chaves-Fraga, D., Priyatna, F., Cimmino, A., Toledo, J., Ruckhaus, E., Corcho, O. (2020). GTFS-Madrid-Bench: a benchmark for virtual knowledge graph access in the transport domain. Journal Web Semantics 65, 100596. doi: 10.1016/j.websem.2020.100596.
8. Cao, Q., Zanni-Merk, C., Reich, C. (2018). Ontologies for Manufacturing Process Modeling: A Survey. 5th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing, 1–10. doi: 10.1007/978-3-030-04290-5_7.
9. Yahya, M., Breslin, G.J., Intizar Ali, M. (2021). Semantic Web and Knowledge Graphs for Industry 4.0. Applied Sciences, 11(11), 5110. doi:10.3390/app11115110.
10. Lupenko, S.A., Lytvynenko, I.V., Zozulya, A.M., Chizoba, N.K., Volyanyk, O.V. (2021). Models, methods and means of ontology development of cyclic signal processing. Journal of hydrocarbon power engineering, 8 (1), 8–17. doi: 10.31471/2311-1399-2021-1(15)-8-17.

11. Ploennigs, J., Semertzidis, K., Lorenzi, F., Mihindikulasooriya, N. (2022). Scaling Knowledge Graphs for Automating AI of Digital Twins. The Semantic Web – ISWC 2022, 810–826. doi:10.48550/arXiv.2210.14596.
12. Bader, S., Grangel-González, I., Nanjappa, P., Vidal, M. (2020). A Knowledge Graph for Industry 4.0. ESWC2020, 1–16.
13. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Available at: <https://protege.stanford.edu/>.
14. Gomez-Perez, A. (2004). Ontology Evaluation. In Handbook on Ontologies. International Handbooks on Information Systems. Springer. doi:10.1007/978-3-540-24750-0_13.
15. Lovrencic, S., Cubrilo, M. (2008). Ontology evaluation – Comprising verification and validation. Proceedings of the Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS 2008). Varazdin, Croatia, 24–26.
16. Parsia, B., Matentzoglou, N., Goncalves, R. S., Glimm, B., Steigmiller, A. (2015). The OWL Reasoner Evaluation (ORE) 2015 Competition Report. J. Autom. Reason, 59, 455–482.

References

- Cheng, H., Zeng, P., Xue, L., Shi, Z. (2016). Manufacturing Ontology Development Based on Industry 4.0 Demonstration Production Line. Conference: 2016 Third International Conference on Trustworthy Systems and their Applications (TSA), 42–47. doi:10.1109/TSA.2016.17.
2. Omelchenko, O.S., Lutska, N.M., Vlasenko, L.O. (2023). Mathematical models ontology of technological objects for industrial enterprises. Part 1. Formation of the basic concepts for the subject area. Energy and automation, 1, 23-41.
 3. Kumar, V. R. S., Khamis, A., Fiorini, S., Carbonera, J. L., Alarcos, A. O., Habib, M., Olszewska, J. I. (2019). Ontologies for industry 4.0. The Knowledge Engineering Review, 34.
 4. Bone, M., Blackburn, M., Kruse, B., Dzielski, J., Hagedorn, T., Grosse, I. (2018). Toward an interoperability and integration framework to enable digital thread. Systems, 6(4), 46. doi: 10.3390/systems6040046.
 5. Chevallier, Z., Finance, B., Boulakia, B.C. (2020). A reference architecture for smart building digital twin. International Workshop on Semantic Digital Twins (SeDiT). Extended Semantic Web Conference.
 6. Dibowski, H., Massa Gray, F. (2020). Applying knowledge graphs as integrated semantic information model for the computerized engineering of building automation systems. Extended Semantic Web Conference, 12123, 616–631. doi: 10.1007/978-3-030-49461-2_36.
 7. Chaves-Fraga, D., Priyatna, F., Cimmino, A., Toledo, J., Ruckhaus, E., Corcho, O. (2020). GTFS-Madrid-Bench: a benchmark for virtual knowledge graph access in the transport domain. Journal Web Semantics 65, 100596. doi: 10.1016/j.websem.2020.100596.
 8. Cao, Q., Zanni-Merk, C., Reich, C. (2018). Ontologies for Manufacturing Process Modeling: A Survey. 5th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing, 1–10. doi: 10.1007/978-3-030-04290-5_7.

9. Yahya, M., Breslin, G.J., Intizar Ali, M. (2021). Semantic Web and Knowledge Graphs for Industry 4.0. *Applied Sciences*, 11(11), 5110. doi:10.3390/app11115110.
10. Lupenko, S.A., Lytvynenko, Ia.V., Zozulya, A.M., Chizoba, N.K., Volyanyk, O.V. (2021). Models, methods and means of ontology development of cyclic signal processing. *Journal of hydrocarbon power engineering*, 8 (1), 8–17. doi: 10.31471/2311-1399-2021-1(15)-8-17.
11. Ploennigs, J., Semertzidis, K., Lorenzi, F., Mihindukulasooriya, N. (2022). Scaling Knowledge Graphs for Automating AI of Digital Twins. *The Semantic Web – ISWC 2022*, 810–826. doi:10.48550/arXiv.2210.14596.
12. Bader, S., Grangel-González, I., Nanjappa, P., Vidal, M. (2020). A Knowledge Graph for Industry 4.0. *ESWC2020*, 1–16.
13. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Available at: <https://protege.stanford.edu/>.
14. Gomez-Perez, A. (2004). Ontology Evaluation. In *Handbook on Ontologies*. International Handbooks on Information Systems. Springer. doi:10.1007/978-3-540-24750-0_13.
15. Lovrencic, S., Cubrilo, M. (2008). Ontology evaluation – Comprising verification and validation. *Proceedings of the Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS 2008)*. Varazdin, Croatia, 24–26.
16. Parsia, B., Matentzoglou, N., Goncalves, R. S., Glimm, B., Steigmiller, A. (2015). The OWL Reasoner Evaluation (ORE) 2015 Competition Report. *J. Autom. Reason.*, 59, 455–482.

MATHEMATICAL MODELS ONTOLOGY OF TECHNOLOGICAL OBJECTS FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES. PART 2. ONTOLOGY IMPLEMENTATION AND VERIFICATION

O. Omelchenko, N. Lutska, L. Vlasenko

Abstract. *The article proposes the implementation of an applied ontology of mathematical models of technological objects for the design of a subsystem of decision-making support, which issues recommendations for the mathematical apparatus in relation to the development goals for the automated management of a food enterprise. It consists of 46 entities with corresponding relationships, attributes, and axioms, and is also implemented in the OWL language by the Protege open platform tools, taking into account existing standards and recommendations. In the structure of the ontology, the mathematical model is represented as branches of subclasses with the corresponding sets of attributes, characterized by their relationship to the higher-level model. Within this ontology, 17 types of relationships are presented. Applied ontology passed two stages of verification: structural - based on generally accepted estimates; logical - by testing queries and manually checking the correctness of the results. In particular, examples of model selection using an ontology for virtual sensors are given. The use of the proposed ontology in the structure of the management decision support subsystem increases the efficiency of these decisions, the validity of management actions and the efficiency of the technological component of the enterprise. Also, the ontology can be integrated into the ontology of industrial enterprises tasks or other domain ontologies.*

Key words: *mathematical model, ontology, concept, technological process, relationship, automation*