

Соловей Б. А., Терентьев О. О.

ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ ФІЗИЧНО ДОСТОВІРНИХ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ БЕЗПЕКИ КРАНІВ НА ОСНОВІ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Предметом дослідження є стійкість монорейкового пересувного крана, зокрема коефіцієнти на перекидання й на зсув. Проблема полягає в неадекватності статичних моделей, що базуються на припущенні про жорсткість конструкції, для визначення безпеки. Такі моделі ігнорують вплив деформацій, що призводить до неконсервативних оцінок стійкості та робить їх ненадійними для генерації даних для систем моніторингу на основі моделей штучного інтелекту. **Метою дослідження** є розроблення та обґрунтування підходу до створення даних для оцінювання стійкості монорейкових пересувних кранів, який ґрунтується на скінченно-елементному моделюванні та бере до уваги деформаційні ефекти конструкції. Для досягнення мети в статті визначено такі **завдання**: розроблення підходу до створення наборів даних для оцінювання стійкості монорейкового крана на основі скінченно-елементного моделювання; перевірка запропонованого підходу способом кількісного порівняльного аналізу згенерованих даних із даними, отриманими за статичним підходом, і доведення статистичної значущості розбіжностей. Для реалізації окреслених завдань використано такі **методи**: теорія експериментів, теорія балок Ейлера – Бернуллі, статистична теорія розподілів, теорія чисельного моделювання. **Досягнуті результати**. Отримано кількісні докази розбіжності між статичною та скінченно-елементною моделями. Для стійкості на перекидання середнє значення коефіцієнта β за скінченно-елементною моделлю становить 1.365 (на 2.4% нижче, ніж у статичній – 1.398). Для стійкості на зсув середній коефіцієнт γ зменшився майже удвічі – з 1.87 до 0.85. Статистичний аналіз підтвердив високу значущість цих розбіжностей ($p < 0.001$). **Висновки**. Скінченно-елементна модель бере до уваги геометричну нелінійність. Пружна деформація стріли змінює плече дії сили ваги вантажу, збільшуючи перекидальний момент і горизонтальну реакцію, що системно знижує запас стійкості. Відмінною рисою запропонованої моделі є її здатність виявляти "небезпечні зони" – режими роботи, які статична модель хибно ідентифікує як безпечні. Сферою практичного використання є розроблення систем моніторингу безпеки монорейкового крана на базі штучного інтелекту. Запропонована модель може бути застосована як "генератор" синтетичних даних для навчання та перевірки моделей машинного навчання, що дасть змогу створювати предиктивні системи для оцінювання стійкості монорейкового крана в реальному часі.

Ключові слова: чисельне моделювання; скінченно-елементна модель; генерація даних; моніторинг безпеки; монорейковий кран.

1. Вступ

Будівельні крани є невід'ємним складником сучасного будівництва, однак їх експлуатація пов'язана зі значними ризиками. Стійкість крана – одна з ключових властивостей, що визначає його надійність та безпеку. Допустимі значення коефіцієнтів стійкості чітко регламентовані нормативними документами, зокрема правилами охорони праці [1]. Тому точне прогнозування й моніторинг коефіцієнта стійкості в режимі реального часу є основою будь-якої сучасної системи забезпечення безпеки кранів [2].

Останні досягнення в галузі штучного інтелекту відкривають нові можливості для моніторингу безпечної експлуатації кранів. Рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема моделі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM) та вентильним рекурентним блоком (GRU), ефективні для задач із часовими рядами й навчаються на показниках

датчиків інтернету речей [3–5]. Проте якість навчання таких моделей залежить від точності вхідних даних, які мають відображати реальні динамічні процеси.

Отримати такі дані з натурних експериментів – процес дорий, тривалий і здебільшого неможливий. Традиційно для оцінювання стійкості кранів використовуються аналітичні моделі, що базуються на статистиці абсолютно жорсткого тіла. Такі моделі є спрощеними, оскільки вони не зважають на ключові фізичні явища, зокрема деформацію згину стріли під навантаженням. Це призводить до того, що розраховані коефіцієнти стійкості можуть не відповідати реальній поведінці крана в динамічних режимах, що знижує точність даних для навчання рекурентних нейронних мереж.

Тому виникає потреба в пошуку підходів, що поєднують сучасні методи машинного навчання з фізично обґрунтованими моделями стійкості крана. Це дасть змогу створювати великі обсяги достовірних

даних для навчання й перевірки моделей штучного інтелекту, призначених для систем моніторингу безпеки крана.

З огляду на важливість безпечної експлуатації кранів обмеження традиційних методів прогнозування й потенціал штучного інтелекту це наукове питання є актуальним і потребує подальших досліджень.

2. Аналіз літературних джерел і визначення проблеми

Метод скінчених елементів (МСЕ) є ефективним інструментом для розв'язання широкого кола інженерних задач, пов'язаних із крановими конструкціями.

У роботі [6] 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 важливим обґрунтуванням достовірності МСЕ як інструменту для моделювання поведінки кранових конструкцій. Однак, оскільки робота зосереджується на аналізі міцності окремого елемента (стріли), а не на глобальній стійкості всієї системи крана, її результати й модель не можуть бути безпосередньо застосовані для розв'язання задач моделювання стійкості крана.

Автори роботи [7] аналізують стійкість баштових кранів за умов великої висоти, вітрових і сейсмічних навантажень. Як рішення вони пропонують додаткові розтяжки, що кріплять щоглу крана до будівлі або фундаменту. МСЕ використано для оцінювання впливу цих розкріплень: спочатку визначено зони з підвищеними напруженнями й деформаціями, а потім оновлену модель перевірено з огляду на розкріплення. Порівняння результатів "до" й "після" доводить ефективність підходу.

У дослідженні [8] МСЕ застосовано для аналізу динамічної реакції морського крана-маніпулятора залежно від швидкості прикладання навантаження. Було встановлено експоненційну залежність між часом прикладання навантаження й динамічним фактором. Висновки роботи засвідчують, що навіть незначне скорочення часу підйому вантажу призводить до суттєвого нелінійного зростання динамічних ефектів, як-от: перенапруження, ризик перекидання й деформації конструкції.

У праці [9] на основі МСЕ розраховано максимальні напруження та деформації, що виникають під дією навантаження в 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.

У дослідженні [10] за допомогою МСЕ проаналізовано, як ексцентричне навантаження впливає на напружено-деформований стан кранової балки. У процесі роботи створюється скінченно-елементна модель, на якій імітуються експлуатаційні навантаження. Методологія моделювання цього ефекту, запропонована в [10], буде використана в подальшій роботі для підвищення точності власних розрахунків.

Автори дослідження [11] 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 вдосконалення наявних конструкцій.

У статті [12] МСЕ використано для аналізу втомної довговічності крана без додаткових опор. У дослідженні створено 3D-модель у середовищі САПР, побудовано скінченно-елементну сітку й 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) дають змогу визначити потенційні зони зародження втомних тріщин.

Проаналізовані студії [6–12] підтверджують ефективність методу скінчених елементів для дослідження різних аспектів роботи кранових конструкцій, тоді як питання стійкості монорейкових пересувних кранів залишається менш вивченим. Зокрема відсутні моделі, що комплексно беруть до уваги вплив деформації згину балки стріли у вертикальній площині на загальну стійкість конструкції.

Складність отримання навчальних даних для інтелектуальних систем моніторингу також є обмеженням. У роботі [13] описано використання фізично-інформованих нейронних мереж (PINN) для прогнозування коливань навантаження в автомобільних маніпуляторних кранах. Також обґрунтовано, що

запропонована PINN зменшує потребу в кількості навчальних даних і підвищує їх надійність. Це досягається завдяки технології трансферного навчання, яка адаптує попередньо навчену модель до нових ситуацій на основі знань, здобутих на попередніх етапах навчання.

Як зазначено в статті [13], до етапу трансферного навчання дані для навчання було отримано способом моделювання руху автомобільного маніпуляторного крана за допомогою числових симуляцій. Запропонований підхід вимагає наявності початкового набору даних для навчання й перевірки моделі, а їх відсутність до етапу трансферного навчання може стати перешкодою для застосування методу.

Отже, нерозв'язаним залишається питання створення початкових наборів даних для моніторингу стійкості монорейкових кранів із використанням штучного інтелекту.

3. Мета й завдання дослідження

Мета дослідження – розробити й обґрунтувати підхід до створення даних для оцінювання стійкості монорейкових пересувних кранів, який ґрунтується на скінченно-елементному моделюванні й бере до уваги деформаційні ефекти конструкції.

Практичне значення роботи полягає у використанні розробленого підходу як інструменту для створення великих обсягів достовірних даних для навчання й перевірки моделей штучного інтелекту, призначених для систем моніторингу безпеки монорейкового крана.

Щоб досягти окреслену мету, було визначено такі завдання:

1) розроблення підходу до створення наборів даних для оцінювання стійкості монорейкового крана на основі скінченно-елементного моделювання;

2) перевірка запропонованого підходу способом кількісного порівняльного аналізу згенерованих даних, з даними, отриманими за статичним підходом, і доведення статистичної значущості розбіжностей.

4. Матеріали й методи дослідження

Стійкість монорейкового стрілоподібного пересувного крана визначається двома ключовими параметрами: стійкість на перекидання й стійкість на зсув. Стійкість на перекидання вказує на здатність

крана протистояти моментам, коли стріла направлена уздовж рейкового шляху. Стійкість на зсув оцінює стійкість крана до бокових сил, які можуть виникати під час переміщення стріли поперек рейкового шляху.

Умова стійкості на перекидання монорейкового крана має такий вигляд:

$$\beta = \frac{M_{yt}}{M_{пер}} \geq 1.4, \quad (1)$$

де β – коефіцієнт вантажної стійкості; M_{yt} – момент утримування, Н·м, що розраховується як

$$M_{yt} = G_{cr}(l - b) + G_{cw}(c + l) + G_t l; \quad (2)$$

$M_{пер}$ – момент перекидання, Н·м, що розраховується як

$$M_{пер} = G_B(a - l), \quad (3)$$

де a – відстань від осі обертання крана до лінії дії сили G_B , (м); $(a-l)$ – визначає плече дії сили вантажу щодо осі обертання, (м); G_B – вага вантажу, кН; G_{cr} – вага крана, кН; G_{cw} – вага противаги, кН; G_t – вага транспортного візка, Н; b – відстань від осі обертання крана до лінії дії сили G_{cr} , м; c – відстань від осі обертання крана до лінії дії сили G_{cw} , м; l – відстань від осі обертання крана до точки дотику колеса вантажного візка до рейок, м.

У положенні, коли стріла крана розташована поперек рейкового шляху, рейкова колія є основною опорою, а моменти діють щодо осі рейки. У верхній опорі виникає горизонтальна реакція H , що прагне зсунути кран

$$H = \frac{G_B a + G_{cr} b - G_{cw} c}{h}, \quad (4)$$

де h – відстань між нижньою та верхньою опорами, м.

У цьому разі перекидання не можливе, але виникає ризик зсуву крана. Тому стійкість перевіряють за умови, що горизонтальна реакція H не перевищує силу тертя, тобто $H \leq F_{fr}$:

$$F_{fr} = (G_B + G_{cr} + G_{cw} + G_t)\mu \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{F}{H} \quad (6)$$

де γ – вантажний коефіцієнт стійкості крана на зсув; μ – коефіцієнт тертя коліс по рейках.

Умова стійкості на зсув має вигляд

$$\gamma \geq 1.5 \dots 1.6. \quad (7)$$

Наведені формули (2)–(6) описують розрахунок стійкості на основі моделі абсолютно жорсткого тіла [14].

4.1. Інструментальна та процедурна основа підходу до створення наборів даних для оцінювання стійкості монорейкового крана

4.1.1. Скінченно-елементна модель оцінювання стійкості монорейкового крана

Запропонуємо МСЕ моделі оцінювання стійкості монорейкового крана, в основі якої розглядається стріла крана довжини l_e із жорстким кріпленням біля опори (вузол 1) та вільним кінцем (вузол 2), на якому зосереджена сила вантажу.

Модель базується на теорії балок Ейлера – Бернуллі, яка припускає, що поперечні перерізи балки залишаються плоскими й перпендикулярними до її осі після деформації. Теорія Ейлера – Бернуллі ігнорує деформації зсуву, таким чином модель, розроблена в цьому дослідженні, буде коректна для тонких балок і малих прогинів; зсувні деформації та геометрична нелінійність не беруться до уваги. Вага вантажу прикладається у вільному вузлі; розподілені навантаження, маса балки й демпфування ігноруються. Динамічні ефекти (розгін / гальмування візка, коливання) не моделюються [15].

Стріла як балковий елемент з двома вузлами (і чотири ступенями свободи) дискретизується на скінченні елементи, що дає змогу описати її деформований стан за допомогою матричного підходу

$$u = \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де w_1, w_2 визначають прогини балки у вузлах; θ_1, θ_2 – кути повороту перерізів у вузлах.

Основне рівняння методу скінченних елементів

$$Ku = F, \quad (9)$$

де F – вектор вузлових сил; K – глобальна матриця жорсткості.

Для одного балкового елемента маємо

$$K = k^e; \quad (10)$$

$$k^e = \frac{EI}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де E – модуль Юнга, Па; I – момент інерції поперечного перерізу, (м⁴).

Коли балка зафіксована біля опори (вузол 1), тоді прогин (w_1) і кутовий поворот θ_1 дорівнюють нулю, і матриця жорсткості (4) описується тільки для вільного вузла 2 як

$$K_{22}u_2 = F_2, \quad u_2 = \begin{bmatrix} w_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де $K_{22} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ – підматриця жорсткості (4); F_2 – вертикальна сила у вільному вузлі 2 описується як

$$F_2 = \begin{bmatrix} -G_B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де G_B – сила ваги вантажу, прикладена у вільному кінці.

Прогін вільного вузла 2 збільшує плече вантажу з огляду на цей скоригований перекидний момент і набуває вигляду

$$M_{\text{пер}}^* = G_B(a - l + |w_2|), \quad (14)$$

де w_2 – вертикальний прогин у вузлі 2 (додатний за умови опускання кінця стріли).

Коефіцієнт вантажної стійкості β крана (1) відповідно до (14) визначається відношенням утримувального моменту $M_{\text{ут}}$ до скоригованого перекидного моменту $M_{\text{пер}}^*$:

$$\beta_{fem} = \frac{M_{\text{ут}}}{M_{\text{пер}}^*} = \frac{M_{\text{ут}}}{G_B(a - l + |w_2|)}. \quad (15)$$

Момент утримання $M_{\text{ут}}$ у розрахунках залишимо в некоригованому вигляді (2), оскільки утримувальні моменти визначаються силами вага крана й противаги, що діють крізь жорсткі конструктивні елементи; їх плечі практично не змінюються внаслідок характерних прогинів стріли, і тому їх можна вважати незмінними в межах цієї моделі.

Оскільки $|w_2| \geq 0$, маємо $M_{\text{пер}}^* \geq M_{\text{пер}}$, звідки впливає

$$\beta_{fem} < \beta. \quad (16)$$

Отже, оцінка стійкості, отримана з огляду на деформації у межах запропонованої моделі, є більш консервативною порівняно зі статичною оцінкою.

Розраховані деформації впливають на плечі сил $a^* = a + u^2$. Отже, горизонтальна сила H (4), зважаючи на деформації, визначається як

$$H_{fem} = \frac{G_{\text{гр}}(a + u_2) + G_{\text{кр}} \cdot b - G_{\text{пр}} \cdot c}{h}. \quad (17)$$

Вираз (17) необхідно брати до уваги для формулювання скінченно-елементної моделі з метою оцінювання стійкості на зсув.

Вантажний коефіцієнт стійкості крана на зсув γ (7) з огляду на (17) обчислюється за виразом

$$\gamma_{fem} = \frac{F_{fr}}{H_{fem}} \geq 1,5 \dots 1,6. \quad (18)$$

Як видно з формули (18), прогин стріли вниз під дією вантажу ($u_2 > 0$) збільшує перекидний момент H_{fem} (17), якщо зіставити з моментом H (4), і, відповідно, зменшує вантажний коефіцієнт стійкості крана γ_{fem} (18) порівняно з коефіцієнтом γ (7).

У цій роботі не моделюються динамічні ефекти та вплив зовнішніх факторів, зокрема: динамічні

навантаження як сили інерції внаслідок розгону / гальмування візка, ривки під час підйому вантажу або коливання стріли від вітру, що можуть впливати на запас стійкості; температурні впливи, які змінюють механічні властивості матеріалу й спричиняють температурні деформації та напруження в конструкції.

Отже, запропонована модель є квазістатичною та бере до уваги лише деформації згину від статичного навантаження. Динамічні й температурні фактори потребують окремого дослідження й не є частиною цієї роботи.

4.1.2. Підхід до створення наборів даних для оцінювання стійкості монорейкового крана

Запропонуємо підхід до створення двох збалансованих наборів даних, кожен з яких містить 1000 унікальних конфігурацій.

Для створення цього набору даних застосовано спрощену модель, у якій утримувальний момент формується вагою крана, а перекидний – тільки вантажем на його плечі. Цільовий коефіцієнт стійкості β встановлено на рівні 1.4. Було згенеровано 500 стійких ($\beta > 1.4$) та 500 нестійких ($\beta < 1.4$) конфігурацій поблизу критичного порогу, що забезпечує достатнє подання як безпечних, так і небезпечних випадків.

Параметри для генерації даних обрано таким чином, щоб охопити широкий спектр реалістичних сценаріїв:

- властивості матеріалу: модуль пружності E було зафіксовано на рівні 2.1×10^8 Па для усунення варіацій, пов'язаних з матеріалом;

- геометрія: момент інерції I , визначено з високою розбіжністю в значеннях (мінімум = 2.0×10^{-6} м⁴, максимум = 5.8×10^{-4} м⁴) для моделювання як гнучких, так і жорстких перерізів балки. Виліт стріли a змінювався в межах від 5 до 20 м, а база опори k – в діапазоні 1.5–3.5 м. Їх поєднання визначає плече $l_e = a - k$, що змінюється від 1.6 до 18.3 м ($\sigma \approx 4.36$ м);

- навантаження: власна вага крана G_{cr} та вага вантажу G_B також змінювалися в значних межах (38–3745 кН та 50–150 кН відповідно), щоб охопити легкі й важкі промислові конфігурації.

Формування набору даних для оцінювання стійкості на зсув базувалося на визначенні значення противаги G_{cw} навколо цільового рівня стійкості $\gamma \approx 1.5$, що розраховується за формулою

$$G_{cw} \approx \frac{G_B a + G_{cr} b - \frac{(G_B + G_{cr} + \frac{G_{cr} a}{c} + G_t) \mu h}{1.5}}{c}, \quad (19)$$

де a , b , c , h , G_{cr} визначають за рівномірним розподілом з параметрами $U(10, 25)$, $U(2.0, 3.0)$, $U(4.0, 6.0)$, $U(7.0, 10.0)$, $U(100, 200)$ відповідно.

Для врахування природної невизначеності матеріальних властивостей, геометрії та умов навантаження після початкового точного визначення параметрів було введено випадкову варіацію на рівні $\pm 20\%$

$$x = x_0 \cdot (1 + \delta), \quad \delta \sim U(-0.2, +0.2). \quad (20)$$

Коефіцієнт тертя μ було зафіксовано.

Розроблений підхід дає змогу створювати контрольовані та репрезентативні набори даних, що є необхідною умовою для коректного порівняльного аналізу й перевірки дослідницьких гіпотез. Описові статистики згенерованих наборів даних подано в розділі "Результати досліджень та їх обговорення" (табл. 1, 2).

4.2. Методологія перевірки й порівняльного аналізу підходу до створення даних для оцінювання стійкості монорейкового крана

Для кількісного порівняння статичної та розробленої МСЕ-моделей сформулюємо дослідницькі гіпотези.

Гіпотеза H_1 : врахування деформацій у МСЕ-моделі систематично зменшує розрахунковий запас стійкості монорейкового крана порівняно зі статичною моделлю.

Гіпотеза H_2 : різниця між коефіцієнтами стійкості, розрахованими за МСЕ та статичною моделями, є статистично значущою.

Порівняння проводитимемо між двома наборами даних: створеного за допомогою базової статичної методики та створеного за допомогою запропонованого підходу на основі МСЕ.

Для перевірки статистичної значущості різниці між двома наборами парних даних застосовано парний t -тест Стьюдента. Він дає змогу визначити, чи є середня різниця між двома вибірками статистично відмінною від нуля. T -статистика розраховується за формулою

$$t = \frac{\bar{a}}{s_d / \sqrt{n}}, \quad (21)$$

де \bar{a} – середнє значення різниць між парними спостереженнями; s_d – стандартне відхилення цих різниць; n – обсяг вибірки.

Рівень значущості $p < 0.05$ буде використано як критерій для відхилення нульової гіпотези про відсутність різниці.

5. Результати дослідження

5.1. Результати розробленого підходу до створення даних для оцінювання стійкості монорейкового крана

Результатом є два збалансованих набори даних по 1000 конфігурацій для оцінювання стійкості на перекидання й на зсув. У табл. 1 подано описові

статистики для набору даних, згенерованого для оцінювання стійкості на перекидання.

Створений набір визначається широким діапазоном значень вхідних параметрів. У табл. 2 наведено описові статистики для набору даних, згенерованого для оцінювання стійкості на зсув.

Створені набори вихідних даних з описовими статистиками (табл. 1) призначені для обчислення утримувального моменту M_{yt} (1), перекидного моменту $M_{пер}$ (2), коефіцієнта вантажної стійкості β (3), скоригованого перекидного моменту $M_{пер}^*$ (14) і коефіцієнта вантажної стійкості β_{fem} крана з огляду на деформації (15).

Таблиця 1. Описові статистики створено набору даних для оцінювання стійкості крана на перекидання

Описові статистики	E, Па	I, м ⁴	G _{сг} , кН	G _в , кН	a, м	к, м	I _с , м
Кількість рядків	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
середнє	2.1×10^8	1.48×10^{-4}	659.14	99.54	12.42	2.52	9.90
Стандартне відхилення	0.00	1.32×10^{-4}	528.52	28.90	4.29	0.59	4.36
мінімум	2.1×10^8	2.0×10^{-6}	38.39	50.00	5.01	1.50	1.64
0.25	2.1×10^8	4.3×10^{-5}	293.49	74.61	8.71	1.98	6.28
0.50	2.1×10^8	1.07×10^{-4}	511.82	100.38	12.38	2.53	9.92
0.75	2.1×10^8	2.18×10^{-4}	847.97	124.62	16.26	3.03	13.71
максимум	2.1×10^8	5.8×10^{-4}	3745.36	149.89	19.98	3.50	18.31

Таблиця 2. Описові статистики для формування набору даних для оцінювання стійкості крана на зсув

Описові статистики	I _с , м	I, м ⁴	G _в , кН	G _{св} , кН	G _{сг} , кН	G _т , кН	a, м	b, м	c, м	h, м
Кількість рядків	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
середнє	17.4	4×10^{-4}	148.9	444.9	104.2	14.9	17.4	2.5	5.03	8.49
Стандартне відхилення	4.4	2.4×10^{-4}	29.9	162.8	22.8	2.99	4.4	0.3	0.57	0.87
мінімум	10	5.6×10^{-5}	100.1	125.7	62.5	10	10	2	4	7
0.25	13.5	2×10^{-4}	122.1	320.3	84.9	12.2	13.6	2.2	4.5	7.7
0.50	17.5	3.4×10^{-4}	147.3	421.9	103.1	14.7	17.5	2.5	5.1	8.4
0.75	21.2	5.6×10^{-4}	176.0	539.7	121.8	17.6	21.2	2.8	5.5	9.2
максимум	25	1.2×10^{-3}	199.9	973.8	157.5	20	25	3	6	10

Створені набори вихідних даних з описовими статистиками (табл. 2) призначені для обчислення горизонтальної сили H (4), сили тертя F_{fr} (5), коефіцієнта стійкості крана на зсув γ (6), горизонтальної сили H_{fem} (17) та коефіцієнта стійкості крана на зсув γ_{fem} (18) з огляду на деформації.

5.2. Результати перевірки запропонованого підходу до створення наборів даних для оцінювання стійкості монорейкового крана

На рис. 1 подано карти розподілу коефіцієнта стійкості β , отримані за результатами статичного (а) та МСЕ (б) аналізу. У процесі порівняння графіків

необхідно звернути увагу на положення лінії критичної стійкості $\beta = 1.4$. На графіку для МСЕ-моделі (б) ця лінія зміщена вище й більше вправо. Між пунктирними лініями позначено зону, де для статичної моделі $\beta \geq 1.4$, а для МСЕ-моделі $\beta < 1.4$.

Гістограми розподілу коефіцієнта β для обох моделей запропоновано на рис. 2. Гістограма для МСЕ-моделі зміщена вліво щодо гістограми для статичної моделі.

У табл. 3 наведено статистичні показники для розподілів, поданих на рис. 2. Середнє значення β для статичної моделі становить 1.398, тоді як для МСЕ-моделі – 1.365.

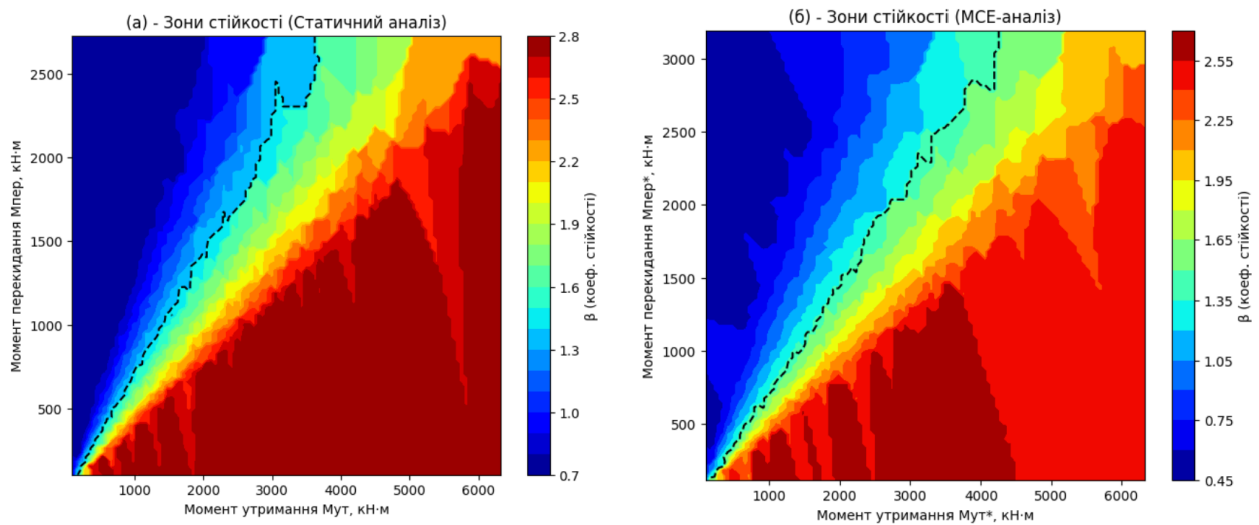


Рис. 1. Зона стійкості на перекидання: а – статичний аналіз; б – МСЕ-аналіз

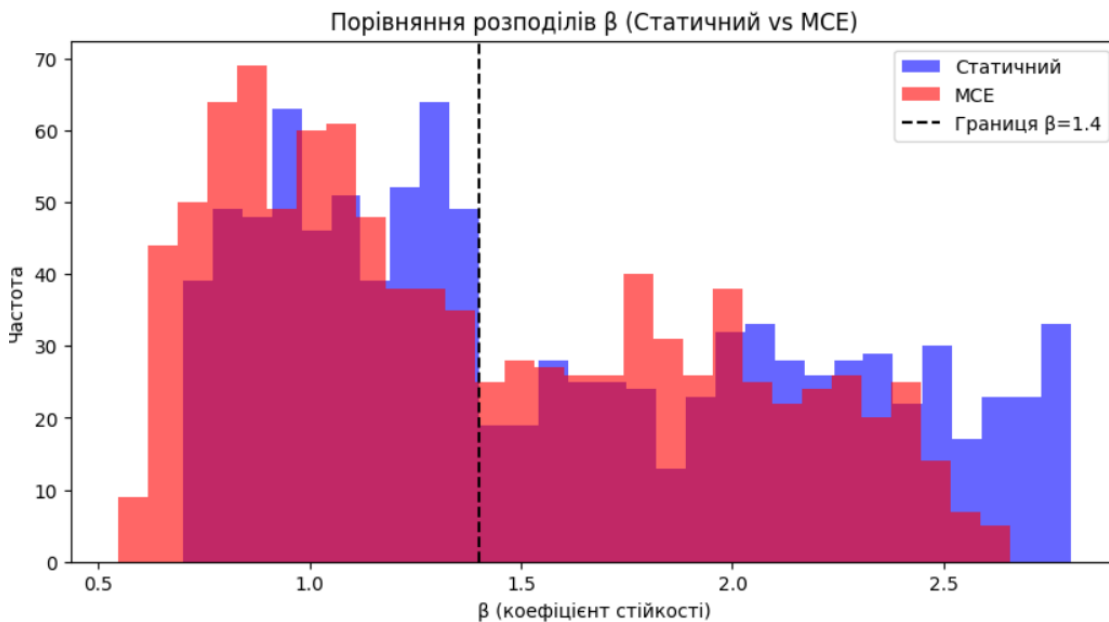


Рис. 2. Порівняння розподілів коефіцієнта стійкості на перекидання β

Таблиця 3. Статистика коефіцієнта стійкості β на перекидання

Модель	Середнє (mean)	Медіана (median)	Стандартне відхилення (std)
Статична	1.398	1.395	0.451
МСЕ	1.365	1.358	0.448

Отже, результати порівняння коефіцієнтів на рис. 1 та в табл. 3 підтверджують першу гіпотези дослідження для оцінювання стійкості монорейкового крана на перекидання. Результати парного тесту Стьюдента для перевірки статистичної значущості результатів моделювання для коефіцієнта стійкості β подано в табл. 4.

Таблиця 4. Парний тест Стьюдента для перевірки статистичної значущості результатів моделювання для β

Тест Стьюдента	t-статистика	p-value
$t(\beta, \beta_{fem})$	50.9	0

Розрахована t-статистика для коефіцієнта β становить 50.9, якщо значення p-value < 0.001.

На рис. 3, 4 запропоновано карти розподілу коефіцієнта стійкості на зсув γ . На графіку статичного аналізу (рис. 3) лінія критичної стійкості $\gamma = 1.5$ розташована інакше, ніж на графіку МСЕ-аналізу (рис. 4).

На графіку для МСЕ-моделі (рис. 4) більша частина простору параметрів розташована під лінією $\gamma = 1.5$.

На рис. 5 зображено гістограми розподілу коефіцієнта γ . Розподіл для МСЕ-моделі (червоний колір) зміщений вліво порівняно з розподілом для статичної моделі (синій колір).

Статистичні показники для розподілів коефіцієнта γ подано в табл. 5.

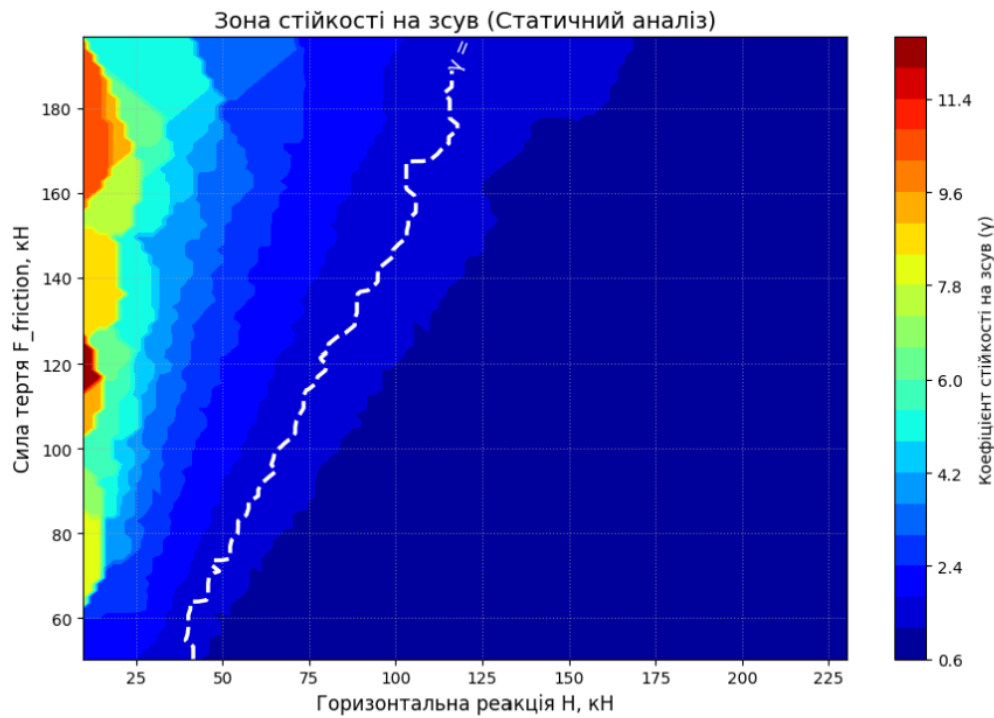


Рис. 3. Зона стійкості на зсув на основі статичного аналізу

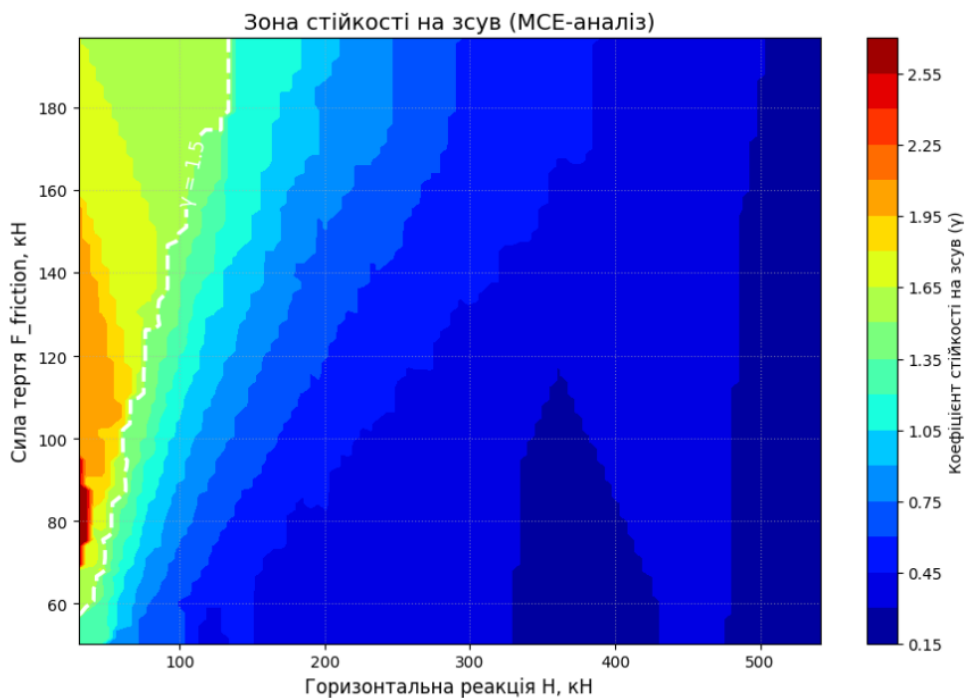
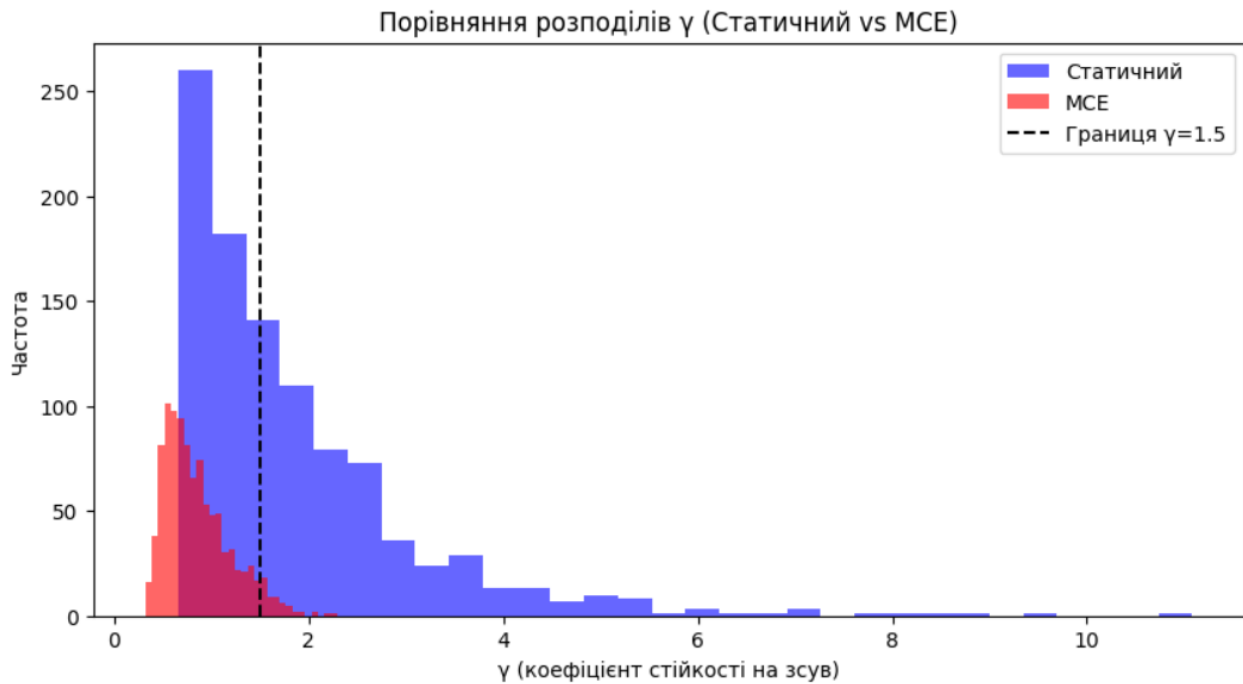


Рис. 4. Зона стійкості на зсув на основі МСЕ-аналізу

Рис. 5. Порівняння розподілів коефіцієнта стійкості на зсув γ Таблиця 5. Статистика коефіцієнта стійкості γ на зсув

Модель	Середнє (mean)	Медіана (median)	Стандартне відхилення (std)
Статична	1.87	1.505	1.516
MCE	0.85	0.774	0.326

Середнє значення γ для MCE-моделі (0.85) є нижчим, ніж для статичної моделі (1.87).

Результати проведеного парного тесту Стьюдента представлені в табл. 6.

Таблиця 6. Парний тест Стьюдента для перевірки статистичної значущості результатів моделювання для γ

Тест Стьюдента	t-статистика	p-value
$t(\gamma, \gamma_{fem})$	23.8	0

Розрахована t-статистика для коефіцієнта γ становить 23.8, а значення p-value – менше ніж 0.001.

6. Обговорення результатів

Досягнуті внаслідок обчислювальних експериментів результати демонструють систематичну розбіжність між статичною моделлю та розробленою скінченно-елементною моделлю (MCE). Ця різниця пояснюється ключовою особливістю MCE-моделі – врахуванням геометричної нелінійності, а саме пружної деформації (прогину) стріли під дією вантажу.

Для стійкості на перекидання (рис. 1, 2; табл. 3, 4) зниження коефіцієнта β в MCE-моделі є наслідком того, що прогин стріли призводить до збільшення реального плеча дії сили вантажу. Це зі свого боку збільшує перекидний момент M_{per} і, зрештою, зменшує коефіцієнт стійкості. Статична модель, розглядаючи стрілу як абсолютно жорстке тіло з фіксованим плечем, не здатна взяти до уваги цей дестабілізаційний ефект.

Для стійкості на зсув (рис. 3–5; табл. 5, 6) ефект є більш вираженим. Деформація стріли та всієї конструкції під навантаженням призводить до перерозподілу сил і значного збільшення горизонтальної реакції H , що прагне зсунути кран. Це зменшує коефіцієнт γ , що й пояснює практичне зникнення "безпечної зони" в MCE-моделі порівняно зі статичною.

Існування виявленої "небезпечної зони", де статична модель демонструє відповідність нормативам, а MCE – ні, є прямим доказом неадекватності спрощеного підходу. Отже, дослідження не лише підтверджує висунуті гіпотези, а й надає кількісне обґрунтування необхідності переходу до більш

досконалих, нелінійних моделей для реалістичного оцінювання безпеки.

Для обчислювальних експериментів використовувалася спрощена геометрія крана. Реальна конструкція має більш складні вузли, з'єднання та розподіл мас, що може вплинути на результати.

Висновки

У дослідженні розроблено підхід до створення наборів даних для оцінювання стійкості монорейкового крана. Інструментальна частина містить:

1) скінченно-елементну модель для оцінювання стійкості на перекидання, яка, на відміну від статичної моделі, бере до уваги деформацію згину стріли. Результатом її застосування є більш консервативна й реалістична оцінка: середнє значення коефіцієнта стійкості β зменшилося з 1.398 (статична модель) до 1.365 (МСЕ-модель). Це пояснюється тим, що прогин стріли збільшує реальне плече дії сили вантажу, посилюючи перекидний момент;

2) скінченно-елементну модель для оцінювання стійкості на зсув. Встановлено, що вплив деформацій на цей тип стійкості є ще більш критичним, ніж на перекидання. Кількісно це виражено в зменшенні середнього значення коефіцієнта γ майже удвічі – з 1.87 до 0.85. Такий значний ефект пояснюється перерозподілом сил внаслідок деформації конструкції, що суттєво збільшує горизонтальну реакцію, яка прагне зсунути кран. Процедурна основа описує послідовність дій для створення збалансованих наборів даних для оцінювання стійкості монорейкового крана.

Перевірено запропонований підхід до створення наборів даних. Підтверджено дослідницьку гіпотезу (H_1) про те, що врахування деформацій систематично знижує розрахунковий запас стійкості. Особливістю цього результату є виявлення "небезпечної зони" – режимів роботи, які статична модель хибно ідентифікує як безпечні, тоді як МСЕ-модель вже фіксує втрату стійкості. Це пояснюється нездатністю статичної моделі зважати на нелінійні ефекти, що призводить до неконсервативних оцінок.

Підтверджено дослідницьку гіпотезу (H_2) про статистичну значущість виявлених розбіжностей. Застосування парного t-тесту Стьюдента дало високі значення t-статистики ($t = 50.9$ для β і $t = 23.8$ для γ) за умови $p < 0.001$. Це свідчить про те, що зниження запасу стійкості в МСЕ-моделі є системним,

а не випадковим ефектом, що пояснюється фундаментальними розбіжностями у фізичних припущеннях, закладених в основу кожної з моделей.

Недоліком можна вважати відсутність моделі на основі натурних експериментів. Порівняння результатів МСЕ-моделювання з даними, отриманими з реального фізичного крана, значно підвищило б достовірність висновків.

Наукова новизна дослідження полягає в запропонованому підході до створення даних для систем моніторингу монорейкового крана на основі скінченно-елементного моделювання (МСЕ). Новий підхід бере до уваги деформації згину й перерозподіл внутрішніх зусиль, що дає змогу точно визначити "небезпечні зони" режимів роботи, які статичні моделі вважають безпечними.

Напрямом подальших досліджень є розроблення архітектури рекурентної нейронної мережі типу GRU (*Gated Recurrent Unit*), призначеної для прогнозування ризику втрати стійкості монорейкового пересувного крана в реальному часі за двома ключовими критеріями: на перекидання й на зсув. Розроблений і перевірений у цій роботі підхід до створення даних слугуватиме інструментом для створення великих синтетичних наборів даних, необхідних для навчання, тестування й перевірки рекурентної нейронної мережі.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не застосовували технології штучного інтелекту для написання цієї роботи.

References

1. Вапнічна, В. В., Сергієнко, М. І., Фролов, О. О. (2025), *Технологія, механізація та організація геотехнічного будівництва: гірничі і будівельні машини*: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Геоінженерія» спец. G16 Гірництво та нафтогазові технології, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 248 с., available at: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/75143> (last accessed 18.03.2026).
2. 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), e40239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40239>
3. Han, Z., Zhao, J., Leung, H., Ma, K.F. and Wang, W. (2019), "A review of deep learning models for time series prediction", *IEEE Sensors Journal*, 21(6), pp.7833-7848. available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8742529>
4. Li, W., Law, K. E. (2024), "Deep learning models for time series forecasting: A review", *IEEE Access*, 12, pp. 92306–92327. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3422528>
5. Терентьев, О., Соловей, Б. (2025), "Машинне навчання Байсової нейронної мережі з гамма-розподілом для оцінювання стійкості монорейкового крана", *Управління розвитком складних систем*, (62), pp. 134–140. DOI: <https://doi.org/10.2412-9933.2025.62.134-140>
6. 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", *Journal of Physics: Conference Series*, 3033(1), 012034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3033/1/012034>
7. Georgiev, C. (2024), "Enhancing tower crane stability through mast bracing and finite element analysis", *Proceedings of the Technical University of Sofia*, 74, pp. 8-14. DOI: <https://doi.org/10.47978/TUS.2024.74.01.002>
8. Tomasi, I., Solazzi, L. (2025), "Dynamic analysis of an offshore knuckle-boom crane under different load applications laws", *Applied Sciences*, 15(14), 8100. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15148100>
9. 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). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29918>
10. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090783>
11. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15071137>
12. Buczkowski, R., Żyliński, B. (2021), "Finite element fatigue analysis of unsupported crane", *Polish Maritime Research*, 28(1), pp.127-135, DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2021-0012>
13. Zhou, Z., Johns, B., Fang, Y., Bai, Y., Abdi, E. (2025), "Physics-informed neural network for load sway prediction in travelling autonomous mobile cranes", *Advanced Engineering Informatics*, 65, 103269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103269>
14. Воляннюк, В. О., Горбатюк, Є. В. (2021). *Розрахунок механізмів вантажопідіймальних машин*: навч. посіб., КНУБА, Київ, 136 с.
15. Склярів, І. О., Тонкачєв, В. Г., Склярєва, Т. С. (2024), *Конструкції будівель і споруд. Металеві конструкції*: навч. посіб., Каравела, Київ, 174 с.

Received (Надійшла) 13.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.02.2026

Publication date (Дата публікації) 30.03.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Соловей Богдан Анатолійович – Київський національний університет будівництва і архітектури, аспірант кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики; Київ, Україна;

Bohdan Solovei – Kyiv National University of Construction and Architecture, PhD Student at the Department of Information Technology for Design and Applied Mathematics; Kyiv, Ukraine;

e-mail: solovei_ba-2023@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-0328-1123>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59531932700>

Терентьев Александр Александрович – доктор технічних наук, Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики; Київ, Україна;
Oleksandr Terentyev – Doctor of Technical Sciences, Kyiv National University of Construction and Architecture, Professor at the Department of Information Technology for Design and Applied Mathematics; Kyiv, Ukraine;
e-mail: terentiev.oo@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9499-6635>
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211341629>

AN APPROACH TO GENERATING PHYSICALLY REALISTIC DATA FOR CRANE SAFETY MONITORING SYSTEMS BASED ON FINITE ELEMENT MODELING

This article focuses on the stability of monorail mobile cranes, particularly tipping and sliding stability coefficients. Traditional static models, which assume rigid structures, fail to account for deformation effects, leading to non-conservative and unreliable stability assessments. This makes them unsuitable for generating data used in AI-based safety monitoring systems. **The aim** of the study is to develop and substantiate an approach to generating data for assessing the stability of monorail traveling cranes based on finite element modeling, taking into account structural deformation effects. To achieve this aim, the following **tasks** are addressed in the paper: developing an approach to generating datasets for assessing the stability of a monorail crane based on finite element modeling; validating the proposed approach through a quantitative comparative analysis of the generated data with data obtained using the static approach; demonstrating the statistical significance of the identified differences. **Methods** used: experimental design, Euler-Bernoulli beam theory, statistical distribution analysis, and numerical simulation. **Results** show that FEM produces significantly different outcomes. The average tipping coefficient β decreased by 2.4% (from 1.398 to 1.365), and the sliding coefficient γ dropped nearly 50% (from 1.87 to 0.85), with high statistical significance ($p < 0.001$). **Conclusions:** FEM captures geometric nonlinearity, showing that elastic deformation alters the load path, increasing tipping moments and reducing stability margins. Unlike static models, the proposed method identifies unsafe operating zones previously misclassified as safe. Practical application: the model can generate synthetic data to train machine learning systems for real-time crane stability prediction, enhancing the safety of AI-driven monitoring technologies.

Keywords: numerical modeling; finite element model; data generation; safety monitoring; monorail crane.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Соловей Б. А., Терентьев О. О. Підхід до створення фізично достовірних даних для систем моніторингу безпеки кранів на основі скінченно-елементного моделювання. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2026. № 1 (35). С. 115–126. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2026.1.115>

Solovei, B. Terentyev, O. (2026), "An approach to generating physically realistic data for crane safety monitoring systems based on finite element modeling", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (35), P. 115–126. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2026.1.115>