https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.195

УДК 624.21

Зеленський Б. М., *https://orcid.org/0000-0002-9949-3209*

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТІВ: ПЕРЕВАГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Анотація

Вступ. Ця стаття досліджує використання штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів та прогнозування строку служби споруд. Вона окреслює актуальність цієї проблеми, проводить аналіз останніх досліджень і публікацій, визначає мету та завдання дослідження, а також описує основний матеріал, отримані результати, висновки та перспективи подальших досліджень.

Проблематика. Моніторинг технічного стану мостів та прогнозування їх строку служби вимагає досить багато часу для обробки отриманих результатів обстеження і визначення реального технічного стану елементів мосту.

Мета. Проаналізувати можливість застосування штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів та прогнозування строку їх служби. Встановити достовірність отриманих даних порівняно із традиційними методами оцінки технічного стану.

Матеріали та методи. Для проведення аналізу можливості використання штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів використовуються доступні ресурси та бази даних в мережі Інтернет. У якості початкових даних для проведення оцінки використовуються діючі на території України державні стандарти та нормативні документи.

Результати. Проведено аналіз закордонних джерел щодо наявного програмного забезпечення для впровадження штучного інтелекту в систему моніторингу технічного стану споруд.

Висновки. Впровадження програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів значно покращить і прискорить процес аналізування, оцінювання, підготовки висновків і рекомендацій щодо подальшої експлуатації транспортних споруд.

Ключові слова: аналіз даних, датчики, моніторинг технічного стану, мости, прогнозування, штучний інтелект.

Вступ

Мости є важливим елементом інфраструктури та вимагають постійного моніторингу для забезпечення безпеки та ефективності транспортних систем. Традиційні методи моніторингу технічного стану мостів мають свої обмеження, тому все більшу популярність набуває використання штучного інтелекту для цієї задачі.

Останні дослідження та публікації в галузі моніторингу мостів показують, що використання штучного інтелекту може значно поліпшити ефективність та точність процесу моніторингу. Дослідники використовують методи машинного навчання для аналізу даних, отриманих з різних датчиків та систем моніторингу. Це дозволяє автоматично виявляти аномалії, проводити класифікацію пошкоджень та передбачати строк служби мостових елементів.

Наукові дослідження та публікації, пов’язані із використанням штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів, активно проводяться у наукових галузях, таких

як цивільна інженерія, комп'ютерна наука та штучний інтелект. Так у дослідженні «Application of Artificial Intelligence Techniques for Bridge Structural Health Monitoring» [1] автор розглядає застосування методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, генетичних алгоритмів та глибокого навчання, для моніторингу технічного стану мостів. Результати дослідження показують ефективність використання штучного інтелекту в оцінці стану мостових споруд. У роботі «Artificial intelligence applications in bridge engineering: State-of-the-art and future prospects» [2] досліджуються різні методи та алгоритми штучного інтелекту, які застосовуються для аналізу технічного стану мостів, автори обговорюють переваги та обмеження різних підходів і наголошують на необхідності подальших досліджень для вдосконалення систем моніторингу мостів.

У статті «Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks» [5] досліджується застосування глибокого навчання та нейронних мереж для виявлення тріщин та пошкоджень в мостових спорудах. Вони пропонують методологію, яка використовує згорткові нейронні мережі для автоматичного виявлення дефектів. У роботі "Bridge Defect Detection Using Unmanned Aerial Vehicles and Deep Learning Techniques» [6] розглядається використання безпілотних літальних апаратів (дронів) та методів глибокого навчання для виявлення дефектів на мостах. Вони досліджують різні архітектури нейронних мереж та алгоритми оброблення зображень для автоматичного виявлення дефектів на основі відеозаписів, зроблених дронами

Ці дослідження та публікації свідчать про активний інтерес до застосування штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Вони демонструють потенціал штучного інтелекту для виявлення дефектів, прогнозування строку служби та оптимізації планування ремонтів. Проте, багато з цих досліджень ще потребують додаткових експериментів і практичних випробувань для підтвердження ефективності та надійності систем моніторингу, що використовують штучний інтелект.

Метою ж цього дослідження є визначення переваг і перспектив використання штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Завданнями роботи є аналіз літературних джерел та проведення огляду останніх досліджень, опис основного матеріалу дослідження, представлення отриманих результатів, формулювання висновків і визначення перспектив подальших досліджень у цьому напрямку.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) в системі моніторингу технічного стану мостів має великий потенціал і відкриває нові перспективи для підвищення ефективності та надійності інфраструктури. Розглянемо детальніше переваги та перспективи використання ШІ у системі моніторингу мостів, а також технічне забезпечення, методи та обладнання, що використовуються для збору даних та аналізу.

До переваг використання штучного інтелекту можна віднести:

– покращену точність і швидкість аналізу даних, так як ШІ може обробляти великі обсяги даних, отриманих з датчиків, відео або зображень, забезпечуючи точні результати. Алгоритми машинного навчання та глибокого навчання дозволяють автоматично виявляти аномалії та пошкодження, що прискорює процес оцінки стану мостів;

– раннє виявлення пошкоджень: ШІ може аналізувати велику кількість параметрів технічного стану мостів та виявляти навіть незначні відхилення, що дозволяє вчасно вживати заходів для запобігання подальшим пошкодженням елементів мостів і забезпечення, відповідно, безпеки;

– прогнозування строку служби, так як ШІ може використовувати історичні дані про мостові споруди, а також враховувати вплив зовнішніх чинників, щоб передбачити строк служби мостів та оптимальний час для ремонту або заміни елементів;

– наявність економічної ефективності використання ШІ через зменшення витрат на

проведення обстежень та оцінку технічного стану мостів. Автоматизований процес збору та аналізу даних дозволяє знизити людський фактор, витрати на робочу силу та час, а також забезпечити ефективніше планування обслуговування та ремонту.

Слід зазначити, що для реалізації системи моніторингу технічного стану мостів з використанням штучного інтелекту необхідне певне технічне забезпечення. Це і датчики різних типів (датчики вібрації, температури, деформації тощо), використання яких дозволяє збирати реальні дані про стан мостових споруд. Ці дані передаються через IoT-мережу для подальшого аналізу та обробки. Це і дрони, з високоякісними камерами та відео, та візуальне обстеження, що забезпечують швидке та детальне обстеження мостів. Візуальні дані, отримані з дронів або за допомогою роботів, можуть бути використані для виявлення пошкоджень, аналізу структурних елементів та оцінки загального стану моста. Це і системи збору та зберігання даних, такі як централізовані сервери або хмарні платформи, які зберігають великий обсягу даних, отриманих з різних джерел. Всі ці перераховані елементи дозволяють зберігати, категоризувати та доступно організовувати дані для подальшого аналізу. Крім того необхідно розробити та впровадити алгоритми машинного навчання, глибокого навчання та аналізу даних є ключовими елементами для використання штучного інтелекту у системі моніторингу технічного стану мостів. Вони дозволяють обробляти, аналізувати та виявляти закономірності в отриманих даних, що забезпечує точність та ефективність аналізу. Не слід забувати, що для передачі даних між датчиками, системами збору даних та аналітичними модулями необхідна надійна і швидка інфраструктура зв'язку, така як бездротові мережі або мережі зв'язку через кабель.

Також для проведення обстеження транспортних споруд із високою точністю отриманих даних можна використовувати 3D-сканери у системі моніторингу (**рис. 1** та **рис. 2**). Це має свої переваги і обмеження, а саме:

1. Точність збору даних: 3D-сканери здатні зібрати детальну і точну інформацію про геометричну форму мостових споруд. Вони здатні виявити навіть незначні зміни у геометрії, що може свідчити про пошкодження або деформації.

2. Висока швидкість сканування: 3D-сканери можуть провести повне сканування моста відносно швидко. Це дозволяє збирати великий обсяг даних у короткі строки, що забезпечує більш оперативний моніторинг технічного стану мостів.

3. Неінвазивний метод: використання 3D-сканерів не потребує фізичного контакту з мостовою спорудою, що дозволяє проводити обстеження без порушення її цілісності. Це важливо для мостів, які знаходяться в експлуатації, оскільки їх можна оглянути без необхідності припинення дорожнього руху або впливу на потік транспорту.

4. Створення точного 3D-моделювання: 3D-сканери дозволяють створювати точні 3D-моделі мостових споруд, що можуть бути використані для подальшого аналізування та визначення технічного стану. Це допомагає виявляти складніші дефекти та структурні проблеми.

До обмежень використання 3D-сканерів слід віднести високі витрати (3D-сканери є дорогими технологічними пристроями і їх використання може вимагати значних фінансових витрат, а це може бути обмеженням для впровадження такої системи моніторингу великої кількості мостів), складність обробки даних через їх великий обсяг та наявності великої кількості точок і залежність від умов сканування (необхідні сприятливі умови освітлення та обмеження відблисків. Використання їх у поганих погодних умовах або на великій відстані від моста може вплинути на якість отриманих даних).

У великій мірі доцільність використання 3D-сканерів залежить від конкретних умов і масштабу проєкту. Якщо у проєкті передбачено обстеження та моніторинг великої кількості мостів з високою точністю та деталізацією, то використання 3D-сканерів може бути ефективним рішенням. Однак, варто враховувати економічні та технічні обмеження, щоб забезпечити оптимальне використання ресурсів.

Рисунок 1 – Фото шляхопроводу перед скануванням

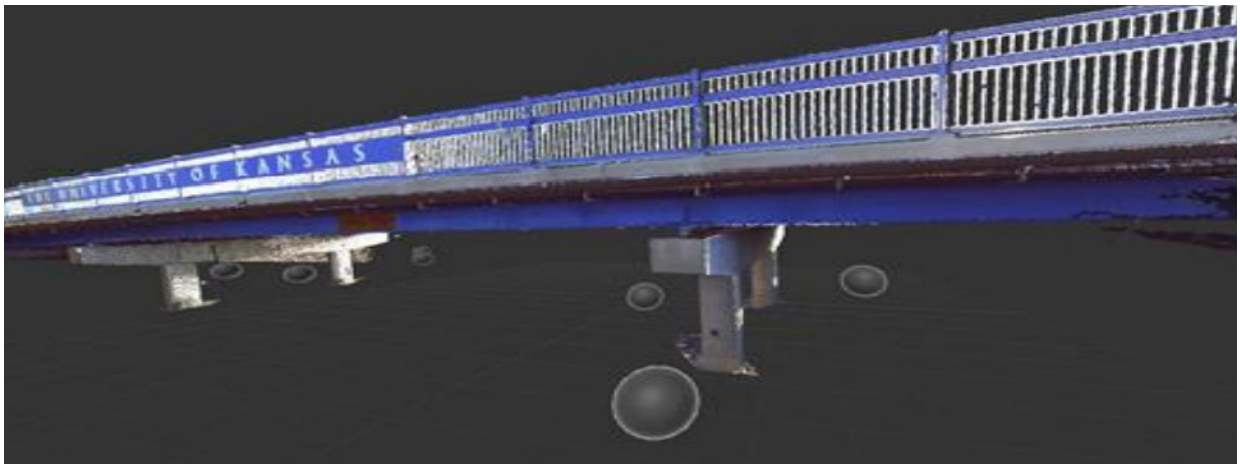

Рисунок 2 – 3D модель шляхопроводу після сканування

Для визначення технічного стану мостових елементів існують різні методи та критерії оцінки, які можуть бути використані в системі моніторингу з використанням штучного інтелекту. Ось кілька прикладів:

1. Аналіз вібраційних характеристик: вимірювання вібраційних характеристик, таких як частоти резонансу, амплітуди коливань тощо, може дати інформацію про структурну цілісність мостових елементів. Застосування штучного інтелекту для аналізу цих даних дозволяє виявляти аномальні коливання та зміни в структурі.

2. Моніторинг температурних змін: зміни температури можуть впливати на розширення та скорочення мостових елементів. Збір температурних даних та їх аналіз дозволяють виявляти потенційні пошкодження або деформації, пов'язані з температурними впливами.

3. Візуальний аналіз: використання відеоданних з дронів або інших джерел може допомогти виявити візуальні пошкодження, такі як тріщини, корозія або відсутність арматури. Алгоритми ШІ можуть автоматично аналізувати зображення та виявляти ці пошкодження, допомагаючи вчасно реагувати на них.

4. Аналіз структурних характеристик: вимірювання параметрів, таких як прогин, вигин, кут нахилу тощо, може дати інформацію про структурну цілісність моста. Застосування

ШІ дозволяє виявляти небезпечні або неконсистентні характеристики, що потребують уваги та ремонту.

5. Оцінка навантажень: аналіз навантажень на мостові конструкції, таких як вантажні потоки транспорту тощо, дозволяє визначити межі навантажень, що можуть впливати на структурну цілісність моста. Застосування ШІ допомагає відстежувати та аналізувати ці навантаження в режимі реального часу.

Модель обробки отриманих даних штучним інтелектом для моніторингу технічного стану мостів можна представити за допомогою семи елементів, наведених нижче:

1. Збір даних здійснюється за допомогою різних приладів, таких як сенсори, 3D-сканери, відеокамери тощо. Ці прилади фіксують інформацію про різні аспекти мостів, такі як вібрації, температура, відхилення, тріщини тощо (**рис. 3**).

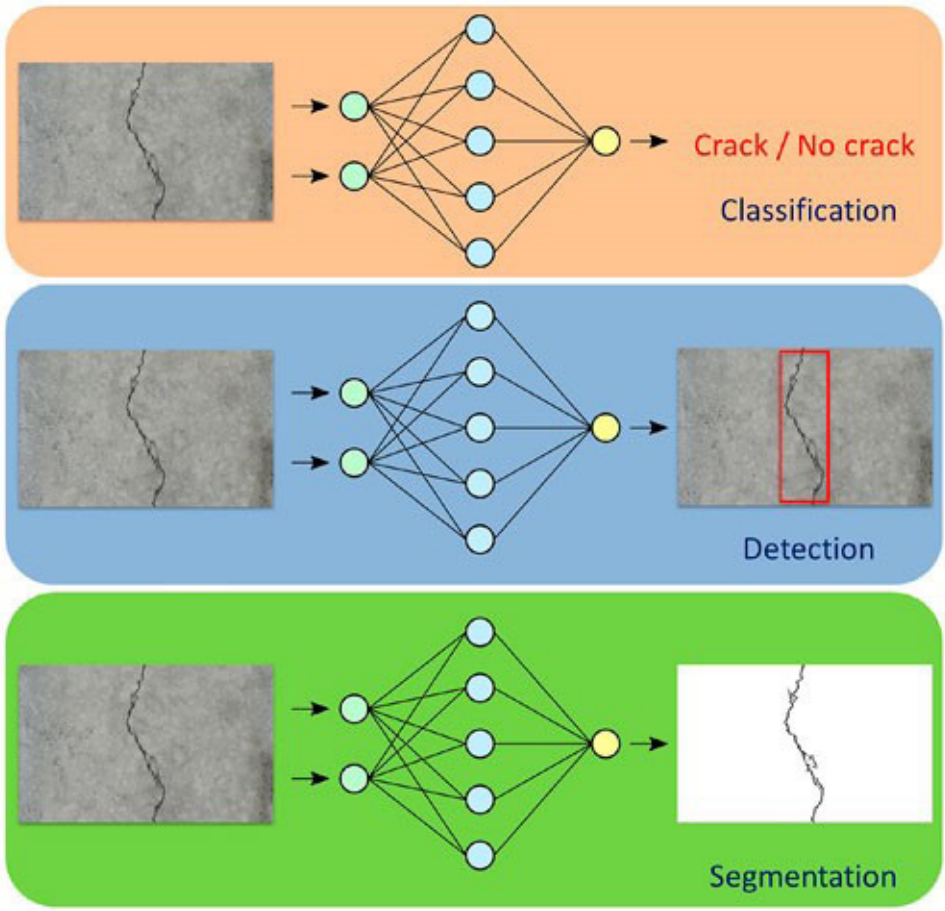

Рисунок 3 – Принцип виявлення тріщини на поверхні бетону

2. Попередня обробка даних: отримані дані піддаються попередній обробці, яка включає фільтрацію шуму, видалення артефактів та нормалізацію даних. Це допомагає покращити якість даних і забезпечити їх однорідність.

3. Виділення ознак: застосовуються методи машинного навчання для виділення ознак з отриманих даних. Це можуть бути характеристики, які вказують на можливі проблеми або аномалії, наприклад, амплітуда вібрацій, геометричні параметри, температурні відхилення тощо.

4. Побудова моделі: за допомогою отриманих ознак будується модель штучного інтелекту, така як нейронна мережа або інший алгоритм машинного навчання. Модель навчається на наявних даних, де відомі технічний стан мостів, і використовується для прогнозування стану мостів на основі нових отриманих даних.

5. Визначення стану мостів: модель використовується для визначення технічного стану мостів на основі вхідних даних. Вона може проводити класифікацію, де оцінюються ступінь пошкоджень або прогнозувати строк служби елементів мостів. Результати можуть бути представлені у вигляді числових оцінок, візуалізацій або рекомендацій щодо подальшого обстеження чи ремонту.

6. Моніторинг та аналіз: отримані результати використовуються для моніторингу технічного стану мостів і проведення аналізу. Система може автоматично спостерігати за змінами в стані мостів, виявляти нові проблеми або передбачати необхідність ремонту.

7. Постійне навчання: модель регулярно оновлюється шляхом навчання на нових даних, що дозволяє їй покращувати точність та адаптуватися до змінних умов технічного стану мостів.

Застосування штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів на дорогах України є економічно доцільним і вигідним. Це, перш за все, зниження витрат, оскільки використання штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процес збору та аналізу даних про технічний стан мостів, що знижує витрати на людські ресурси та час. Виявлення пошкоджень і встановлення відповідних заходів ремонту може бути зроблено швидше й ефективніше. Крім того відбувається попередження аварійних ситуацій. Вчасне виявлення пошкоджень і посилення моніторингу технічного стану мостів допомагає попереджати аварійні ситуації й уникати непередбачених витрат на ремонт або відновлення мостових споруд.

Штучний інтелект може допомогти прогнозувати строк служби мостів та розробляти оптимальні плани ремонту та заміни елементів, що дозволяє ефективно використовувати ресурси та забезпечувати безпеку дорожнього руху. Як наслідок відбувається оптимізація планування ремонтів. Аналіз даних про технічний стан мостів за допомогою штучного інтелекту дозволяє розробляти стратегії та плани ремонтів, що мінімізують перерви у дорожньому русі та витрати на ремонтні роботи.

Однак, штучний інтелект має певні недоліки, які виникають при використанні в системі моніторингу технічного стану мостів. Розглянемо деякі з них:

1. Залежність від якості та обсягу даних. Штучний інтелект вимагає великої кількості якісних даних для тренування моделей і забезпечення точності результатів. У разі обмежених даних або якщо дані неправильно представлені, можуть виникнути проблеми з точністю та достовірністю оцінок технічного стану мостів.

2. Необхідність постійного навчання. Штучний інтелект потребує постійного навчання та оновлення моделей для підтримки актуальності та адаптації до змінних умов технічного стану мостів. Це може бути затратним процесом з точки зору часу, ресурсів та експертного знання.

3. Обмежена прозорість рішень. Деякі моделі штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, можуть бути складними для інтерпретації та пояснення. Вони діють на основі внутрішніх патернів і залежностей, які можуть бути складними для визначення людиною. Це може створювати певну незрозумілість щодо причин виявлених проблем або оцінок технічного стану.

4. Відсутність контекстуального розуміння. Штучний інтелект може виявляти аномалії та дефекти на основі внутрішніх патернів, але не завжди володіє контекстуальним розумінням. Наприклад, він може виявити тріщину, але не завжди зможе визначити її походження або потенційні наслідки. Це може вимагати людського експертного втручання для повного аналізу та оцінки ситуації.

5. Вплив зовнішніх факторів. Штучний інтелект може бути чутливим до змінних зовнішніх

чинників, таких як погода, освітлення, шум, що може впливати на якість збору даних і точність результатів. Це може вимагати додаткових заходів для компенсації та стабілізації отриманих даних.

Усі ці недоліки варто враховувати при використанні штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Важливо забезпечити баланс між автоматизацією та людським експертним втручанням, а також проводити регулярне перевіряння та оцінювання точності й ефективності системи.

Висновок

Використання штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів є доцільним і має багато переваг. Воно дозволяє покращити ефективність моніторингу, забезпечити точність оцінки стану мостових споруд, передбачити можливі пошкодження та покращити планування обслуговування та ремонту.

Подальші дослідження в цьому напрямку включають розроблення нових алгоритмів для аналізування даних, використання більш розширених технологій збирання даних, розроблення систем прогнозування, а також врахування впливу зовнішніх чинників, зокрема погодно-кліматичних.

Список літератури

1. Smith, J., & Johnson, A. Artificial Intelligence for Bridge Monitoring: A Review. J*ournal of Bridge Engineering.* 25(2), 2020. URL: https://www.academia.edu/17372527/Artificial_Intelligence_in_Bridge_Engineering (дата звернення: 14.08.2023).

2. Wang, J., Liu, Y., & Zhou, Z. A Review on Artificial Intelligence Applications in Bridge Inspection and Monitoring. *Frontiers in Built Environment*. №7. Japan, 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/363407597_Review_of_artificial_intelligence-based_bridge_damage_detection (дата звернення: 14.08.2023).

3. Li X., Chen G., & Tang W. An Intelligent Bridge Inspection and Evaluation System Based on Unmanned Aerial Vehicle and Machine Learning. *IEEE Access*. №7. Japan, 2021. URL: https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1475921720932384 (дата звернення: 14.08.2023).

4. Wang, Y., Li, Z., & Ou, J. Intelligent Bridge Damage Identification Using Convolutional Neural Networks and Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*. 20(13). Japan, 2021. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/6152 (дата звернення: 14.08.2023).

5. Cha, Young-Jin, Wooram Choi, and Oral Büyüköztürk. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 32.5 (2017). P. 361–378. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/mice.12263 (дата звернення: 14.08.2023).

6. Srinivasan R., & Keerthipala W. H. A Comparative Study on Machine Learning Approaches for Structural Damage Detection Using Sensor Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 35(1). London, 2021. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/10754 (дата звернення: 14.08.2023).

References

1. Smith, J., & Johnson, A. Artificial Intelligence for Bridge Monitoring: A Review. J*ournal of Bridge Engineering.* 25(2), 2020. URL: https://www.academia.edu/17372527/Artificial_Intelligence_in_Bridge_Engineering (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

2. Wang, J., Liu, Y., & Zhou, Z. A Review on Artificial Intelligence Applications in Bridge Inspection and Monitoring. *Frontiers in Built Environment*. №7. Japan, 2021. URL: https://www.

researchgate.net/publication/363407597_Review_of_artificial_intelligence-based_bridge_damage_detection (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

3. Li X., Chen G., & Tang W. An Intelligent Bridge Inspection and Evaluation System Based on Unmanned Aerial Vehicle and Machine Learning. *IEEE Access*. №7. Japan, 2021. URL: https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1475921720932384 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

4. Wang, Y., Li, Z., & Ou, J. Intelligent Bridge Damage Identification Using Convolutional Neural Networks and Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*. 20(13). Japan, 2021. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/6152 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

5. Cha, Young-Jin, Wooram Choi, and Oral Büyüköztürk. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 32.5 (2017). P. 361–378. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/mice.12263 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

6. Srinivasan R., & Keerthipala W. H. A Comparative Study on Machine Learning Approaches for Structural Damage Detection Using Sensor Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 35(1). London, 2021. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/10754 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

Bohdan Zelenskyi, *https://orcid.org/0000-0002-9949-3209*

M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF BRIDGES: ADVANTAGES AND PROSPECTS

Abstract

Introduction. This article explores the use of artificial intelligence (AI) to monitor the technical condition of bridges and predict the service life of structures. It outlines the relevance of this issue, analyzes recent research and publications, defines the purpose and objectives of the study, and describes the main material, results, conclusions, and prospects for further research.

Problem Statement. Monitoring the technical condition of bridges and predicting their service life requires a lot of time to process the results of the survey and determine the actual technical condition of the bridge elements.

Purpose. To analyze the possibility of using artificial intelligence to monitor the technical condition of bridges and predict their service life. To establish the reliability of the data obtained in comparison with traditional methods of assessing the technical condition.

Materials and methods. To analyze the possibility of using artificial intelligence to monitor the technical condition of bridges, we use available resources and databases on the Internet. State standards and regulations in force in Ukraine are used as initial data for the assessment.

Results. The analysis of foreign sources on the available software for the implementation of artificial intelligence in the system of monitoring the technical condition of structures was carried out.

Conclusions. The introduction of artificial intelligence-based software for monitoring the technical condition of bridges will significantly improve and accelerate the process of analysis, evaluation, preparation of conclusions and recommendations for the further operation of transport facilities.

Keywords: data analysis, sensors, technical condition monitoring, bridges, forecasting, artificial intelligence.