

УДК 69.192

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0512>¹Микола Клименко,кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів,
<https://orcid.org/0000-0002-6166-8966>, e-mail: klymenko.mo@knuba.edu.ua¹Дмитро Альбещенко,аспірант, e-mail: dimaal94@ukr.net¹Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури, просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПІДЙОМНИХ МЕХАНІЗМІВ

АНОТАЦІЯ. У статті представлено результати дослідження, спрямованого на вдосконалення підходів до оцінювання надійності будівельної вантажопідйомної техніки, зокрема баштових кранів. Автор здійснює аналіз сучасних методик вибору та розрахунку показників надійності, приділяючи особливу увагу чотирьом основним властивостям надійності: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збережуваності. Визначено показники, що є пріоритетними для технічного оцінювання машин сезонного та інтенсивного використання.

У роботі розглянуто підходи, запропоновані провідними фахівцями у сфері надійності, і проаналізовано такі показники, як ймовірність безвідмовної роботи, параметр потоку відмов, коефіцієнт запасу надійності, коефіцієнт довговічності, а також комплексні індекси ремонтпридатності й готовності техніки до експлуатації.

Виконаний аналіз паспортних даних понад 100 моделей баштових кранів, виготовлених провідними світовими виробниками (Liebherr, Potain, Terex, Jaso). На основі отриманих статистичних даних побудовано залежності конструктивної маси та сумарної потужності двигунів від вантажопідйомності крану. Виведено відповідні рівняння, які можуть слугувати інженерною основою для попереднього проектування та прогнозування технічних параметрів аналогічної техніки.

Ключові слова: надійність, показники надійності, безвідмовна робота, потік відмов.

DESIGN FEATURES OF VERTICAL ROLL MILLS FOR EFFICIENT GRINDING OF CEMENT AND GRANULAR SLAG

ABSTRACT. The article presents the results of a study aimed at improving approaches to the assessment of the reliability of construction lifting equipment, particularly tower cranes. The author analyzes modern methods for selecting and calculating reliability indicators, with particular attention paid to the four key reliability properties: dependability (faultlessness), durability, maintainability, and storability. Priority indicators for the technical assessment of machines used seasonally or under intensive conditions are identified.

The study reviews approaches proposed by leading experts in the field of reliability and examines such indicators as the probability of failure-free operation, failure flow rate, reliability margin coefficient, durability coefficient, as well as integral indices of maintainability and operational readiness of machinery.

An analysis of technical specifications for over 100 models of tower cranes manufactured by leading global companies (Liebherr, Potain, Terex, Jaso) was conducted. Based on the collected statistical data, the dependencies of structural mass and total installed engine power on the lifting capacity of the cranes were established. Corresponding equations were derived, which can serve as an engineering basis for preliminary design and forecasting of the technical parameters of similar equipment.

Keywords: reliability, reliability indicators, failure-free operation, failure rate.

1. Постановка проблеми. Сучасні умови експлуатації будівельної техніки вимагають підвищеної ефективності, безпеки та довговічності машин. В умовах зростання технічної складності підйомних механізмів критичною стає проблема забезпечення їх високої надійності протягом усього життєвого циклу. Надійність розглядається як комплексна характеристика, що охоплює безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережуваність. Водночас відсутність єдиних підходів до вибору й

оцінки показників надійності ускладнює технічну експертизу та прогнозування ресурсу машин.

Особливої уваги потребує вантажопідйомна техніка, зокрема баштові крани, які експлуатуються в складних умовах будівництва. Існуючі методики часто обмежуються розглядом лише окремих аспектів надійності, не враховуючи їх комплексну взаємодію з конструктивними та енергетичними параметрами. Водночас технічні характеристики, такі як конструктивна маса й сумарна потужність привідних двигунів, безпосередньо впливають на надійність та функціональні можливості кранів.

Таким чином, актуальним є комплексне дослідження надійності підйомних механізмів у поєднанні з аналізом їх функціонально-технічних характеристик на основі реальних статистичних та паспортних даних машин провідних виробників.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Праця [1] присвячена розробці інтелектуальної системи моніторингу навантаження для будівельних підйомників із використанням датчиків та систем збирання інформації. Автори впроваджують концепцію реального часу в управління станом вантажопідйомної техніки, що дозволяє оперативно виявляти перевантаження, нерівномірне навантаження та інші потенційно аварійні ситуації.

В роботі [2] проведено глибокий аналіз конструктивних елементів вантажної машини за допомогою методу скінченних елементів (FEM). Дослідження зосереджується на напруженнях у критичних точках конструкції, особливо у зонах, де спостерігаються зосереджені навантаження.

В роботі [3] автори представляють повну нелінійну модель крана зі стрілою (5 ступенів свободи), включаючи кінематику, динаміку та систему управління. Увагу приділено адаптивному керуванню для компенсації коливань під час транспортування вантажів.

Публікація [4] фокусується на алгоритмах зменшення вібрацій та коливань, що виникають у шарнірно-зчленованих кранах. Автори використовують концепцію енергетичного управління та контролюваного згасання коливань для підвищення стабільності машини.

У статті [5] досліджується можливість застосування штучних нейронних мереж для оцінки залишкового ресурсу технічних об'єктів. Автори використовують моделі на основі навчання на експлуатаційних даних, що дозволяє прогнозувати термін служби компонентів.

Американські дослідники Б. Діллон та Ч. Сингх у своїх роботах акцентують увагу переважно на показниках безвідмовної роботи, зокрема на інтенсивності відмов і напрацюванні до відмови [7]. Водночас А.С. Проников пропонує розширене трактування цього аспекту, вводячи додаткові характеристики, такі як параметр потоку відмов і коефіцієнт запасу надійності [9]. І.Н. Кравченко зосереджується на показниках ремонтпридатності, серед яких виділяє контролепридатність, доступність, легкознімність та взаємозамінність [8]. В.І. Брауде, своєю чергою, приділяє увагу характеристикам безвідмовності та довговічності підйомно-транспортних машин [6].

Б.Ф. Хазов запропонував ширший спектр критеріїв надійності, однак низка важливих показників у його підході залишилася не розкритою [10]. Зазвичай для машин, що експлуатуються впродовж усього року, застосовуються показники трьох основних властивостей: безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності. Проте для будівельно-дорожньої техніки додатково враховується ще одна критично важлива характеристика - збережуваність, з огляду на сезонний характер її використання.

На підставі проведеного огляду літературних джерел постала необхідність системного порівняння показників надійності за всіма чотирма ключовими властивостями, що трактується у різних наукових підходах.

3. Мета роботи.

Проведення аналізу існуючих методик вибору і розрахунку показників надійності, а також дослідження паспортних даних баштових кранів провідних світових виробників з

метою визначення залежностей конструктивної маси та сумарної потужності двигунів від вантажопідйомності крану.

4. Матеріали та методи.

Безвідмовність характеризує неперервну роботу виробу без будь-якого втручання (ремонт, технічного обслуговування). Основним показником безвідмовності – є ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$.

Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що в межах заданого напрацювання не відбудеться відмови об'єкта [6].

$$P(t) = 1 - F(t), \quad (1)$$

де $F(t)$ – ймовірність відмови.

При звичайних вимогах до надійності виробу (відмова не призводить до катастрофічних наслідків) безвідмовність виробу характеризує безпосередньо значення ймовірності безвідмовної роботи, $P(t)$. Хоч $P(t)$ за відповідний період часу є основним показником безвідмовності, можуть бути випадки коли необхідні додаткові показники (табл. 1).

Таблиця 1 - Додаткові показники для розрахунку безвідмовності

Table 1 - Additional indicators for calculating reliability

Є відмови	$P(t) \rightarrow 0$	ω -параметр потоку відмов
Можливі відмови	$0 < P(t) < 1$	$P(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи
Недопустимі	$P(t) \rightarrow 1$	K_H - коефіцієнт надійності

Для періоду $t=T$, на протязі якого, як правило, можуть виникнути відмови об'єкта і відповідно $P(t) \rightarrow 0$, що характерно для відмов, які можуть бути легко усунені і не призводять до катастрофічних наслідків характеристиками безвідмовності можуть слугувати середнє число відмов або параметр потоку відмов.

Параметр потоку відмов ω - середнє число відмов об'єкта за одиницю часу [2]:

$$\omega(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt} = \frac{1}{T_0}, \quad (2)$$

де T_0 - напрацювання на відмову – відношення сумарної тривалості роботи (напрацювання) об'єкта до числа відмов, які виникли в цьому періоді (тобто середня тривалість безвідмовної роботи об'єкта), $\Omega(t)$ - середнє число відмов за час t .

Для високонадійних об'єктів, коли значення $P(t) \rightarrow 1$ використовують коефіцієнт запасу надійності [8]:

$$K_H = \frac{X_{max}}{X_{ek}} > 1, \quad (3)$$

де X_{max} - значення параметра при якому наступить відмова об'єкта; X_{ek} - екстремальна величина параметру.

Номенклатура показників довговічності включає в себе наступні одиничні показники довговічності : гамма-відсотковий ресурс , середній ресурс, середній термін служби, гамма-відсотковий термін служби.

В якості комплексного показника довговічності слід застосовувати коефіцієнт довговічності K_D , який дорівнює коефіцієнту технічного використання за весь час експлуатації [9]:

$$K_D = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_{ii}}} , \quad (4)$$

де τ_i - тривалість (трудомісткість) ремонту i -ї деталі машини (вузла); T_{ii} - термін служби (напрацювання) до відмови i -ї деталі машини (вузла). З формули слідує, що основним методом підвищення довговічності машини є зменшення часу, який затрачається на ремонт, і підвищення терміну служби деталей.

Оскільки коефіцієнт довговічності виражений через терміни служби і трудомісткості ремонту деталей машини, слід розглянути наступну складову надійності, яка полягає в пристосуванні виробу до попередження, виявлення і усунення відмов шляхом проведенням ремонтів і технічного обслуговування— ремонтпридатність.

Деякі дослідники надійності відносили ремонтпридатність до складової частини довговічності. Проте на сьогодні ремонтпридатність виділено як окрему повнозначну складову надійності, яка включає в себе наступні показники: гамма-відсотковий час відновлення, ймовірність відновлення, середня оперативна трудомісткість, тривалість, вартість ремонту. Застосовано до дорожньо-будівельної техніки ремонтпридатність характеризується ще й додатковими показниками: контролепридатністю, доступністю, легкознімністю, блочністю та взаємозамінністю. Комплексним показником ремонтпридатності може слугувати коефіцієнт готовності який оцінює непередбачені зупинки машини, які засвідчують те, що планові ремонти не повністю виконують свою роль.

Коефіцієнт готовності - ймовірність того, що об'єкт виявиться працездатним в будь-який момент часу, окрім запланованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається [10]:

$$\hat{K}_g = \frac{\sum_{n=1}^N t_n}{\sum_{n=1}^N t_n + \sum_{n=1}^N \tau_n} , \quad (5)$$

де t_n - сумарне напрацювання n -го об'єкта в заданому інтервалі експлуатації; τ_n - сумарна оперативна тривалість відновлення працездатності n -го об'єкта в тому ж інтервалі експлуатації; N - число об'єктів, що розглядаються в заданому інтервалі експлуатації.

Важливою властивістю для машин сезонного використання є збережуваність, яка означає здатність об'єкта чинити опір негативному впливу факторів довгого зберігання і транспортування, а також забезпечувати після цього її застосування із заданими функціональними параметрами. Збережуваність оцінюється терміном збережуваності, тобто календарною тривалістю зберігання або транспортування об'єкта, протягом і після якої зберігаються значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності у встановлених межах.

Наступним етапом роботи став аналіз паспортних даних більш ніж 160 моделей баштових кранів, які випускаються провідними світовими виробниками, такими як Liebherr, Jaso, Potain, Terex. На основі паспортних даних були визначені середні значення конструктивної маси та сумарної потужності двигунів для кранів певної вантажопідйомності (табл. 2).

Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунку функціонально-технічних параметрів баштових кранів

Table 2 – Initial data for calculating the functional and technical parameters of tower cranes

Вантажопідйомність q , кг	Конструктивна маса, т	Потужність двигунів, кВт
2000	23.38	17.70
2500	24.76	21.93
4000	24.47	24.45
5000	28.07	30.26
6000	40.89	37.16
8000	49.11	49.49
10000	58.02	62.50
12000	68.12	74.19
16000	81.43	84.05
20000	96.92	94.83
24000	104.85	110.33
25000	120.33	117.00
32000	128.14	147.00
40000	138.84	154.50
50000	165.05	163.50
62571	263.50	210.17

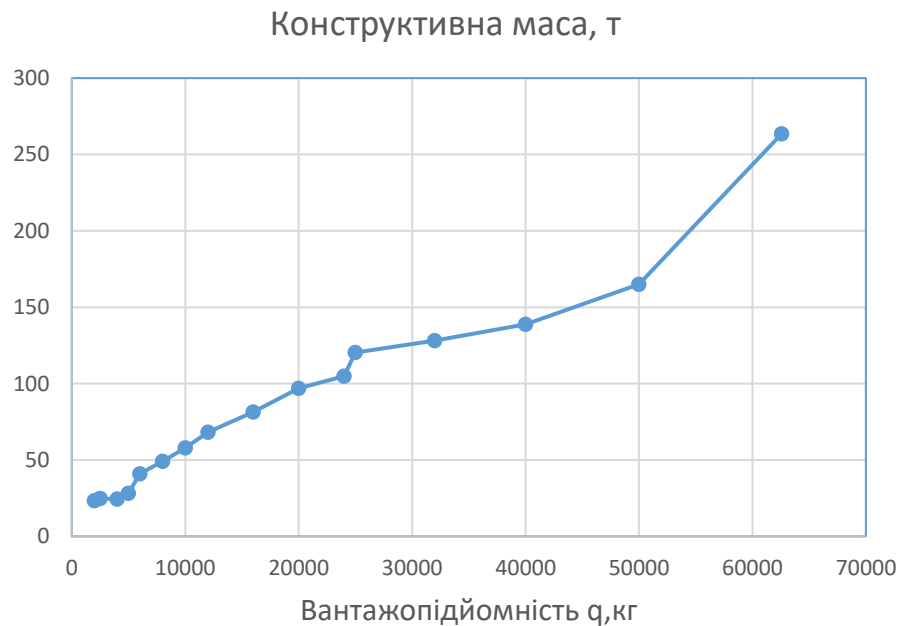


Рис. 1. Графік залежності конструктивної маси від вантажопідйомності крана

Fig. 1. Graph of the dependence of structural mass on the crane's lifting capacity

5. Результати. Отримані дані дозволили нам побудувати графіки залежностей конструктивної маси (рис. 1) та сумарної потужності двигунів (рис. 2) від вантажопідйомності крану.

Результати досліджень дозволили нам знайти рівняння для визначення залежності конструктивної маси крана від вантажопідйомності:

$$m = 4.6 + q + 2.71e^{-0.8}q^2 - 8.245q^{-12} + 1.95q^{-16} - 1.27q^5, \quad (6)$$

та залежність сумарної потужності двигунів від вантажопідйомності крана:

$$p = 5,81 + q^2 e^{-0,7} - 3,93 e^{-12} q^3 - 3,29 e^{-17} q^4 + 1,88 e^{-21} q^5 - 1,37 e^{-26} q^6, \quad (7)$$

де m – конструктивна маса крана, p – сумарна потужність двигунів крана, q – вантажопідйомність крана.

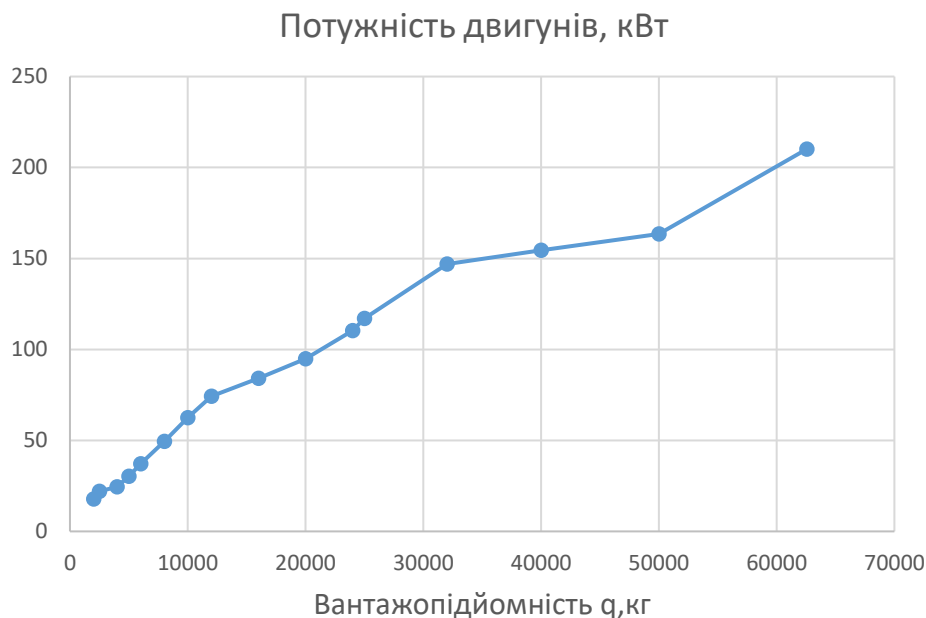


Рис. 2. Графік залежності сумарної потужності від вантажопідйомності крана

Fig. 2. Graph showing the dependence of total power on crane lifting capacity

6. Висновки.

Проведено аналіз показників надійності та зазначено показники, які важливі для оцінки надійності будівельної техніки. Ґрунтуючись на аналізі паспортних даних баштових кранів провідних закордонних і вітчизняних виробників, визначено середні значення конструктивної маси та сумарної потужності двигунів для різних значень вантажопідйомності. Отримані дані дозволили побудувати криві залежності конструктивної маси та сумарної потужності двигунів від вантажопідйомності та визначити рівняння, для опису цих залежностей. Дані рівняння є рекомендацією для передбачення можливих значень конструктивної маси крану та сумарної потужності двигунів для крана певної вантажопідйомності.

Отримані результати забезпечують створення моделі, яка дозволить оцінити стан, параметри конструкції та спрогнозувати ресурс роботи підйомних механізмів, які нині експлуатуються в Україні або імпортуватимуться в Україну.

Список використаних джерел

1. Ko, T., Shin, J., Lee, K., Kwon, S., Cho, C.-S., Chung, S., & Choi, G. (2022). Lifting Load Recording and Management Method of the Lift for Construction Based Sensing Information. *International Journal of High-Rise Buildings*, 11(2), 125–135.
2. Erfan Khodabandeh, Shahaboddin Amini, Aliakbar Taghipour. (2021) Finite element stress analysis of a combined stacker-reclaimer machine: A design audit report.
3. Modeling and Control of 5-DoF Boom Crane Michele Ambrosino, Marc Berneman, Gianluca Carbone, Rémi Crépin, Arnaud Dawans and Emanuele Garone Pages 514-521 (2020 Proceedings of the 37th ISARC, Kitakyushu, Japan).
4. Oscillation Reduction for Knuckle Cranes Michele Ambrosino, Arnaud Dawans, Brent Thierens and Emanuele Garone Pages 1590-1597 (2020 Proceedings of the 37th ISARC, Kitakyushu, Japan).

5. M.A. Herzog, T. Marwala, P.S. Heyns Назва: Machine and Component Residual Life Estimation through the Application of Neural Networks.
7. Dhillon, B. S., & Singh, C. (1981). Engineering Reliability: New Techniques and Applications. New York: Wiley. ISBN: 978-0-471-05014-8.

References:

1. Ko, T., Shin, J., Lee, K., Kwon, S., Cho, C.-S., Chung, S., & Choi, G. (2022). Lifting load recording and management method of the lift for construction based sensing information. *International Journal of High-Rise Buildings*, 11(2), 125–135.
2. Khodabandeh, E., Amini, S., & Taghipour, A. (2021). Finite element stress analysis of a combined stacker-reclaimer machine: A design audit report. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2106.02291>
3. Ambrosino, M., Berneman, M., Carbone, G., Crépin, R., Dawans, A., & Garone, E. (2020). Modeling and control of 5-DoF boom crane. In Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020) (pp. 514–521). Kitakyushu, Japan. <https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0071>.
4. Ambrosino, M., Dawans, A., Thierens, B., & Garone, E. (2020). Oscillation reduction for knuckle cranes. In Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020) (pp. 1590–1597). Kitakyushu, Japan. <https://arxiv.org/abs/2103.02509>.
5. Herzog, M. A., Marwala, T., & Heyns, P. S. (2009). Machine and component residual life estimation through the application of neural networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.05.008>.
7. Dhillon, B. S., & Singh, C. (1981). Engineering Reliability: New Techniques and Applications. New York: Wiley. ISBN: 978-0-471-05014-8.