

І. В. Босенко

*аспірант кафедри інформаційних технологій
проектування та прикладної математики*

ORCID: 0000-0002-9046-4380

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ШЛЯХИ РОЗВИТКУ ОНТОЛОГОКЕРОВАНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ БУДІВЕЛЬНО-ТЕХНІЧНИХ ЕКСПЕРТИЗ

Об'єктом дослідження є процес оцінки технічного стану об'єктів будівельно-технічної експертизи. Предметом дослідження є онтологічний підхід до формалізації знань і методи машинного навчання, що здатні вирішувати задачу оцінки технічного стану об'єктів що зазнали пошкоджень чи руйнувань. Показано, що зростання масивів фізичних руйнувань, відсутність структурованого механізму обробки експертної інформації і потреба в координації дій між різними установами актуалізують необхідність побудови формалізованої і нормативно узгодженої системи підтримки прийняття експертних рішень. Розглянуто можливість застосування онтологічного підходу до формального представлення знань про предметну область будівельно-технічної експертизи. Наведено структуру онтології з переліком компонентів і описано етапи її створення. Сформовано таксономічний ряд, у якому визначено класи об'єктів, конструктивні елементи, типи пошкоджень, множини факторів впливу та джерела нормативно-правової бази. Обґрунтовано необхідність інтеграції методів машинного навчання як інструменту узагальнення даних у межах онтологічної структури. Наведено приклади алгоритмів, доцільних для вирішення задачі оцінки технічного стану об'єктів, зокрема метод градієнтного бустингу дерев рішень, випадковий ліс, метод опорних векторів і метод найближчих сусідів. Підкреслено, що система має забезпечувати прозорість, пояснюваність та відповідність нормативним вимогам, залишаючи остаточне рішення за експертом. Результати дослідження можуть бути використані для побудови системи підтримки прийняття рішень щодо визначення технічного стану об'єктів будівельно-технічної експертизи та надання висновку для подальшого відновлення.

Ключові слова: *інформаційна система, машинне навчання, модель, таксономічний ряд, технічний стан, онтологія.*

Вступ. Повномасштабна збройна агресія Російської Федерації проти України, яка розпочалася у лютому 2022 року, призвела до масштабних руйнувань будівель, споруд і об'єктів інфраструктури країни. Наразі уже зафіксовано більше 160 тисяч пошкоджених або зруйнованих об'єктів, що є лише попередньою цифрою, оскільки точно підрахувати кількість

неможливо через триваючі бойові дії [1]. Масштаби руйнувань охоплюють десятки регіонів і вимагають систематичного, прозорого та науково обґрунтованого підходу до процесу їхньої оцінки та відновлення.

На практиці процес оцінки технічного стану (ТС) пошкоджених об'єктів є складним, багатоетапним і залежить від досвіду експертів. Зазвичай експертні висновки оформлюються у вигляді актів, що містять напівструктуровані або неструктуровані дані щодо обстеження, і це суттєво ускладнює автоматизацію подальших етапів прийняття рішень [2].

В умовах післявоєнної відбудови критично важливим завданням стає створення ефективних механізмів управління інформацією щодо пошкоджених об'єктів. Відсутність уніфікованої системи збору, обліку, класифікації та аналізу технічного стану будівель суттєво ускладнює процес формування пріоритетів реконструкції, реставрації, ремонту, подальшої експлуатації чи демонтажу, розподілу ресурсів і забезпечення контролю за якістю їх відновлення. Крім того, враховуючи необхідність узгодження дій між різними органами державної влади, місцевого самоврядування і експертними установами, постає нагальна потреба в інтеграційній інформаційній платформі, яка дозволить об'єднати розрізнені дані у єдиний інформаційний простір.

Актуальність дослідження обумовлена не лише масштабами фізичних руйнувань, а й потребою в інструменті, що забезпечить системну підтримку процесу прийняття рішень щодо відновлення пошкоджених об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Раніше, в [3] колективом авторів Київського національного університету будівництва і архітектури та Київського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України було запропоновано модель інформаційно-комунікаційної системи підтримки процесу відновлення будівель, споруд і об'єктів інфраструктури. В цій роботі також описано процес комунікації між учасниками процесу відновлення та можливості застосування безпілотних літальних апаратів і супутникових знімків для пришвидшення проведення обстежень.

Стаття [4] представляє концепцію інтелектуальної системи підтримки процесу оцінки ТС об'єктів будівництва. Ця система призначена для автоматизації підготовки експертних висновків щодо ТС будівель і споруд із дефектами і передбачає використання нечіткої логіки в поєднанні з нейро-нечіткою мережею Такагі-Сугено-Канга [5]. При чому передбачалось, що база знань системи відтворює формалізовані знання експертів у вигляді нечітких правил, а штучна нейронна мережа інтегруючись з системою правил навчається для більш точного визначення ТС об'єкта. Проте це дослідження проводилося для об'єктів будівництва, які зазнають впливів вібраційних навантажень в містких умовах.

У дослідженні [6] розглядається формування експертних висновків зі встановленням причин погіршення ТС об'єктів поряд з якими проводилися ремонтні роботи, відбувалися негативні зміни під час експлуатації або впливу природних чи антропогенних чинників. Для визначення зв'язків між погіршенням ТС об'єктів БТЕ і факторами впливу, що могли спричинити ці погіршення, в [6] пропонувалося використовувати нечіткі правила типу «якщо-то» в поєднанні з штучною нейронною мережею типу ARTMAP. Ця система також не була реалізована через недостатню невирішеність задачі відображення експертних знань на карту пам'яті ARTMAP.

Системи на основі нечітких правил добре підходять для висновків на основі даних, границі між якими розмиті, як при оцінці ступеня пошкодження конструкцій за лінгвістичними шкалами. Водночас нечіткі системи зазвичай не мають чітко визначеної структури, що ускладнює інтеграцію таких знань з іншими джерелами інформації або з нормативно-правовими документами. Крім того, масштабування систем на основі нечітких правил зазвичай вимагає значного ручного налаштування та не забезпечує автоматичної валідації знань.

Наразі великий обсяг руйнувань і пошкоджень будівель і споруд, які зазнали впливів зброї, став джерелом даних для навчання штучних нейронних мереж, впровадження яких в процес виконання будівельно-технічної експертизи (БТЕ) може надати можливість зменшити час, що витрачається експертами. Проте вся відповідальність за технічні рішення і висновки БТЕ покладається на експертів [7]. Це означає, що в основі усіх рішень і висновки має бути чинна нормативно-правова база і усі моделі штучного інтелекту мають навчання з учителем. Саме тому цю роботу спрямовано на розвиток онтологокерованих систем підтримки процесу БТЕ, яка буде поєднувати дані з технічної експертизи, нормативної бази і соціальну значущість з моделями штучного інтелекту, що базуються на зрозумілій експерту логіці. Створення такої системи не лише сприятиме підвищенню ефективності відновлення України, але й забезпечить прозорість, підзвітність і стратегічну сталість цього процесу в довгостроковій перспективі.

На цьому тлі онтологічний підхід демонструє низку ключових переваг, які дозволяє інтегрувати знання, що походять з різних джерел – експертних висновків, нормативних документів, даних обстежень – у єдину формальну структуру.

По-перше, онтологічний підхід забезпечує чітке формальне представлення понять, відношень і обмежень у предметній області. По-друге, підтримує логічне виведення на основі формальних правил, зберігаючи повну прозорість процесу. По-третє, онтологічна модель розширюється новими класами і властивостями без потреби повного перебудовування системи. Саме ці характеристики є визначальними в умовах післявоєнного відновлення, де кожне технічне рішення має бути не лише обґрунтованим інженерно, а й юридично вивіреном. При цьому

онтологічний підхід не виключає використання елементів нечіткої логіки і модулів машинного навчання, а виступає ядром формалізованих знань, забезпечуючи інтероперабельність, нормативну відповідність, логічну узгодженість та пояснюваність результатів.

Метою статті є розвиток онтологічного підходу до вирішення задачі автоматизації оцінки технічного стану об'єктів нерухомості.

Основні завдання включають:

- систематизацію і структуризацію концептів онтології системи підтримки будівельно-технічної експертизи;
- обґрунтування доцільності інтеграції моделей машинного навчання в процес виконання будівельно-технічної експертизи для інтелектуальної обробки даних щодо технічного стану об'єктів експертизи.

Виклад основного матеріалу. Онтологія в інформаційних технологіях – це структуроване, формалізоване представлення знань про предметну область [8].

Онтологія описує об'єкти і їх властивості, зв'язки між об'єктами і властивостями та обмеження чи правила, що діють у цій системі. В загальному онтологія це структурована карта знань, яка дозволяє: розуміти предметну область, обробляти зв'язки між поняттями, здійснювати логічні висновки і автоматизувати аналіз, оцінку чи прогнозування [9].

Такий підхід дозволяє:

- підвищити інтероперабельність даних між різними інституціями;
- здійснювати автоматизований висновок на основі логіки класів і правил;
- підтримувати узгоджену маніпуляцію і аналіз даних експертами.

Розробка онтології передбачає такі етапи:

1. Визначення мети і призначення онтології;
2. Визначення домену і області застосування;
3. Визначення цільової аудиторії і користувачів;
4. Побудова таксономічного ряду;
5. Визначення джерел знань;

Онтологія будується з таких компонентів [10]:

- Домен – предметна область, яку описує онтологія;
- Концепт (поняття, клас) – елемент знань, який формалізується в рамках певного домену;
- Підклас (спеціалізоване поняття) – поняття, що деталізує або звужує зміст батьківського поняття;
- Індивід (об'єкт) – конкретний представник певного класу;
- Властивість (атрибут, відношення) – характеристика або зв'язок між поняттями;

- Таксономія – структуроване упорядкування понять за принципом «загальне → конкретне»;
- Аксиома – формальне твердження, що описує обмеження або закономірність між об'єктами;
- Описова логіка – формальна логічна база для побудови онтологій;
- Онтологічна модель – сукупність класів, властивостей, зв'язків і правил у рамках одного домену.

В цій роботі:

- метою онтології є автоматизоване формування висновків БТЕ;
- призначення онтології є пояснення результатів роботи моделі;
- доменом онтології є будівельно-технічна експертиза;
- областю застосування онтології є система підтримки БТЕ;
- користувачами онтології є експерти, які проводять оцінку ТС, надають висновок і рекомендації щодо подальшої експлуатації, ремонту, реконструкції чи демонтажу;
- експерти також оцінюють рівень пошкодження об'єктів, пріоритизують їх відновлення, уточнюють апріорні правила і таким чином формують аксиоми і описову логіку онтології системи підтримки БТЕ;
- фрагмент таксономічного ряду понять області БТЕ онтології показано на рис.1.

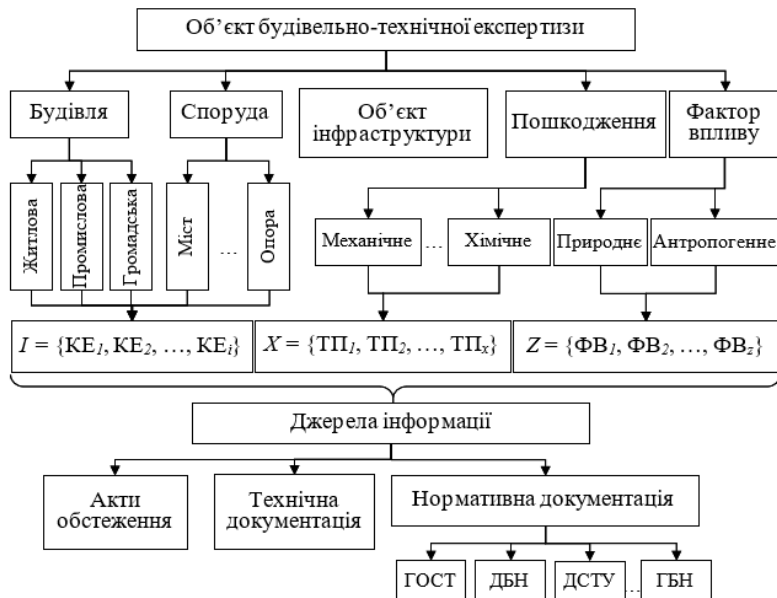


Рис. 1. Фрагмент таксономічного ряду «Об'єкт БТЕ»

На рис. 1 і надалі прийняті такі скорочення і позначення: I – множина конструктивних елементів, X – множина типів пошкоджень, Z – множина факторів впливу, $ТП_x$ – x -ий тип пошкодження, KE_i – i -ий конструктивний елемент, FB_z – z -ий фактор впливу.

Хоча онтологія забезпечує чітке формалізоване представлення знань у предметній області БТЕ, сучасні виклики, пов'язані з великою кількістю об'єктів, різноманітністю пошкоджень і неповнотою інформації, що вимагає додаткових інструментів адаптивного аналізу.

Штучні нейронні мережі складні для інтерпретації, механізми прийняття рішень у таких мережах базуються на чисельній оптимізації великої кількості вагових коефіцієнтів і не мають очевидної логічної структури, що значно ускладнює пояснення результатів. Крім того, побудова нейронної мережі потребує великих вибірок навчальних даних, які будуть мати однакову структуру вхідних ознак, однаковий масштаб і тип представлення даних. В умовах війни це є суттєвим обмеженням, що пов'язане з неповнотою інформації і складністю представлення її в придатній для навчання формі. До того ж нейронні мережі мають складну архітектуру, а також чутливі до зміни вхідних даних. Це робить їх менш стабільними і важчими у підтримці. Окрім того потрібно врахувати економічний аспект, навчання і розгортання нейронних мереж є ресурсоемними і за часом і за обчислювальними витратами, що суперечить вимогам оперативності та ефективності в умовах післявоєнного відновлення.

Моделі машинного навчання, демонструють низку суттєвих переваг над штучними нейронними мережами. Вони легко реалізуються навіть при обмежених вибірках даних, можуть ефективно працювати з недосконалими або частково відсутніми ознаками, потребують менше ресурсів для навчання, зберігають стабільність результатів при повторному запуску і мають високу узагальнюючу здатність. Важливо, що результати цих моделей можуть бути пояснені у вигляді логічно зрозумілих правил, які узгоджується з нормативними підходами до оцінки, що дає змогу не лише підтримувати обґрунтованість експертних рішень, а й забезпечити прозорість результатів для контролюючих і правових органів. Крім того, завдяки широкому програмному забезпеченню та наявності відкритих бібліотек реалізацій, впровадження таких моделей є економічно доцільним, бо потребує мінімальних витрат на навчання фахівців та не потребує високопродуктивної обчислювальної техніки. Такі переваги роблять моделі машинного навчання найбільш продуктивним вибором у критичних умовах війни, коли ключове значення мають і час, і стабільність, і прозорість.

Напрямами застосування моделей машинного навчання в онтологокерованій системі підтримки БТЕ включають: класифікацію ступеня пошкодження конструктивних елементів на основі технічних

параметрів, прогнозування необхідності ремонту або демонтажу на основі прийнятих рішень, ранжування об'єктів за пріоритетністю відновлення з урахуванням їхнього соціального, географічного й конструктивного профілю, а також виявлення не типових ситуацій, що потребують повторного обстеження.

На відміну від онтологічного підходу, який базується на дедуктивному механізмі із заздалегідь заданих правил, моделі машинного навчання реалізують індуктивну логіку – вони дозволяють автоматично вивчати структуру даних, будувати класифікатори, прогнозувати ТС об'єктів і виявляти нетипові конфігурації пошкоджень. У поєднанні з онтологією це дає змогу заповнювати прогалини в знаннях, формувати попередні рекомендації для експертів, а також оперативно обробляти дані в умовах невизначеності, неповноти даних, обмеження часу і людських ресурсів.

Серед моделей машинного навчання, які здатні вирішувати задачу оцінки ТС об'єктів, доцільно досліджувати [11-12]:

- Gradient boosting decision tree – реалізації XGBoost, LightGBM, CatBoost, які забезпечують високу точність, гнучкість налаштування та можливість оцінки важливості ознак;

- Random Forest, як ансамблевий метод для стійкої класифікації зі збереженням інтерпретованості через візуалізацію дерев і середнє голосування;

- Support Vector Machines, як особливо ефективний у випадках з обмеженим числом навчальних прикладів та чіткою межевою структурою класів;

- k-Nearest Neighbors для попередньої класифікації нових або частково описаних об'єктів за принципом подібності.

Висновки. Сформовано концепт онтології «Об'єкт БТЕ», що включає базові компоненти і сутності системи підтримки будівельно-технічної експертизи. Розроблено таксономічний ряд, що відображає структуру понять домену БТЕ. Обґрунтовано доцільність інтеграції моделей машинного навчання як інструменту узагальнення експертних рішень і обробки даних у рамках онтологічної моделі. Подальші наукові дослідження заплановано спрямувати на розширення концептів онтології і адаптацію моделей машинного навчання для вирішення задачі автоматизації оцінки технічного стану об'єктів нерухомості.

Список використаної літератури

1. Колісніченко О., 2,4 мільйона українців втратили домівки за час війни. Що з обіцянним житлом від держави? *Економічна правда*, 2022, URL: <https://epravda.com.ua/publications/2022/11/7/693516>

2. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 43 с.

3. S. Terenchuk, R. Pasko, A. Buhrov, V. Ploskyi, O. Panko and V. Zapryvoda, Computerization of the process of reconstruction of damaged or destroyed real estate, 2022 *IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1-6, DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916470.
4. Командиров, О. В. Дослідження моделей, методів і засобів оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах навантажень і впливів транспортних магістралей *Управління розвитком складних систем*, 2020, №43, С. 104 – 109, DOI: [dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2020.43.104-109](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.104-109).
5. Командиров О.В., Куліков П.М., Плоский В.О., Єременко Б.М. Застосування штучної нейро-нечіткої мережі Такаґи – Сугено – Канґа до оцінки технічного стану об'єктів будівництва, *Управління розвитком складних систем*, 2020, № 42, С. 107 – 112, DOI: [dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2020.42.107-112](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.107-112).
6. Куліков П.М., Пасько Р.М., Плоский В.О., Теренчук С.А., Застосування штучних нейронних мереж в експертних системах підтримки судових будівельнотехнічних експертиз, *Управління розвитком складних систем*, 2019, №40, С. 118 – 124, DOI: [dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.11969058](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11969058)
7. Інструкція про призначення та проведення судових експертиз та експертних досліджень, затверджена наказом Міністерства юстиції України 08.10.1998 №53/5 (із змінами) [Електронний ресурс]. - Режим доступу: zakon.rada.gov.ua/go/z0705-98
8. Піднебесна Г.А., Онтології та їх значення для розвитку сучасних інформаційних технологій, *Індуктивне моделювання складних систем*: 36. наук. пр. — К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2017, №9, С. 174-187, URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Imss_2017_9_19
9. Arp R., Smith B., & Spear A. D., *Building Ontologies with Basic Formal Ontology*, 2015, MIT Press, p. 248.
10. Reyes-Peña C. & Tovar-Vidal M., *Ontology: Components and Evaluation, a Review. Research in Computing Science*, 2019, Vol. 148(3), p. 257–265, DOI: <https://doi.org/10.13053/rcs-148-3-21>
11. Mienye I. D. & Sun Y., *A Survey of Ensemble Learning: Concepts, Algorithms, Applications, and Prospects. IEEE Access*, 2022, Vol. 10, p. 99129-99149, DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3207287>
12. Xu Y., Zhou Y., Sekula P., & Ding L. Machine learning in construction: From shallow to deep learning. *Developments in the Built Environment*, 2021, Vol. 6, p. 100045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100045>

References

1. O. Kolisnichenko, (2022), 2.4 million Ukrainians lost their homes during the war”, URL: <https://epravda.com.ua/publications/2022/11/7/693516>
2. DSTU-N B V.1.2-18:2016. (2017). Guidelines for inspecting buildings and structures to determine and assess their technical condition. Kyiv: SE “UkrNDNC”.
3. Terenchuk, S., Pasko, R., Buhrov, A., Ploskyi, V., Panko, O., & Zapryvoda, V. (2022). Computerization of the process of reconstruction of damaged or destroyed real estate. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916470>
4. Komandyyrov, O. (2020). Research of models, methods and means of assessment of technical condition of construction objects in the conditions of loads and influences of transport magistres. *Management of Development of Complex Systems*, 43, 104 – 109, DOI: [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.104-109](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.104-109).
5. Komandyyrov, O., Kulikov, P., Ploskyi, V., & Yeremenko, B., (2020). Use of Artificial Neuro-Fuzzy Network Takagi Sugeno-Kang to the Assessment of Technical Condition of Construction Objects. *Management of Development of Complex Systems*, 42, 107 – 112, DOI: [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.107-112](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.107-112).
6. Kulikov, P., Pasko, R., Ploskyi, V., & Terenchuk, S., (2019). Application of artificial neural networks in expert systems for support of vessels. *Management of Development of Complex Systems*, 40, 118 – 124, DOI: [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11969058](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11969058)
7. Ministry of Justice of Ukraine. (1998). Instruction on the appointment and conduct of forensic examinations and expert studies (Order No. 53/5 of 08.10.1998, with amendments). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0705-98>
8. Pidnebesna, H. A. (2017). Ontologies and their significance for the development of modern information technologies. *Inductive Modeling of Complex Systems: Collection of Scientific Papers*, (9), 174–187. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Imss_2017_9_19
9. Arp, R., Smith, B., & Spear, A. D. (2015). Building Ontologies with Basic Formal Ontology. MIT Press.
10. Reyes-Peña, C., & Tovar-Vidal, M. (2019). Ontology: Components and Evaluation, a Review. *Research in Computing Science*, 148(3), 257–265, URL: <https://doi.org/10.13053/rcs-148-3-21>
11. Mienye, I. D., & Sun, Y. (2022). A Survey of Ensemble Learning: Concepts, Algorithms, Applications, and Prospects. *IEEE Access*, 10, 99129–99149, URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3207287>
12. Xu, Y., Zhou, Y., Sekula, P., & Ding, L. (2021). Machine learning in construction: From shallow to deep learning. *Developments in the Built Environment*, 6, 100045, URL: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100045>

Ihor Bosenko

Development paths of ontology-driven support systems for building-technical expertise

The object of the research is the process of assessing the technical condition of objects within the scope of building-technical expertise. The subject of the study is the ontological approach to knowledge formalization and machine learning methods capable of solving the problem of evaluating the technical condition of damaged or destroyed structures. It is demonstrated that the increasing scale of physical destruction, the absence of a structured mechanism for processing expert information, and the need for coordination among different institutions highlight the necessity of developing a formalized and normatively consistent decision support system for experts. The paper explores the applicability of the ontological approach to the formal representation of knowledge in the field of construction and technical assessment. The structure of the ontology is outlined, along with its components and the stages of its development. A taxonomic model has been constructed, defining classes of structures, structural elements, types of damage, sets of influencing factors, and sources of the regulatory framework. The integration of machine learning methods as a tool for inductive data generalization within the ontological framework is substantiated. Examples of relevant algorithms are provided, including gradient boosting of decision trees, random forest, support vector machines, and the k-nearest neighbors method. It is emphasized that the system must ensure transparency, explainability, and compliance with regulatory requirements, while leaving the final decision to the domain expert. The results of this study can be used to develop a decision support system for assessing the technical condition of structures and formulating recommendations for their restoration.

Keywords: *information system; machine learning; model; taxonomic row; technical condition; ontology.*

Посилання на статтю:

АРА: Bosenko, Ihor (2023). Development paths of ontology-driven support systems for building-technical expertise. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 52(3), 207-216.

ДСТУ: Босенко І. В. Шляхи розвитку онтологокерованих систем підтримки будівельно-технічних експертиз. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2023. № 52(3). С. 207-216.