

Терентьев Александр Александрович

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики, <https://orcid.org/0000-0001-6995-1419>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Соловей Богдан Анатолійович

Аспірант кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики,

<https://orcid.org/0009-0008-0328-1123>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

БАЙЕСОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ АВАРІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОГО БАШТОВОГО КРАНА

Анотація. У статті розглянуто методи запобігання та зниження ризику аварії під час експлуатації баштового крана. Увага приділяється методу, в якому байєсовий підхід інтегрується зі штучною нейронною мережею для визначення закону розподілу випадкової величини. Методикою роботи є обґрунтування доцільності використання байєсової нейронної мережі для зменшення рівня ризику аварії під час експлуатації будівельного баштового крана. Завдання, які вирішуються в статті: огляд та аналіз методів, які використовуються в сучасних умовах для оцінювання рівня ризику аварії під час експлуатації баштового крана; визначення причин, чому ці методи потребують удосконалення; пропозиція й обґрунтування доцільності використання байєсової нейронної мережі. Для реалізації поставлених завдань використовувалися такі методи: теорема Байєса, теорія ймовірності та математичної статистики, теорія нейронних штучних мереж. У результаті проведено аналізу сучасних методів, які запропоновані для визначення рівня ризику аварії під час експлуатації баштового крана, визначено, що багато методів спирається тільки на судження експертів – такі методи мають недоліки через неможливість перевірки таких знань; інші методи дають можливість визначити ймовірності оцінки появи аварійної події, але не можуть бути використані для визначення регулюючих дій щодо уникнення появи аварійної ситуації. Отже, щоб уникнути зазначених проблем у роботі запропоновано застосування байєсової нейронної мережі для визначення закону розподілу настання аварійної події, оскільки знання про закон розподілу дадуть можливість визначити бар'єрні значення факторів ризику, за яких аварійний стан не наступатиме. У роботі обґрунтовано доцільність запропонованого методу.

Ключові слова: байєсова нейронна мережа; теорема Байєса; закон розподілу ймовірностей; фактор ризику; баштовий кран

Постановка проблеми

Будівельні баштові крани широко використовуються в Україні у процесі цивільного, промислового і гідротехнічного будівництва під час монтажу будівель, споруд, а також зведення багатоповерхових цивільних і промислових будівель. При цьому аварії, які призводять до падіння вантажу, руйнування несучих елементів металевої конструкції, перекидання крана, трапляються не тільки на будівельних майданчиках України, а й по всьому світу. Саме тому розробці методів запобігання і зниження ризиків аварії з ватажопідіймальними кранами приділяють багато уваги в наукових роботах по всьому світу, такі

методи включають у склад інформаційні системи управління роботою крана.

Станом на грудень 2018 р. в звіті щодо «Оцінки діючих інформаційних систем» [1] зареєстрована тільки одна інформаційна система «Баштові крани», розроблена на замовлення Держгірпромнагляду ДУ «ННДПБООП», до основних функцій якої належать: облік і аналіз даних про стан баштових кранів; облік аварій; підготовки звітних та аналітичних документів.

Отже, розроблення інформаційної технології, методи якої будуть спрямовані на зменшення ризику аварії під час експлуатації будівельного баштового крана та вироблення коригуючих рекомендацій щодо стабілізації стану будівельного баштового крана під час експлуатації, є актуальним питанням.

Мета статті

Мета – провести огляд і аналіз методів, які використовуються в сучасних умовах для оцінювання рівня ризику аварії під час експлуатації баштового крана; визначити причини, чому ці методи потребують удосконалення; запропонувати метод байєсової нейронної мережі та обґрунтувати доцільності його використання для зменшення ризику аварії під час експлуатації баштових кранів.

Аналіз основних досліджень і публікацій

У роботі [2] аварія баштового крана розглядається як наслідок послідовності небезпечних станів, які спричинюються «діями кранівника»; «механізмами крана»; «зовнішнім середовищем»; «керуванням будівництвом». Автори на основі аналізу звітів щодо аварій, які траплялися з вантажопідіймальними кранами під час будівництва, виокремили чотири аварійні наслідки, які можуть бути спричинені вищезазначеними діями, а саме: «перекидання крана», «падіння вантажу», «зіткнення вантажу», «руйнування несучих елементів металевої конструкції», і для кожного наслідку визначили прямі фактори ризику за методом «дерева несправностей». На побудованому дереві методами булевої алгебри було визначено мінімальний набір факторів, у разі виникнення яких, настане один з трьох аварійних станів. До таких факторів належали: «руйнування фундаменту крана»; «порушення стійкості крана»; «невідповідні дії кранівника при підйомі вантажу». Отже, авторами були визначені основні фактори, за якими треба стежити аби не допускати аварії при експлуатації вантажопідіймального крана.

У роботі [3] запропоновано використовувати метод «краватки-метелика» для моніторингу та керування ризиками аварії під час експлуатації вантажопідіймальних кранів. У середину «метелика» було поміщено подію «втрата резервуара з речовиною», яка виникла через перешкоду роботи крана; в лівому боці «метелика» за методом «дерева несправностей» визначені фактори, поява яких може спричинити подію «втрата резервуара з речовиною». У правому боці «метелика» за методом «причин та наслідків» визначені аварійні ситуації, до яких призведе подія «втрата резервуара з речовиною» у випадку її настання. У лівому та правому боці «метелика» для кожного зв'язку «фактор – подія» та «подія – наслідок» було визначено «бар'єри» – контрольні значення, перевищення яких на лініях «фактор – подія» означає виникнення фактора ризику; а значення «бар'єрів» на лініях «подія – наслідок» визначають керуючі дії для запобігання виникнення аварійного наслідку. Отже, автори

запропонували не тільки метод якісної оцінки ризику, а й визначення відповідних запобіжних заходів.

У роботах [4; 5] для оцінки ризику аварій під час експлуатації будівельних баштових кранів при будівництві в Кореї та Ізраїлі відповідно було запропоновано використовувати метод Сааті в такій послідовності:

1. Із залученням експертів визначено деревоподібну ієрархічну структуру з факторами ризику першого, другого та третього рівнів. Так до факторів першого рівня належали: «роботи з демонтажу»; «підйомні роботи»; «монтажні роботи»; «управління на будівельному майданчику»; «конструкція крана».

2. Із залученням експертів визначено матриці парних порівнянь для всіх факторів другого рівня дерева, для кожного «батьківського» фактора окремо з першого рівня.

3. Обчислено власний вектор для кожної матриці порівнянь, який відповідає найбільшому власному числу цієї матриці.

4. Після перевірки матриці порівнянь на узгодженість – значення власного вектора взято за вагу впливу кожного окремого фактора.

5. За формулою Сааті визначено рівень ризику на кожному рівні ієрархії та загальний рівень. Після сортування за рівнями ризику, визначено фактори, поява яких призведе до аварійного стану, а саме: «погана видимість кранівника»; «погане закріплення болтів або шогли»; «невідповідне управління субпідрядниками»; «браковані запчастини крана, імпортовані з-за кордону». Отже, автори запропонували на основі проведеного аналізу для запобігання ризику аварії під час експлуатації баштових кранів прагнути не допускати появи визначених факторів.

У роботі [6] запропоновано поєднати метод якісного аналізу ризиків, а саме: метод Сааті з методом кількісного оцінювання ризику на основі Байєсової мережі для оцінки ризиків аварії з використанням будівельних кранів у такій послідовності:

1. На основі аналізу звітів, які містили опис нещасних випадків з баштовими кранами, було виявлено найбільш часті типи аварій, а саме: «падіння вантажу»; «зіткнення»; «ураження електричним струмом»; «зсув»; «механічні пошкодження».

2. Для кожної з п'яти визначених аварійних ситуацій визначено прямі та непрямі фактори ризику.

3. Фактори ризику розглянуто, як випадкові величини з невідомим законом розподілу, але відомою частотою появи були зв'язані в залежності з іншими факторами за допомогою орієнтованого ациклічного графа (мережа Байєса). Не з'єднані

мережею Байєса фактори розглядались як незалежні один від одного.

4. За теоремою Байєса визначено ймовірність появи аварійної ситуації за умови настання пов'язаних з нею факторів ризику.

5. За методом Сааті визначено вагу впливу аварійної ситуації на безпеку роботи крана.

6. Загальний ризик оцінено як функцію від аргументів – ймовірність появи аварійної ситуації та ваги її впливу на стан крана.

Отже, авторами було запропоновано метод визначення ризику аварійної ситуаціях з урахуванням ймовірнісних оцінок появи факторів ризику.

У роботі [7] визначено, що надійність основної несучої металеві конструкції крана, є основним фактором для забезпечення зниження ризику аварії баштового крана. Для забезпечення надійності несучої конструкції було визначено розрахункові положення крана з підйомною стрілою, при яких траплялись аварійні ситуації, з метою використання цих даних для навчання ймовірнісної нейронної мережі визначати ймовірність виникнення аварійної ситуації. Авторами використано традиційну архітектуру ймовірнісної нейронної мережі з трьома шарами: вхідний, радіальний та вихідний. Вихідний результат кожного нейрону радіального шару – це ймовірність, яка описується радіальною функцією. Отже, автори запропонували навчену нейронну модель, яка може бути в подальшому використана для оцінки залежності надійної роботи крана від інших вузлів крана.

Недоліки в проаналізованих роботах [2;4;5] пов'язані з тим, що впливові фактори були визначені на основі суджень експертів, які не можна перевірити.

Метод, запропонований в роботі [3], розглядає ланцюг «фактор ризику – аварійна ситуація – наслідок» як статичний процес та не враховує невизначеностей, які додатково до факторів ризику можуть спричинити виникнення аварійної ситуації.

Метод, запропонований в роботі [6], враховує взаємозв'язки між факторами і не спирається тільки на судження експертів, але оцінена ймовірність появи аварійної ситуації не дає можливість визначити рекомендації щодо зменшення ризиків, пов'язаних з нею факторів, оскільки відсутні знання щодо функції залежності аварійної ситуації від пов'язаних факторів ризику. Наприклад, визначимо два фактори ризику: Ф1: «неконтрольована амплітуда вантажу»; Ф2: «вітрове навантаження». Обидва фактори пов'язані між собою і можуть спричинити аварійний стан «втрата вантажу», як показано на рис. 1.



Рисунок 1 – Фрагмент байєсової мережі для оцінки ймовірності аварійної ситуації «втрата вантажу»

За даними частоти появи факторів Ф1 та Ф2 при появі аварії «втрата вантажу» визначено ймовірності: Ф1: так = 0.2; ні = 0.8. Ф2: таблиця 1; А: таблиця 2.

Таблиця 1 – Умовна ймовірність фактора ризику Ф2

	«неконтрольована амплітуда вантажу»	
Ф1	так	ні
так	0.8	0.2
ні	0.3	0.7

Таблиця 2 – Умовна ймовірність події «втрата вантажу»

		«втрата вантажу»	
Ф1	Ф2	так	ні
ні	ні	0	1
ні	так	0.8	0.2
так	ні	0.6	0.4
так	так	0.99	0.01

Отже, ймовірність того, що «станеться втрата вантажу» при «вітровому навантаженні» дорівнює

$$P(A | \Phi 1 = \text{так}) = \frac{\sum_{\Phi 2 \in \{\text{так}, \text{ні}\}} P(A = \text{так}, \Phi 1 = \text{так}, \Phi 2)}{\sum_{\Phi 1, \Phi 2 \in \{\text{так}, \text{ні}\}} P(A = \text{так}, \Phi 1, \Phi 2)} = \frac{0.1584 + 0.024}{0.1584 + 0.024 + 0.192 + 0} = 0.49.$$

Тоді, ймовірність того, що «станеться втрата вантажу» при неконтрольованій амплітуді дорівнює

$$P(A | \Phi 2 = \text{так}) = \frac{\sum_{\Phi 1 \in \{\text{так}, \text{ні}\}} P(A = \text{так}, \Phi 1, \Phi 2 = \text{так})}{\sum_{\Phi 1, \Phi 2 \in \{\text{так}, \text{ні}\}} P(A = \text{так}, \Phi 1, \Phi 2)} = \frac{0.1584 + 0.192}{0.1584 + 0.024 + 0.192 + 0} = 0.93.$$

У наведеному прикладі зафіксовано, що аварія «втрата вантажу» при «неконтрольованій амплітуді вантажу» трапляється з ймовірністю 93%, а корегуючі рекомендації за такого рівня ймовірності вже спрямовані на запобігання аварії, а не контролю фактора ризику.

У роботі [7] запропоновано оцінювати ймовірність аварії крана на основі тільки радіальної функції, а отже, у разі іншого закону розподілу, метод може бути неефективним, тобто вимагає вдосконалення.

Виклад основного матеріалу

Повернемося до наведено вище прикладу і припустимо, що нам відомий закон розподілу ймовірності $P(A|\Phi_1)$. Тоді на графіку розподілу можна визначити бар'єрне значення параметра Φ_1 таким чином, щоб ймовірність появи події A залишалась у визначених межах, як показано на рис. 2, і тоді корегувальні дії будуть спрямовані на упередження появи фактора ризику, а не усунення аварії.

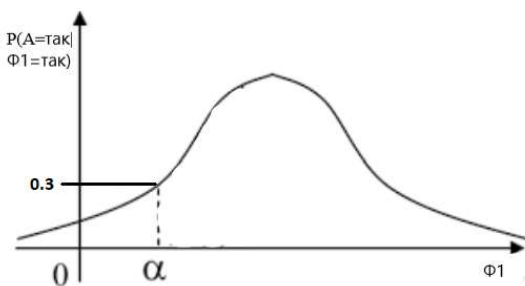


Рисунок 2 – Ймовірність появи фактора ризику «неконтрольована амплітуда вантажу» має не перевищувати бар'єр α , для забезпечення того, що умовна ймовірність появи аварійної події «втрата вантажу» була менше заданого рівня 0.3

Визначеної проблеми можна уникнути, якщо закон розподілу випадкової величини «аварія» є відомий або його можна визначити на основі вихідних даних, які описують умови роботи крана. Такі дані можна розглядати як «априорні» знання, і на основі Байєсового підходу та методів нейронної мережі отримувати «апостеріорний» закон розподілу. Далі наведемо обґрунтування доцільності застосування запропонованого методу.

Байєсовий підхід до визначення ймовірностей описується теоремою Байєса:

$$P(H|D) = \frac{P(D|H)P(H)}{P(D)} = \frac{P(D,H)}{\int_H P(D,H')dH'}, \quad (1)$$

де $P(H)$ – априорна, початкова гіпотеза про закон розподілу H ; $P(H|D)$ – апостеріорна ймовірність визначена після врахування вихідних даних D .

Якщо H розглядати як параметри деякого закону розподілу, тоді їх визначення отримується після розв'язання задачі знаходження найбільшої апостеріорної ймовірності

$$H = \operatorname{argmax}_H \log P(D|H) + \log P(H). \quad (2)$$

Для розв'язку (1) можна скористатися методом оптимізації, наприклад градієнтного спуску. Проте чисельні методи оптимізації не мають можливостей визначення додаткових залежностей, які наявні у вихідних даних D , а значить апостеріорна ймовірність $P(H|D)$, визначена після врахування вихідних даних D , може бути не точною. Така можливість є в нейронних мереж (НМ), які у випадку найпростішої архітектури (рис. 3), яка складається з X – шар входу; прихованого шару; ваги W – для зв'язку X з параметрами прихованого шару і функцією $F(x)$, яка визначає вихідний шар Y у процесі навчання за рахунок різних методів чисельної оптимізації, корегує значення ваги W , наближаючи таким чином параметри функції залежності $F(x)$, до оптимальних відповідно до прийнятої цільової функції.

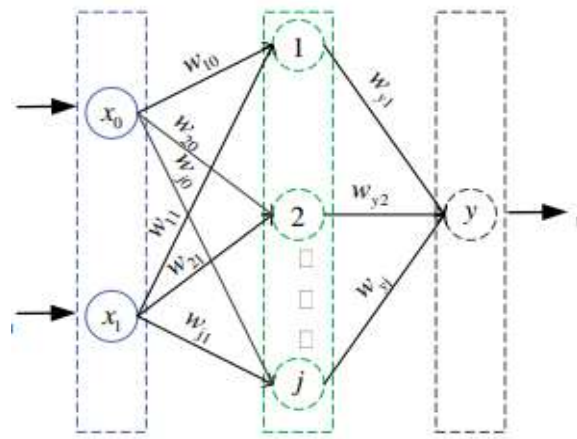


Рисунок 3 – Тришарова штучна нейронна мережа

БНМ відрізняється від НМ тим, що ваги W визначаються деяким розподілом $Q(H)$, параметри H якого коригуються в процесі навчання БНМ в результаті пошуку найбільшого наближення розподілу $Q(H)$ до $P(H|D)$ [8–10]. Це наближення обчислюється відстанню Кульбака – Лейблера відповідно формулі:

$$D_{KL}(Q(H), P(H|D)) = \int Q(H) \log \frac{Q(H)}{P(H|D)} dH = \int Q(H) \log Q(H) dH - \int Q(H) P(H|D) dH. \quad (3)$$

Кореговані в процесі навчання БНМ значення параметрів розподілу отримують за формулою:

$$\hat{H} = \operatorname{arg} \min(Q(H), D_{KL}). \quad (4)$$

Отже, застосування БНМ для визначення законів розподілу появи аварійної ситуації залежно від умов роботи крана, яку розглядатимуть як фактори ризику, дасть змогу визначити граничні значення для факторів ризику, які не мають бути перевищені для забезпечення безаварійної роботи крана.

Висновок

У пропонованій роботі проведено аналіз сучасних методів для визначення рівня ризику аварії під час експлуатації будівельного баштового крана. Визначено, що багато методів спирається тільки на судження експертів – такі методи мають недоліки через неможливість перевірки таких знань; інші методи дають можливість визначити ймовірності оцінки появи аварійної події, але не можуть бути використані для визначення регулюючих дій щодо уникнення появи аварійної ситуації.

З метою уникнення визначених проблем у цій роботі запропоновано застосування байєсової нейронної мережі для визначення закону розподілу настання аварійної події, оскільки знання про закон розподілу дадуть можливість визначити бар'єрні значення факторів ризику, за яких аварійний стан не наступатиме. У роботі обґрунтовано доцільність запропонованого методу.

Подальша робота буде спрямована на розроблення архітектури байєсової нейронної мережі для визначення закону розподілу появи аварійної ситуації залежно від умов роботи будівельного баштового крана.

Список літератури

1. Оцінка діючих інформаційних систем Державної служби України з питань праці та інших органів, пов'язаних із інспекцією праці, з особливою увагою до діяльності Держпраці, спрямованої на подолання незадекларованої праці. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---lab_admin/documents/projectdocumentation/wcms_718377.pdf.
2. Jiang, T. (2020, July). Safety risk analysis and control of tower crane. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 546, No. 4, p. 042070). IOP Publishing.
3. Ancione, G., Paltrinieri, N., & Milazzo, M. F. (2020). Integrating real-time monitoring data in risk assessment for crane related offshore operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (7), 532.
4. Kim, J. Y., & Kim, G. H. (2020). Importance ranking of accident factors of construction tower crane by AHP technique. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 8(4), 237–244.
5. Shapira, A., & Simcha, M. (2009). AHP-based weighting of factors affecting safety on construction sites with tower cranes. *Journal of construction engineering and management*, 135(4), 307–318.
6. Xiao, L., Tang, L. C., & Wen, Y. (2023). An innovative construction site safety assessment solution based on the integration of Bayesian network and analytic hierarchy process. *Buildings*, 13 (12), 2918.
7. ZUO, Y., Zhao, F., Yang, K., & Yang, R. (2021). Fatigue Life Assessment of Tower Crane Based on Neural Network to Obtain Stress Spectrum.
8. Jospin, L. V., Laga, H., Boussaid, F., Buntine, W., & Bennamoun, M. (2022). Hands-on Bayesian neural networks – A tutorial for deep-learning users. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 17(2), 29–48.
9. Charnock, T., Perreault-Levasseur, L., & Lanusse, F. (2022). Bayesian neural networks. In *Artificial Intelligence for High Energy Physics* (pp. 663–713).
10. Pomponi, J., Scardapane, S., & Uncini, A. (2021). Bayesian neural networks with maximum mean discrepancy regularization. *Neurocomputing*, 453, 428–437.

Стаття надійшла до редколегії 10.03.2024

Terentyev Oleksandr

DSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Information Technology for Design and Applied Mathematics,
<https://orcid.org/0000-0001-6995-1419>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Solovei Bohdan

PhD student of the Department of Information Technology for Design and Applied Mathematics,
<https://orcid.org/0009-0008-0328-1123>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

BAYESIAN NEURAL NETWORKS TO REDUCE ACCIDENTS WHILE TOWER CRANE OPERATIONS

Abstract. The subject of the article is methods of preventing and reducing the risk of an accident during the operation of a tower crane. The research focuses on the method when the Bayesian approach is integrated with an artificial neural network to determine probability distribution function of tower crane accident. The goal of the study is to provide the rational reasons why using a Bayesian neural network could reduce the level of accident risk while tower crane operating. To achieve the goal of the research were performed: review and analysis of the methods used in modern conditions to assess the level of accident risk when operating a tower crane; identified the reasons why these methods need improvements; proposed and provided justifications why

Bayesian neural network could be a powerful method in preventing tower crane accident. During review and analysis were used: Bayes theorem, theory of probability and mathematical statistics, theory of artificial neural networks. The summary from the results of conducted analysis of modern methods which are used to estimate accident risk level for tower crane included that some methods are based on expert judgements only which are not possible to verify so the risk's estimates obtained from those methods could be biased; other methods are good in estimation of the probability of happening of tower crane accident, however could not be used to prevent the accident to happen. In order to eliminated disadvantages of the used methods it is proposed to use Bayesian neural network to determine probability distribution function and use it to determine threshold value for risk factors which could provoke an accident's event happens during tower crane operation.

Key words: *Bayesian neural network, Bayesian theorem, probability distribution function, risk factor, tower crane*

References

1. Evaluation of the current information systems of the State Labor Service of Ukraine and other bodies related to labor inspection, with special attention to the activities of the State Labor Service aimed at overcoming undeclared work. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---lab_admin/documents/projectdocumentation/wcms_718377.pdf.
2. Jiang, T. (2020, July). Safety risk analysis and control of tower crane. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 546, No. 4, p. 042070). IOP Publishing.
3. Ancione, G., Paltrinieri, N. & Milazzo, M. F. (2020). Integrating real-time monitoring data in risk assessment for crane related offshore operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (7), 532.
4. Kim, J. Y. & Kim, G. H. (2020). Importance ranking of accident factors of construction tower crane by AHP technique. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 8 (4), 237–244.
5. Shapira, A. & Simcha, M. (2009). AHP-based weighting of factors affecting safety on construction sites with tower cranes. *Journal of construction engineering and management*, 135 (4), 307–318.
6. Xiao, L., Tang, L. C., & Wen, Y. (2023). An innovative construction site safety assessment solution based on the integration of Bayesian network and analytic hierarchy process. *Buildings*, 13 (12), 2918.
7. ZUO, Y., Zhao, F., Yang, K., & Yang, R. (2021). Fatigue Life Assessment of Tower Crane Based on Neural Network to Obtain Stress Spectrum.
8. Jospin, L. V., Laga, H., Boussaid, F., Buntine, W. & Bennamoun, M. (2022). Hands-on Bayesian neural networks – A tutorial for deep-learning users. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 17 (2), 29–48.
9. Charnock, T., Perreault-Levasseur, L. & Lanusse, F. (2022). Bayesian neural networks. *Artificial Intelligence for High Energy Physics*, 663–713.
10. Pomponi, J., Scardapane, S. & Uncini, A. (2021). Bayesian neural networks with maximum mean discrepancy regularization. *Neurocomputing*, 453, 428–437.

Посилання на публікацію

- APA Terentyev, O. & Solovei, B. (2024). Bayesian neural networks to reduce accidents while tower crane operations. *Management of Development of Complex Systems*, 57, 96–101, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.96-101](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.96-101).
- ДСТУ Терентьев О. О., Соловей Б. А. Байесова нейронная сеть для уменьшения аварийности эксплуатации строительного баштового крана. *Управление развитием сложных систем*. Київ, 2024. № 57. С. 96 – 101, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.96-101](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.96-101).