

Передумови створення скінченно-елементної моделі для генерації достовірних даних для систем моніторингу безпеки монорейкового крана

Богдан Соловей, аспірант¹ (ORCID: 0009-0008-0328-1123),
Олександр Терентьєв, д-р техн. наук, проф., декан ФАІТ¹ (ORCID: 0000-0001-9499-6635)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

Перспективним напрямком підвищення безпеки будівельних кранів є створення систем моніторингу на базі штучного інтелекту, здатних у реальному часі оцінювати ризики та попереджати про небезпечні стани. Перешкодою для розробки таких систем є проблема отримання достовірних навчальних даних. Традиційна оцінка стійкості за допомогою статичних моделей не враховує деформацій конструкції. Аналіз наукової літератури підтвердив, що метод скінченних елементів є інструментом для аналізу міцності та стійкості кранів. Його ефективність продемонстровано у задачах оптимізації, оцінки стійкості та втомної довговічності. Водночас виявлено відсутність досліджень, де метод скінченних елементів цілеспрямовано застосовується для генерації наборів даних, необхідних для навчання моделей штучного інтелекту систем моніторингу. Для того, щоб обґрунтувати ефективність використання методу скінченних елементів як генератора даних, у даній роботі сформульовано дослідницькі гіпотези, які необхідно перевірити.

Ключові слова: метод скінченних елементів, стійкість конструкції, генерація даних, кран, моніторинг безпеки.

1. ВСТУП

Безпека експлуатації кранових механізмів є критично важливим завданням у сучасній промисловості та будівництві. Стійкість крана - одна з ключових характеристик, що визначають його надійність та безпеку. Одним із перспективних напрямків підвищення безпеки крана є впровадження систем моніторингу на базі штучного інтелекту (ШІ), здатних у реальному часі оцінювати ризики та попереджати про небезпечні стани [1]. Однак ефективність будь-якої ШІ-моделі безпосередньо залежить від якості та достовірності даних, на яких вона навчалася. Отримання великих обсягів даних шляхом натурних експериментів є дорогим, довготривалим та часто небезпечним. Альтернативою є використання математичних моделей для генерації синтетичних даних.

Аналітичні моделі стійкості, що базуються на статистиці абсолютно жорсткого тіла, не враховують деформації конструкції під навантаженням, що призводить до неконсервативних та потенційно небезпечних оцінок [2]. У зв'язку з цим виникає питання про доцільність застосування чисельних методів, таких як метод скінченних елементів (МСЕ), для отримання даних поведінки крана.

2. МЕТА

Проаналізувати сучасні наукові дослідження для обґрунтування можливості використання методу скінченних елементів (МСЕ) як інструменту для генерації достовірних даних про стійкість монорейкового крана.

3. АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОБІТ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ МСЕ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КРАНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Для досягнення поставленої мети проаналізуємо низку наукових робіт, що використовують МСЕ для дослідження кранових конструкцій.

У роботі [3] автори використовують МСЕ для перевірки методики створення масштабованих фізичних моделей кранових стріл. Порівнюючи МСЕ-моделі повнорозмірної та зменшеної стріл, вони доводять високу кореляцію результатів, що підтверджує адекватність їхнього підходу до масштабування.

Ці результати є обґрунтуванням достовірності МСЕ як інструменту для моделювання поведінки кранових конструкцій. Однак, оскільки робота фокусується на аналізі міцності окремого елемента (стріли), а не на глобальній стійкості всієї системи крана, її результати та модель не можуть бути безпосередньо застосовані для вирішення задач моделювання стійкості крана.

Автори роботи [4] аналізують стійкість баштових кранів за умов великої висоти, вітрових та сейсмічних навантажень. Як рішення вони пропонують додаткові розтяжки, що кріплять щоглу крана до будівлі або фундаменту. МСЕ використано для оцінки впливу цих розкріплень: спочатку визначено зони з підвищеними напруженнями та деформаціями, а потім оновлену модель перевірено з урахуванням розкріплень. Порівняння результатів «до» і «після» доводить ефективність підходу.

Дослідження [4], подібно до роботи [3] підтверджує, що МСЕ є достовірним інструментом для моделювання поведінки кранових конструкцій. Однак, результати роботи [4] не можуть бути використані в даній роботі через різні завдання досліджень: в роботі [4] метою є підвищення стійкості за допомогою зовнішніх елементів, а не аналіз власної стійкості конструкції крана.

У дослідженні [5] МСЕ застосовано для аналізу динамічної реакції морського крана-маніпулятора залежно від швидкості прикладання навантаження. Було встановлено експоненційну залежність між часом прикладання навантаження та динамічним фактором. Висновки роботи свідчать, що навіть незначне скорочення часу підйому вантажу призводить до суттєвого нелінійного зростання динамічних ефектів, таких як перенапруження, ризик перекидання та деформації конструкції.

Результати дослідження [5] підтверджують, що врахування динаміки є критично важливим при оцінці стійкості крана, але отримані дані про залежності стійкості

крана від динамічних параметрів не достатні для навчання моделі штучного інтелекту.

У роботі [6] на основі МСЕ розраховуються максимальні напруження та деформації, що виникають під дією навантаження у різних формах поперечного перерізу вантажного гака. Отримані значення використовуються як критерій оптимізації для вибору оптимальної форми перерізу, яка забезпечує міцність гака. Ці значення використовуються як критерій оптимізації з метою знайти найкращу форму поперечного перерізу для вантажного гака для забезпечення його міцності.

Результати дослідження [6] створюють методологічну основу для подальшого розширення системи моніторингу стійкості крана. Зокрема, на їх базі систему моніторингу стійкості можна розвинути до комплексної системи моніторингу безпеки, яка б аналізувала не лише ризик втрати стійкості, але й локальну міцність ключових конструктивних вузлів.

У дослідженні [7] за допомогою МСЕ аналізується, як ексцентричне навантаження впливає на напружено-деформований стан кранової балки. В ході роботи створюється скінченно-елементна модель, на якій імітуються експлуатаційні навантаження. Методологія моделювання цього ефекту, запропонована в [7], буде використана в подальшій роботі для підвищення точності власних розрахунків.

Автори дослідження [8] використали МСЕ для аналізу напружено-деформованого стану елементів баштового крана з горизонтальною стрілою під дією статичних і динамічних навантажень. Метою було глибоке вивчення розподілу напружень для подальшого удосконалення існуючих конструкцій.

У роботі [9] МСЕ використано для аналізу втомної довговічності крана без додаткових опор. У ході дослідження створено 3D-модель у середовищі САПР, побудовано скінченно-елементну сітку та накладено граничні умови, що імітують реальну експлуатацію. На етапі статичного аналізу розраховано НДС конструкції під дією максимального робочого навантаження. Отримані карти розподілу напружень (за критерієм фон Мізеса) дозволяють визначити потенційні зони зародження втомних тріщин.

Дослідження [8-9], подібно до роботи [6], підтверджує, що МСЕ є достовірним інструментом для моделювання поведінки кранових конструкцій. Однак результати [8-9] не можуть бути використані в даній роботі через різні завдання досліджень.

4. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз літератури підтверджує ефективність методу скінченних елементів (МСЕ) для дослідження різних аспектів роботи кранових конструкцій. Водночас виявлено ключову наукову прогалину: відсутність досліджень, у яких би МСЕ застосовувався для моделювання впливу геометричної нелінійності на глобальну стійкість крана саме з метою генерації достовірних даних.

Щоб обґрунтувати ефективність МСЕ-підходу, сформулюємо і перевіримо в наступному дослідженні гіпотези:

Гіпотеза Н₁: Врахування деформацій у МСЕ-моделі систематично зменшує розрахунковий запас стійкості крана порівняно зі статичною моделлю.

Гіпотеза Н₂: Різниця між коефіцієнтами стійкості, розрахованими за МСЕ-моделлю та статичною моделлю, є статистично значущою.

Для перевірки гіпотези Н₁ буде проведено порівняння середніх значень та розподілів коефіцієнтів стійкості, щоб визначити напрямок та величину систематичної розбіжності.

Для перевірки гіпотези Н₂ та підтвердження статистичної значущості цієї розбіжності буде застосовано парний t-тест Стьюдента. Нульова гіпотеза Н₀ полягатиме в тому, що середні значення коефіцієнтів, отриманих за двома моделями, не мають суттєвої різниці. Відхилення нульової гіпотези підтвердить гіпотезу Н₂.

Список літератури

- [1] Awad, A. H., Alsabaan, M., Ibrahim, M. I., Saraya, M. S., Elksasy, M. S. M., Ali-Eldin, A. M., & Abdelsalam, M. M. (2024). Low-cost IoT-based sensors dashboard for monitoring the state of health of mobile harbor cranes: Hardware and software description. *Heliyon*, 10(22). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40239>.
- [2] Воляннюк, В. О., & Горбатюк, Є. В. (2021). Розрахунок механізмів вантажопідіймальних машин: навч. посіб. Київ: КНУБА.
- [3] Liu, Z., Liu, K., Chen, C., Lu, S., Wang, H., & Yin, L. (2025, June). Similitude-based construction of scaled crane boom models via finite element analysis. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 3033, No. 1, p. 012034). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3033/1/012034>.
- [4] Georgiev, C. (2024). Enhancing tower crane stability through mast bracing and finite element analysis. In *Proceedings of the Technical University of Sofia* (Vol. 74). url: [Google Scholar](https://doi.org/10.1088/1742-6596/3033/1/012034).
- [5] Tomasi, I., & Solazzi, L. (2025). Dynamic analysis of an offshore knuckle-boom crane under different load applications laws. *Applied Sciences*, 15(14), 8100. <https://doi.org/10.3390/app15148100>.
- [6] Dipu, M. N. H., Apu, M. H., & Chowdhury, P. P. (2024). Identification of the effective crane hook's cross-section by incorporating finite element method and programming language. *Heliyon*, 10(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29918>.
- [7] Lu, C., Yang, Z., Li, P., Zhang, X., Huang, J., & Wang, L. (2022). Finite element analysis and reinforcement of steel crane beam under eccentric track loading. *Machines*, 10(9), 783. <https://doi.org/10.3390/machines10090783>.
- [8] Zhang, Q., Mei, B., Yang, H., Hu, X., An, W., Yue, Y., ... Wang, Z. (2025). Stress measurement and analysis of structural parameters of flat arm tower crane under different working conditions. *Buildings*, 15(7), 1137. <https://doi.org/10.3390/buildings15071137>.
- [9] Buczkowski, R., & Żyliński, B. (2021). Finite element fatigue analysis of unsupported crane. *Polish Maritime Research*, Gdańsk, Poland. <https://doi.org/10.2478/pomr-2021-0012>.