

А.В. Калайда, М.П. Пан

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ РОЗУМНИХ БУДІВЕЛЬ НА ПЛАТФОРМІ AZURE DIGITAL TWINS

Розглядається процес створення цифрових двійників розумних будівель на основі платформи Azure Digital Twins. Досліджується використання технологій Azure для моделювання та управління будівлями, а також їхній вплив на ефективність управління та збільшення стійкості інфраструктури. Аналізуються можливості цифрових двійників для оптимізації роботи будівельних систем і покращення умов проживання.

Ключові слова: цифровий двійник, конвеєр, онтологія.

Постановка проблеми

Актуальність створення цифрових двійників розумних будівель на платформі Azure Digital Twins визначається рядом факторів, що відображають сучасні тенденції у будівельній індустрії та управлінні нерухомістю. Зростаюча потреба в ефективному використанні ресурсів, оптимізація енергоефективності та підвищення комфорту користувачів стимулюють перехід до розумних будівельних систем.

Azure Digital Twins надає відмінні можливості для створення цифрових моделей будівель та їхнього віртуального відображення. Це дозволяє впроваджувати інноваційні технології, такі як Інтернет Речей (IoT), штучний інтелект та аналітика даних для вдосконалення управління будівлями.

Однією з ключових актуальних переваг є здатність в реальному часі відстежувати стан систем будівлі, зокрема, витрати енергії, безпеку, вентиляцію та інші аспекти. Це дозволяє оперативно реагувати на поточні проблеми та забезпечує можливість попередження виникнення неполадок.

Крім того, засновані на хмарних технологіях рішення Azure Digital Twins дозволяють збирати, аналізувати та зберігати великі обсяги даних про будівлю. Це відкриває шлях для використання аналітики та машинного навчання з метою прогнозування несправностей, оптимізації використання ресурсів та підвищення загальної ефективності будівлі.

У контексті зростаючих вимог до сталого будівництва та управління енергоефективністю, створення цифрових двійників розумних будівель на платформі Azure Digital Twins є необхідним кроком для досягнення високої продуктивності, зниження витрат та створення комфортних умов для життя та роботи.

Питання створення цифрових двійників розумних будівель на платформі Azure Digital Twins для комунального господарства полягає у важливості оптимізації управління муніципальною інфраструктурою та ресурсами. Це може охоплювати управління енергетикою, водопостачанням, відходами та іншими аспектами комунальних послуг.

У контексті розвитку інформаційних технологій в цілому, створення цифрових двійників розумних будівель відображає потужний рушійний фактор у напрямку цифрової трансформації суспільства. Інтеграція IoT, аналітики даних та штучного інтелекту в управління муніципальною інфраструктурою підвищує ефективність, робить процеси управління більш гнучкими та адаптивними до змін.

Це також сприяє розвитку нових технологічних рішень та послуг, створенню інноваційного екосистеми для співпраці між різними галузями. Інформаційні технології, що базуються на цифрових двійниках розумних будівель, стимулюють розвиток інтелектуальних міст та забезпечують зростання рівня комфорту та якості життя мешканців.

Отже, впровадження цифрових двійників розумних будівель на платформі Azure Digital Twins в комунальному господарстві сприяє ефективному управлінню ресурсами та інфраструктурою, а також є ключовим елементом у розвитку інформаційних технологій загалом, сприяючи створенню сучасних та інтелектуальних міст.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Запропоновано метод побудови моделі цифрового близнюка для захвату робота в середовищі стекування багатьох об'єктів на основі технології цифрового близнюка для реалізації

планування захоплення багатьох об'єктів і віртуально-реальної взаємодії [1].

Муніципалітетам необхідно приймати стратегічні довгострокові рішення щодо міського планування, що часто є складним і тривалим завданням. Цифрові двійники міст можуть допомогти політикам у цьому процесі, забезпечуючи цілісне уявлення про, наприклад, інтенсивність руху, якість повітря та шум [2].

Цифрові близнюки можуть відігравати трансформаційну роль у покращенні експлуатаційних характеристик кількох енергетичних мереж шляхом вивчення впливу впровадження нових технологій, додаткового обладнання, стратегій контролю тощо [3].

Популярний метод побудови цифрової моделі, заснований на одному типі обладнання, не може задовольнити вимоги щодо швидкої побудови та високоякісного відображення моделі на великих дискретних виробничих підприємствах [4].

Цифровий двійник розглядається як віртуальний аналог фізичних об'єктів, який може відображати фізичну поведінку та продуктивність. Технологія цифрового близнюка забезпечує потужну підтримку для досягнення кіберфізичної системи та інтелектуального виробництва [5].

Посилення міжнародної конкуренції посилює тиск на такі компанії, як Atlas Copco, вимагаючи покращити продуктивність своєї продукції; наприклад, елемент Компактного подавача сипучих матеріалів (CBF) компанії «Self Piercing Riveting Machine». Цифрові технології швидко розвиваються для підтримки розробки нових продуктів і процесів [6].

Набір модульних класів цифрових двійників дозволяє створювати розширювані ієрархії цифрових близнюків для моніторингу справності складних систем. У прикладі реалізовано цю структуру для стандартизації результатів виявлення несправностей для систем ущільнень і підшипників промислового насоса [7].

Концепція Digital Twin має потенціал стати корисним інструментом для управління проектами та економічного виробництва. Загальна мета управління ризиками керівниками проектів і пом'якшення непередбачуваної поведінки за допомогою Digital Twin може покращити розвиток виробничих систем [8].

Прогнозне технічне обслуговування — це техніка для створення більш стійкої, безпечної та прибуткової галузі. Однією з ключових проблем для створення систем прогнозованого технічного обслуговування є відсутність даних про несправності, оскільки машину часто ремонтують перед поломкою. Цифрові двійники забезпечують представлення фізичної машини в реальному часі та

генерують дані, наприклад про погіршення якості активів, які може використовувати алгоритм прогнозного обслуговування [9].

Розвиток інформаційних технологій нового покоління дозволив Digital Twins змінити фізичний світ на віртуальний цифровий простір і забезпечити технічну підтримку для побудови Метавсесвіту [10].

Мета статті

Основною метою створення цифрових двійників розумних-будівель на платформі Azure Digital Twins є розробка і впровадження технологічного рішення для створення віртуальних моделей реальних будівельних об'єктів, які дозволять ефективно відслідковувати, контролювати та оптимізувати роботу систем управління будівлями.

Виклад основного матеріалу

Objects and research methods. Розробка цифрових двійників на платформі Azure Digital Twins є важливим етапом в еволюції сучасних технологій, орієнтованих на створення ефективних та інноваційних рішень для управління фізичними об'єктами. Цей процес включає в себе кілька ключових етапів та послідовних кроків, спрямованих на створення точних цифрових відображень реальних об'єктів та їхніх взаємодій для забезпечення ефективного моделювання та управління.

Початковий етап передбачає ретельний аналіз та збір необхідної інформації про фізичні об'єкти, що підлягають моделюванню. На цьому етапі визначаються ключові параметри, характеристики та залежності між об'єктами для подальшої вірної репрезентації у цифровій моделі.

Після цього настає етап створення самої цифрової моделі за допомогою Azure Digital Twins, де враховуються всі зібрані дані та встановлюються взаємозв'язки між об'єктами.

Далі йде етап інтеграції, де цифрові моделі об'єктів об'єднуються в єдину систему, що дозволяє взаємодіяти між собою та іншими системами для забезпечення комплексного управління та аналізу.

Не менш важливим є етап тестування та оптимізації, коли цифрові двійники піддаються випробуванням на відповідність реальності та ефективності управління. Під час цього етапу здійснюється пошук та виправлення помилок, а також вдосконалення системи для досягнення найвищої продуктивності.

У сучасному світі, де технології стають ключовим фактором для оптимізації та ефективного управління, платформа Azure Digital Twins виявляється невід'ємним інструментом для створення цифрових двійників розумних будівель і об'єктів.

Ця інноваційна платформа, розроблена Microsoft, відкриває перед інженерами, архітекторами та управителями нерухомістю цілий спектр можливостей, які перетворюють спосіб ведення бізнесу та управління майном.

Однією з головних переваг Azure Digital Twins є його здатність до створення повноцінних цифрових двійників об'єктів реального світу. Це означає, що будь-який фізичний об'єкт, будівля або система може бути відтворена у віртуальному просторі з усіма його характеристиками, станами та функціями. Такий цифровий двійник створює можливість для постійного моніторингу, аналізу та оптимізації реального об'єкта в реальному часі.

Ще однією ключовою перевагою платформи є її гнучкість та масштабованість. Azure Digital Twins дозволяє інтегрувати велику кількість датчиків і IoT пристроїв, що забезпечує збір величезних обсягів даних.

Ще однією перевагою платформи є її вбудована безпека та здатність до інтеграції з іншими сервісами хмарних технологій Microsoft. Це надає користувачам можливість працювати в захищеному середовищі та інтегрувати рішення для аналізу даних, штучного інтелекту та багато іншого.

У підсумку, платформа Azure Digital Twins виявляється потужним інструментом для створення цифрових двійників розумних об'єктів, який відкриває перед сучасними підприємствами безліч можливостей для оптимізації, моніторингу та ефективного управління нерухомістю.

Онтології, які використовуються для створення цих цифрових моделей, представляють собою формальні моделі знань, що описують поняття, терміни та взаємозв'язки в конкретній області. Їхня основна мета - створення спільного розуміння та стандартизація інформації для використання в системах, які обробляють дані.

Побудова цифрових двійників з використанням онтологій передбачає створення моделі, яка відображає всі аспекти реального об'єкта. Це включає в себе його структуру, властивості, характеристики та можливі стани. Наприклад, у випадку розумної будівлі це може бути модель будівлі, яка включає в себе інформацію про системи опалення, вентиляції, кондиціювання, освітлення, безпеки та багато іншого.

Онтологічний підхід дозволяє створювати моделі, які не лише точно відображають фізичні характеристики об'єктів, а й забезпечують структуроване розуміння взаємозв'язків між різними елементами. Це дозволяє ефективно аналізувати дані, передбачати можливі зміни та реагувати на них в реальному часі.

Застосування онтологій для створення цифрових двійників виявляється ключовим етапом в

розвитку індустрії IoT та смарт-технологій. Це не лише сприяє віртуальному моделюванню об'єктів, але й відкриває двері для інноваційних рішень у сфері аналітики даних, прогнозування та автоматизації процесів управління.

Отже, побудова моделей цифрових двійників за допомогою онтологій виявляється необхідним кроком у цифровій трансформації, що дає змогу не лише точно відтворювати об'єкти у віртуальному середовищі, але й ефективно аналізувати та оптимізувати їх функціонування.

Зважаючи на те, що побудова цифрових моделей за допомогою онтологій в основному ґрунтується на створенні відносин між об'єктами та їх властивостями, формули можуть відображати концепції, пов'язані з онтологіями.

Однією з основних складових онтологій є відношення між об'єктами. Предикати чи відношення, які описують ці взаємозв'язки, можна виразити формулою:

$$R(x,y) \quad (1),$$

де R – це предикат або відношення між об'єктами x та y .

Онтологія цього проекту реалізована на основі онтології предметної області RealEstateCore [11].

RealEstateCore – це широко використовувана мова, що служить для моделювання та керування будівлями, сприяючи спрощенню розробки нових сервісів. Вона забезпечує загальні структури даних для опису властивостей нерухомості, таких як будівлі, приміщення, системи енергопостачання, вентиляції, опалення, системи безпеки тощо. Цей стандарт використовується для створення єдиної мови обміну даними між різними системами, що дозволяє краще управляти нерухомістю, зменшувати витрати на обслуговування та ефективніше використовувати ресурси.

В цьому дослідженні проводиться реалізація цифрового двійника на прикладі розумної будівлі адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова.

Створення цифрового двійника адміністративного корпусу дозволить не лише віртуалізувати фізичні компоненти будівлі, але і створити платформу для аналізу даних, візуалізації та прийняття рішень на основі цих даних. Це забезпечить більш ефективне використання енергетичних ресурсів, підвищить рівень безпеки, спростить процеси обслуговування та технічного обслуговування будівлі.

Для створення цифрового двійника було використано методики та інструменти, базовані на платформі Azure Digital Twins від Microsoft. Процес розробки включав в себе кроки зі збору даних про будівлю, включення сенсорів та IoT-пристроїв для моніторингу, а також створення віртуальної моделі,

яка включає три поверхи адмінбудівлі 9 кімнат, 2 робочі зони і 3 конференц зали. На 1-й поверху – конференц-зал музейного комплексу, на 2-му поверху – конференц-зал №2 і на 3-му поверху – аудиторія студентська аудиторія №368 на дві групи з можливістю проведення студентських відеоконференцій (рис. 1). Для проектування моделі

розумної будівлі були розроблені декілька моделей, де окремі кімнати – це створені цифрові двійники на основі розроблених моделей.

Моделі створюються на основі json файла на мові Digital Twins Definition Language (рис. 2).

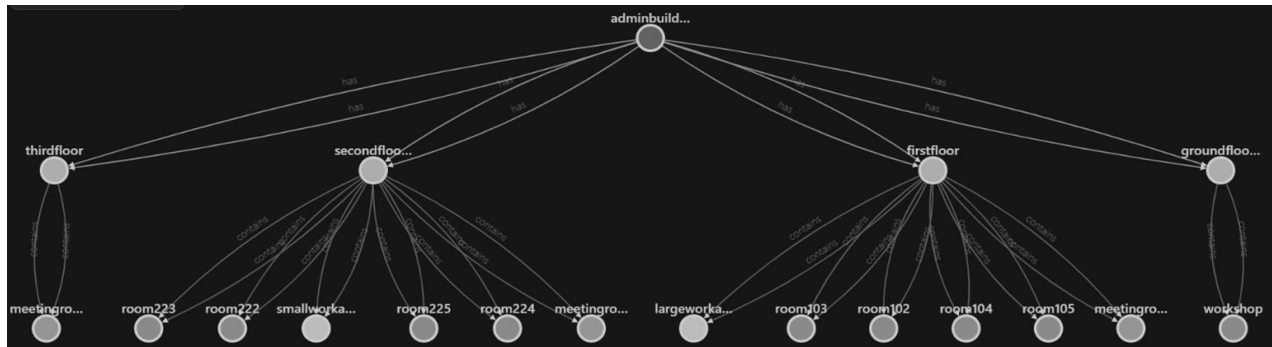


Рис. 1. Цифрові двійники адмінбудівлі ХНУМГ ім. О.М.Бекетова

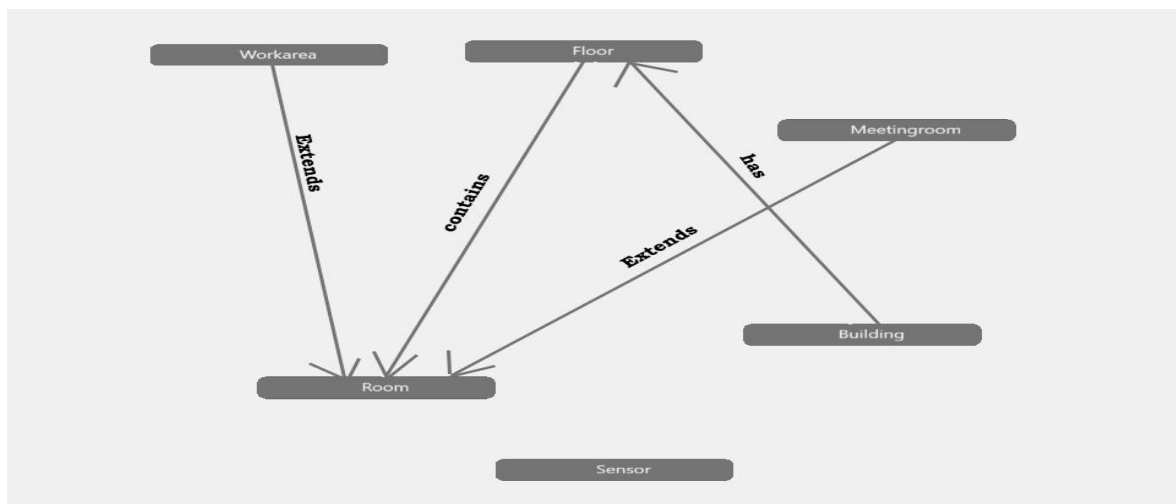


Рис. 2. Графічна модель цифрових двійників

Building має (has) поверхи (Floor), Поверхи (Floor) містить в собі (contains) кімнати(Room), Кімната для відеоконференцій (conferenceroom) поширюється (Extends), або унасліджується від кімнати (room), робоча зона(Workarea) поширюється (Extends) або унасліджується від кімнати (room) також.

Створений цифровий двійник адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова дозволяє постійно відстежувати різні параметри телеметрії, такі як температура, вологість та інше у реальному часі. Це дає можливість оперативно реагувати на можливі відхилення параметрів телеметрії, оптимізувати використання ресурсів, та покращувати умови для працівників та відвідувачів.

Результати даної роботи відображають потенціал та переваги використання цифрових двійників розумних будівель на прикладі

адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. Це свідчить про важливість використання сучасних технологій для покращення управління будівлями та забезпечення ефективного використання ресурсів.

Висновки

Дана стаття демонструє можливості та переваги створення цифрових двійників розумних будівель з використанням платформи Azure Digital Twins, що відкриває нові можливості для оптимізації управління будівлями та підвищення їхньої ефективності, висвітлює процес розробки цифрового двійника адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, що є важливим кроком у напрямку використання сучасних технологій для управління будівлями та підвищення ефективності їхньої експлуатації.

У майбутньому планується подальше розширення функціональності цифрового двійника з використанням аналітики даних та системи машинного навчання Azure Machine Learning Studio для прогнозування можливих параметрів телеметрії, а також інтеграція з системами управління для автоматизації процесів в адміністративному корпусі ХНУМГ ім. О.М. Бекетова.

References

1. Juntong Yun, Gongfa Li, Du Jiang, Manman Xu, Feng Xiang, Li Huang, Guozhang Jiang, Xin Liu, Yuanmin Xie, Bo Tao, Zifan Fang (2023) Digital twin model construction of robot and multi-object under stacking environment for grasping planning. *Applied Soft Computing* Volume 149, Part A, December 2023, 111005, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111005>.
2. Walter Lohman, Hans Cornelissen, Jeroen Borst, Ralph Klerkx, Yashar Araghi, Erwin Walraven (2023) Building digital twins of cities using the Inter Model Broker framework. *Future Generation Computer Systems* Volume 148, November 2023, Pages 501-513, <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.06.024>.
3. Hang Tian, Haoran Zhao, Haoran Li, Xiaoli Huang, Xiaoyi Qian, Xu Huang (2023) Digital twins of multiple energy networks based on real-time simulation using holomorphic embedding method, Part II: Data-driven simulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* Volume 153, November 2023, 109325, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109325>.
4. Dongjie Zhang, Zhifeng Liu, Fuping Li, Yongsheng Zhao, Caixia Zhang, Xin Li, Yueze Zhang (2023) The rapid construction method of the digital twin polymorphic model for discrete manufacturing workshop. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Volume 84, December 2023, 102600, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102600>.
5. Xiaolang Yang, Xuemei Liu, Heng Zhang, Ling Fu, Yanbin Yu (2023) Meta-model-based shop-floor digital twin architecture, modeling and application. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Volume 84, December 2023, 102595, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102595>.
6. Ahmed Al-Ashaab, Nik Fadilah, Faiz Djafri, Sai Nikhil Kumar Jaini, Glyn Fargher b, Hugo Chester (2023) Development of Digital Twin of a Compact Bulk Feeder to Optimise its Functionality. *Procedia Computer Science*

- | | | | | |
|---|------|-------|-------|----------|
| Volume | 217, | 2023, | Pages | 536-542, |
| https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.249 . | | | | |
7. Maxwell Toothman, Birgit Braun, Scott J. Bury, James Moyné, Dawn M. Tilbury, Yixin Ye, Kira Barton (2023) A digital twin framework for prognostics and health management. *Computers in Industry* Volume 150, September 2023, 103948, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103948>.
 8. Brian Hickey, Dr Carine Gachon, Dr John Cosgrove (2023) Digital Twin – A Tool for Project Management in Manufacturing. *Procedia Computer Science* Volume 217, 2023, Pages 720-727, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.268>.
 9. Raymon van Dinter, Bedir Tekinerdogan, Cagatay Catal (2022) Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology* Volume 151, November 2022, 107008, <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>.
 10. Zhihan Lv, Shuxuan Xie, Yuxi Li, M. Shamim Hossain, Abdulmoteleb El Saddik (2022) Building the metaverse using digital twins at all scales, states, and relations. *Virtual Reality & Intelligent Hardware* Volume 4, Issue 6, December 2022, Pages 459-470, <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.06.005>.
 11. RealEstateCore Consortium: Karl Hammar, Erik Wallin, Per Karlberg, Peter Hartlev, Joakim Eriksson November 6 2020.

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.С. Плюгін, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: КАЛАЙДА Андрій Володимирович
магістр зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E – mail – andrii.kalaida@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1711-7305>

Автор: ПАН Микола Павлович
кандидат технічних наук, доцент кафедри
комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
E – mail – pan@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5174>

CREATING DIGITAL TWINS OF SMART BUILDINGS ON THE AZURE DIGITAL TWINS PLATFORM

A.V. Kalaida, M.P. Pan

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The relevance of developing digital twins of smart buildings on the Azure Digital Twins platform is shaped by numerous factors reflecting contemporary trends in the construction industry and property management. The escalating demand for resource efficiency, optimizing energy usage, and augmenting user comfort are propelling the shift towards intelligent building systems. Azure Digital Twins presents remarkable capabilities for crafting digital models of buildings and their virtual representation. This enables the integration of innovative technologies like the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and data analytics to enhance building management. A key contemporary advantage lies in the real-time tracking of a building's systems, encompassing energy consumption, security, ventilation, and various facets. This facilitates prompt responses to ongoing issues and proactively prevents malfunctions.

In the context of escalating demands for sustainable construction and energy-efficient management, creating digital twins of smart buildings on Azure Digital Twins becomes a necessary step towards achieving high productivity, cost reduction, and fostering comfortable living and working environments. The creation of digital

twins for smart buildings on the Azure Digital Twins platform holds significance in municipal infrastructure management and resource optimization. This encompasses energy management, water supply, waste management, and other aspects of municipal services. In the broader context of overall IT development, creating digital twins of smart buildings reflects a powerful driver towards societal digital transformation. Integrating IoT, data analytics, and artificial intelligence into municipal infrastructure management heightens efficiency, rendering management processes more flexible and adaptive to change.

Information technologies based on digital twins of smart buildings stimulate the advancement of intelligent cities, elevating residents' comfort and quality of life. The ontological approach allows for constructing models that not only accurately reflect physical object characteristics but also ensure a structured understanding of relationships between different elements. This enables efficient data analysis, prediction of potential changes, and real-time responsiveness.

The application of ontologies in constructing digital twins emerges as a pivotal stage in IoT and smart technology industry evolution. It not only aids in virtual object modeling but also unlocks doors for innovative solutions in data analytics, forecasting, and management process automation.

Keywords: *digital twin, pipeline, ontology.*