

УДК 621.873.3

**КЕРУВАННЯ СТІЙКІСТЮ БАШТОВОГО КРАНА ЗА ДОПОМОГОЮ
ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Канд. техн. наук В. О. Стефанов, асп. І. В. Держинський

**STABILITY MANAGEMENT OF A TOWER CRANE USING ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

PhD (Tech.) V. Stefanov, postgraduate student I. Dzerzhynskiy

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320673>



***Анотація.** У цій роботі подано систему забезпечення стійкості баштового крана за допомогою методів штучного інтелекту. Система містить датчики для збору даних про зовнішні навантаження та параметри крана, контролер із нейромережевою моделлю для прогнозування параметрів вітру та алгоритм керування механізмами крана. Система розроблена для забезпечення стійкості крана в робочому та неробочому станах.*

Результати дослідження показали, що запропонована система може ефективно забезпечувати стійкість баштового крана в робочому стані, прогнозувати небезпечні пориви вітру і вживати відповідних заходів для запобігання перекиданню. Використання цієї системи може значно знизити кількість аварій на баштових кранах.

***Ключові слова:** баштовий кран, стійкість, штучний інтелект, нейронна мережа, зовнішні навантаження, система безпеки, прогнозування, керування.*

***Abstract.** Tower cranes remain an irreplaceable tool in the construction industry. The market for tower cranes is expected to grow to over \$3 billion by 2025. Hundreds of thousands of tower cranes are in operation worldwide, with over 5,000 in Ukraine. Most of these cranes have reached the end of their service life.*

The limited size of construction sites forces the use of tower cranes with a small support base, which are prone to tipping over during assembly and operation. Accidents on tower cranes occur regularly, with an average of 2 per year in the United States. About half of all tower crane accidents are related to tipping over. The main causes of tower crane accidents are technical reasons (failure of technical devices and safety devices), organizational reasons (violation of technological and labor discipline), and external influences (wind load).

This paper presents a system for ensuring the stability of a tower crane using artificial intelligence methods. The system includes sensors for collecting data on wind parameters and crane parameters, a controller with a neural network model for predicting wind parameters, and an algorithm for controlling crane mechanisms. The system is designed to ensure the stability of the crane in working condition.

The results of the study showed that the proposed system can effectively ensure the stability of the tower crane in working condition. The system can predict dangerous wind gusts and take appropriate measures to prevent tipping over. The use of this system can significantly reduce the number of accidents on tower cranes.

Keywords: tower crane, stability, artificial intelligence, neural network, wind load, safety system, prediction, control.

Вступ. У найближчі десятиліття баштові крани залишатимуться незамінними помічниками в будівництві. За оцінками Global Market Insights, щорічні світові поставки в найближчі роки досягнуть 40 тисяч баштових кранів на рік. Сьогодні у світі експлуатують сотні тисяч баштових кранів, із них в Україні понад 5 тисяч, значну кількість із яких виготовлено на вітчизняних заводах, щоправда більшість відпрацювали встановлений термін експлуатації [1].

Баштові крани через свої конструктивні особливості можуть зазнавати негативного впливу перевантаження, нерівностей висоти рейкової колії крана (просідання окремих ділянок) і різких змін зовнішнього навантаження. Слід зазначити, що аварії за участю баштових кранів складають 40 % загальної кількості інцидентів зі стріловими вантажопідійомними кранами.

Аварії на баштових кранах як на вітчизняних підприємствах, так і у світі фіксують регулярно, вони відбуваються навіть за дотримання всіх правил експлуатації та вимог безпеки [2]. Високі показники аварійності за експлуатації баштових кранів стійко зберігаються протягом значного періоду спостережень, а останніми роками навіть намітилася тенденція на збільшення, через що баштові крани належать до категорії найбільш небезпечних з усіх типів вантажопідійомних кранів.

Близько половини всіх аварій баштових кранів пов'язано з їх перекиданням, часто цьому передують руйнування елементів несучих металокопункцій (рис. 1). Втрата стійкості призводить зазвичай до руйнування самої машини без можливості її подальшого відновлення, а також можливих вторинних руйнувань і людських жертв.



Рис. 1. Аварія баштового крана

Основними причинами аварій баштових кранів є несправність технічних пристроїв і пристроїв безпеки – більше 50 % усіх аварій. Значною, більше 30 %, залишається кількість аварій, що сталися з

організаційних причин, переважно через порушення технологічної та трудової дисципліни, неправильної чи неузгодженої дії некваліфікованого навченого персоналу [3, 4]. Щорічно у світі понад 20 % аварій

баштових кранів трапляються внаслідок дії сукупності несприятливих зовнішніх впливів, що діють на баштові крани, серед яких переважальним є вітрове навантаження. Вітрове навантаження – це випадковий процес. Нерівномірні пориви вітру, що виникають із непередбачуваною частотою та силою, збільшують ризик перекидання баштових кранів. Цей ризик зростає через динамічний характер вітрового навантаження, яке діє як раптовий і непередбачуваний імпульс. При цьому більше половини (близько 60 %) випадків аварій пов'язані з людським фактором [5], також непрофесійні дії машиніста крана призводять до появи аварійної ситуації або погіршують дії за зовнішніх навантажень, що раптово виникли.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням у галузі міцності та впливу на стійкість зовнішнього навантаження присвячені роботи М. П. Александрова, А. А. Вайнсона, М. Н. Гохберга, О. В. Григорова, В. С. Лавейкіна, М. А. Лобова, Ф. К. Іванченка та ін. Аналіз наукових праць за останні роки показав, що зусилля дослідників зосереджені на вдосконаленні моделей зовнішнього нестационарного навантаження, пошуку найбільш навантажених елементів металоконструкції баштових кранів певної конструкції та ухваленні інженерних і конструктивних рішень щодо зниження напружень, що виникають у них, а також розробленні адаптивних систем керування зниження впливу зовнішніх навантажень. Наприклад, конструкція баштового крана із рухомими вантажними візками або противагами, які синхронно змінюють виліт відповідно до зміни вильоту стріли та ваги транспортованого вантажу [6], спрощує пристрій протиперекидання та підвищує безпеку експлуатації крана, забезпечуючи стійкість крана через збільшення плеча протиперекидального моменту з автоматичною зміною відстані від осі опори крана до противаги та відновлення центра

тяжіння в межах його опорного контуру. Конструкція є простою у виконанні, оскільки не потребує додаткових противаг, що збільшують масу крана. Поворотна платформа подовжена на величину максимального ходу противаги. Автоматизація процесу знижує ризик впливу людського фактора під час перевантаження, оскільки датчики крену автоматично подають сигнали на блок керування, який за допомогою вантажної лебідки або гідроциліндрів швидко переміщує противагу, зменшуючи ризик перекидання крана. Переміщення противаги припиняється після досягнення рівноваги, що фіксується датчиком крену, який вимикає блок керування. Зі зниженням навантаження або зменшенням вітрового впливу відбувається крен у протилежний бік, і датчик крену знову активує блок керування, що приводить противагу у зворотний рух до досягнення рівноваги крана.

Одним із варіантів визначення напрямку вітрового потоку є використання датчиків із закладеними функціями визначення швидкості та напрямку вітру. У будь-якому стані з перевищенням заданих параметрів роботи крана, що ведуть до втрати стійкості, система формує сигнал для апаратури керування стійкістю. Апаратура керування стійкістю являє собою гідродинамічну або електромагнітну муфту, встановлену в кінематичну схему механізму повороту крана, розрив між гальмом і редуктором повороту крана (рис. 2).

Інтегрована в механізм повороту башти гідродинамічна муфта [7], що змінюється, дає змогу реалізувати функцію автоматичного керування баштовим краном: у режимі нормальної роботи кранової установки гідродинамічна муфта працює з повною віддачею, забезпечуючи практично жорсткий кінематичний зв'язок. Кінетична енергія вітрового впливу спрямована на перекидання кранової установки, що трансформується в потенційну енергію повороту башти,

причому за умови неповного відтоку рідини частина енергії розсіюється в гідродинамічній муфті. Далі зі збільшенням швидкості вітрового потоку контролер посилає керівні сигнали на гідродинамічну муфту задля забезпечення повного відтоку

рідини. Жорсткий кінематичний зв'язок «гальмо – гідродинамічна муфта – редуктор» порушується, і, як наслідок, кінетична енергія вітру трансформується в потенційну енергію повороту башти, тим самим забезпечуючи стійкість.

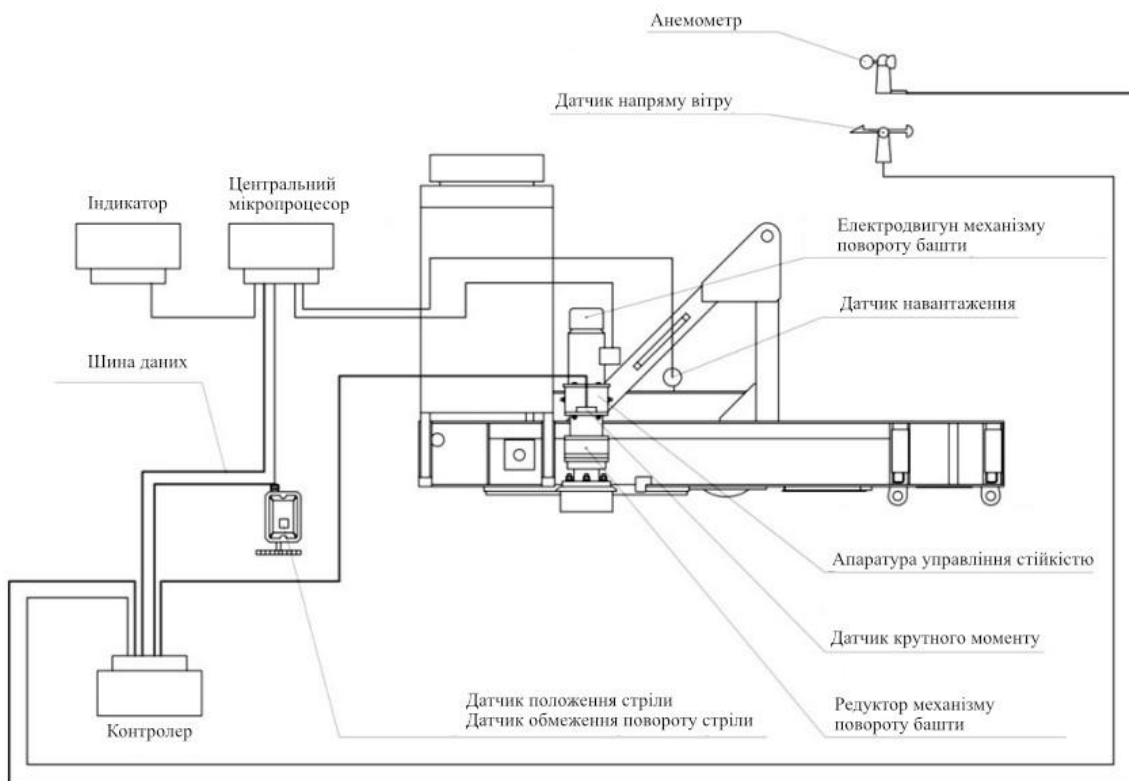


Рис. 2. Схема розташування апаратури керування стійкістю крана

Основною проблемою для задавання вихідних значень залишається розрахунок зовнішніх навантажень і вибір місця знімання фактичних даних. Нормативний спосіб розрахунку стійкості баштових кранів [8, 9] є доволі трудомісткою процедурою для проектувальника і не враховує можливості сучасних методів розрахункового аналізу несучих конструкцій, які дають змогу побудувати більш точні моделі кранів і провести уточнений аналіз їхньої стійкості за статичних навантажень. Нормативна модель стійкості баштового крана не враховує різні експлуатаційні стани баштового крана, а

також виникнення перехідних процесів на початку піднімання вантажу, повороту стріли та переміщення крана. Як вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів стійкості баштового крана пропонують використовувати реакції в місці контакту ходових коліс із крановою рейковою колією.

Отже, для розрахунку коефіцієнтів стійкості баштового крана і вихідних даних для постановки завдання системі керування пропонують використовувати реакції в чотирьох несучих стрижнях башти, у місці максимальних навантажень башти і стріли (рис. 3).

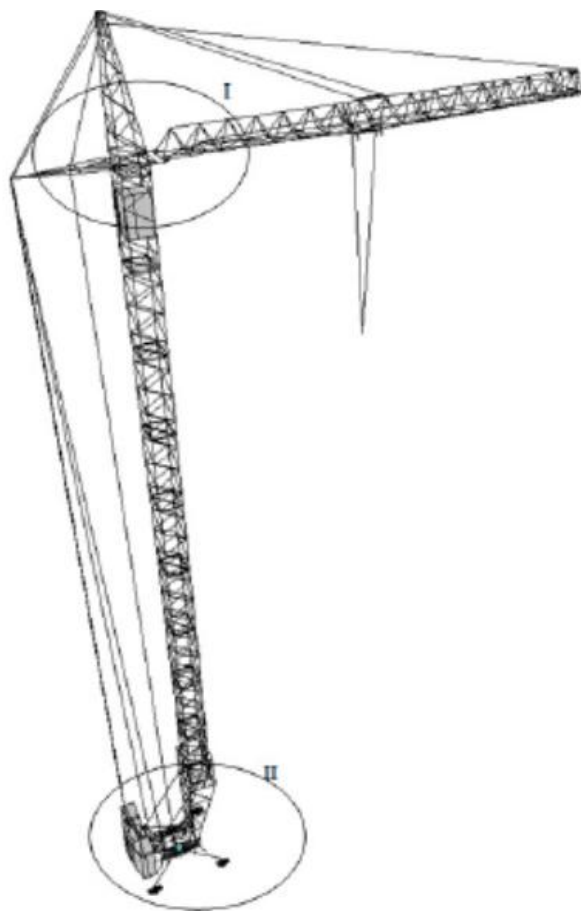


Рис. 3. Схема розташування максимальних навантажень башти і стріли

Визначення мети та завдання дослідження. Більшість авторів вказують на недосконалість методів проектування кранів, що не дають змогу врахувати податливість металоконструкції крана та наявність додаткових, у тому числі пікових, навантажень. Але головне в розрахунках – не можна врахувати неправильність дій персоналу, особливо у критичних ситуаціях, які найчастіше передують аварії. Тому вирішення питання виключення дії людського фактора для забезпечення стійкості баштових кранів за дії випадкових динамічних вітрових та інших зовнішніх навантажень є необхідним. А вдосконалення сучасних систем керування кранів для безпечної експлуатації на основі цифрових технологій є вкрай актуальним.

Основна частина дослідження. Нині ведуть дослідження з керування системами

баштового крана, яке включає адаптивне керування [10], формування команд [11, 12], нейронну мережу [13], керування плануванням посилення [14] і прогнозне керування моделлю [15]. З іншого боку, алгоритми нечіткої логіки також широко застосовували для контролю вібрації в різних системах [16-21]. Керування алгоритмами нечіткої логіки має сильну адаптивність і не потребує точної моделі керованого об'єкта завдяки своєму інтелектуальному методу [22]. Зазвичай сучасні методи керування для складної системи розроблені на основі лінеаризованої системної динаміки, для більшості потрібне точне знання моделі [10]. На відміну від цього, нечітко логічне керування має перевагу, яка заміняє роль математичної моделі нечіткою моделлю, заснованою на правилах, побудованих у форматі «якщо-

тоді». Запропоновано різні конструкції контролерів алгоритмів нечіткої логіки в системах баштових кранів [16-18, 22, 23].

Найбільш поширеними пристроями контролю стійкості від вітрових навантажень робочого стану є різновиди обмежувачів вантажопідйомності. Ці прилади працюють в індикаторному режимі, тобто в разі виникнення аварійної ситуації відбувається знеструмлення крана з підніманням вантажу вище від номінального, це є умовою збереження стійкості. Але за критичної швидкості вітру відбувається лише оповіщення машиніста (звукове, світлове) без впливу на керування вантажопідйомної машини.

Система вітрового захисту заснована на реєстрації швидкості вітру та утриманні пересувного крана протиугінними захватами.

Недолік систем вітрового захисту – приведення в дію захисних заходів після реєстрації небезпечних параметрів вітрових навантажень, відсутність в обмежувачів вантажопідйомності функції контролю стійкості до перекидання. Рішення – впровадження в алгоритми керування вантажопідйомними машинами функції екстраполяції на основі нейронечіткої логіки.

Система забезпечення стійкості має виконувати функції забезпечення контролю параметрів баштового крана та вітрових

навантажень і виробляти сигнали керування механізмами приводів.

Забезпечення стійкості баштових кранів за ненормованих зовнішніх впливів із використанням методів штучного інтелекту є актуальним.

Для завдань прогнозування параметрів вітрового навантаження використовують нечітку логіку, штучні нейронні мережі, нейронечітку логіку.

Принцип заснований на корегуванні положення поворотної частини баштового крана відносно напрямку вітру та видаванні попереджувальних сигналів на механізми для примусової зміни кутового положення поворотної частини.

Система безпеки заснована на нейромережевому та логічному алгоритмах. Нейромережевий алгоритм використовують для прогнозування значень напрямку та швидкості вітру, а логічний алгоритм – визначення небезпечної швидкості вітру (на основі прогнозованих значень) у пориві та керування приводами з метою завчасного переведення баштового крана в безпечне положення.

Система безпеки баштових кранів складається з підсистеми збору інформації про параметри вітру та баштового крана, підсистем нейромережевого прогнозування та керування приводами. Структурна схема подана на рис. 4.

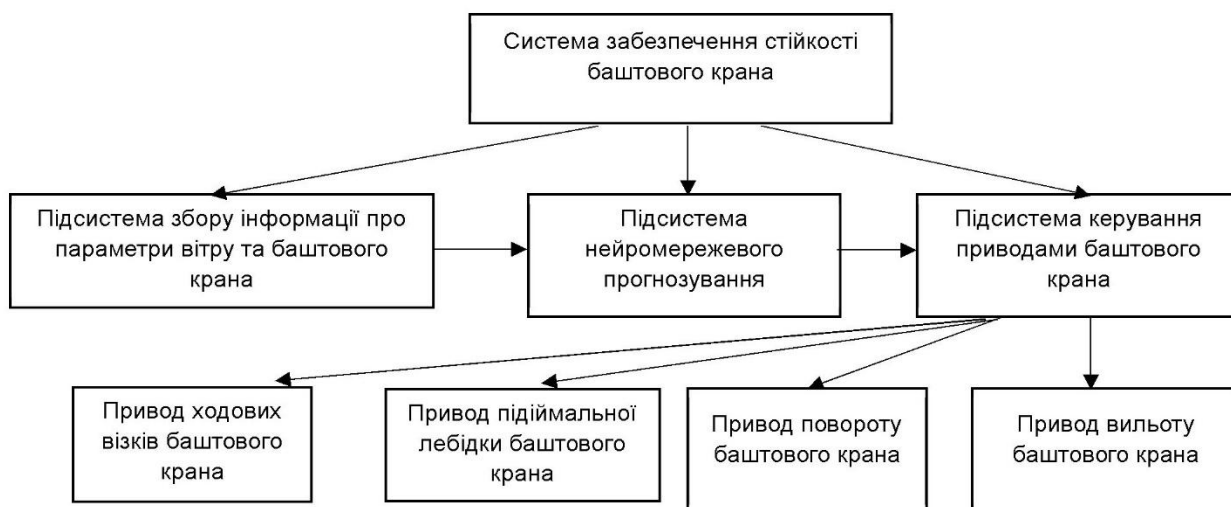


Рис. 4. Структурна схема системи безпеки баштового крана

Підсистема збору інформації про параметри вітру та баштового крана складається з датчиків, більшість із яких є в сучасному обмежувачі вантажопідйомності – датчики швидкості і напрямку вітру, положення стріли, висоти піднімання гака, вильоту гака. Додатково автором запропоновано оснастити кожен з чотирьох вертикальних стійок секції біля основи баштового крана тензодатчиками, а місця зчленування секцій з основою і оголовком крана промисловим триосьовим акселерометром-гіроскопом.

Підсистема нейронного прогнозування та керування приводами баштового крана заснована на промисловому контролері.

Умовою безпеки є видавання підсистемою нейронного прогнозування сигналу керування та його обробки підсистемою керування для спрацьовування приводів до виникнення критичного моменту перекидання від поривів вітру.

Нейронна модель для прогнозування є нелінійною авторегресійною залежністю

$$x_{\text{пр}}(t) = x(t - \Delta), \dots, x(t - N\Delta), \quad (1)$$

де $x_{\text{пр}}(t)$ – прогнозоване значення;

$x(t - \Delta), \dots, x(t - N\Delta)$ – попередні значення, виміряні з кроком Δ (крок дискретизації реєстрованих значень).

Прогнозування реалізують на основі нейронної моделі з пам'яттю, якою є лінійна затримка часу.

На рис. 5, а подана структурна схема прогнозування швидкості вітру, на рис. 5, б – структурна схема прогнозування напрямку вітру.

Для прогнозування швидкості та напрямку вітру використовуємо нейронну модель прямого поширення з лінійною затримкою, схеми яких подані на рис. 6 і 7.

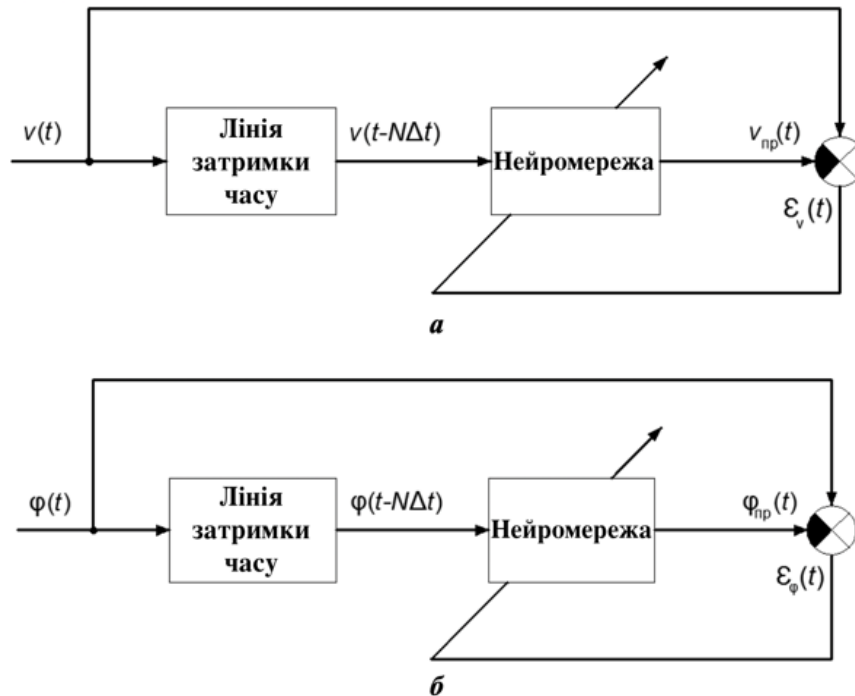


Рис. 5. Структурні схеми нейронної моделі прогнозування швидкості (а) і напрямку вітру (б)

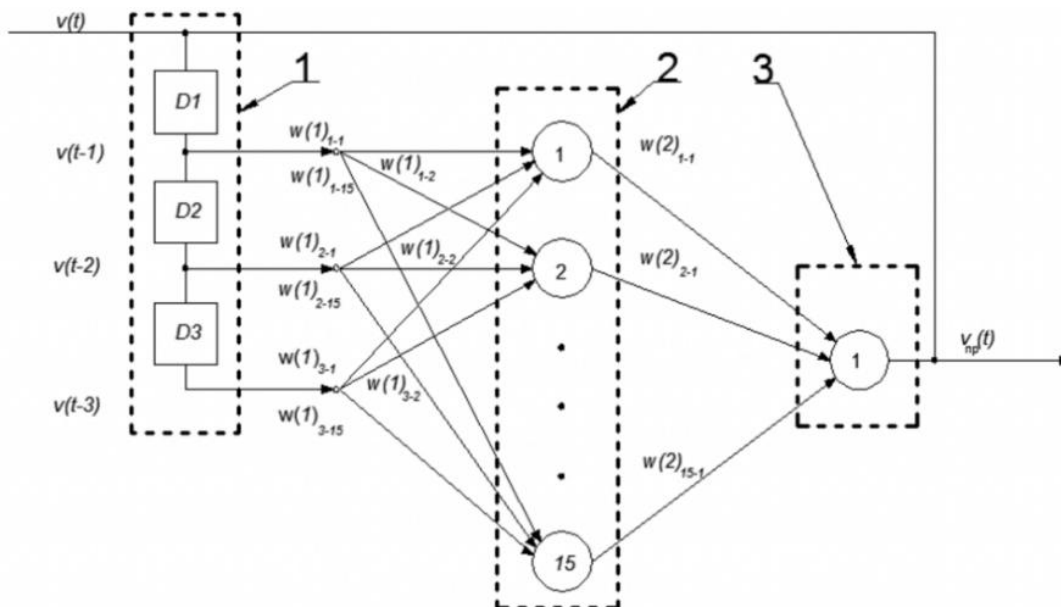


Рис. 6. Схема неймережевої моделі прогнозування швидкості вітру:
 1 – лінія затримки з відводами; 2 – проміжний шар; 3 – вихідний шар;
 $v(t)$ – поточне значення швидкості вітру; $v_{np}(t)$ – прогнозоване значення швидкості вітру;
 $v(t-1) \dots v(t-3)$ – попередні значення швидкості вітру;
 $w(1)_{1-1} \dots w(1)_{3-15}, w(2)_{1-1} \dots w(2)_{15-1}$ – вагові коефіцієнти;
 $D1 \dots D3$ – елементи лінії затримки

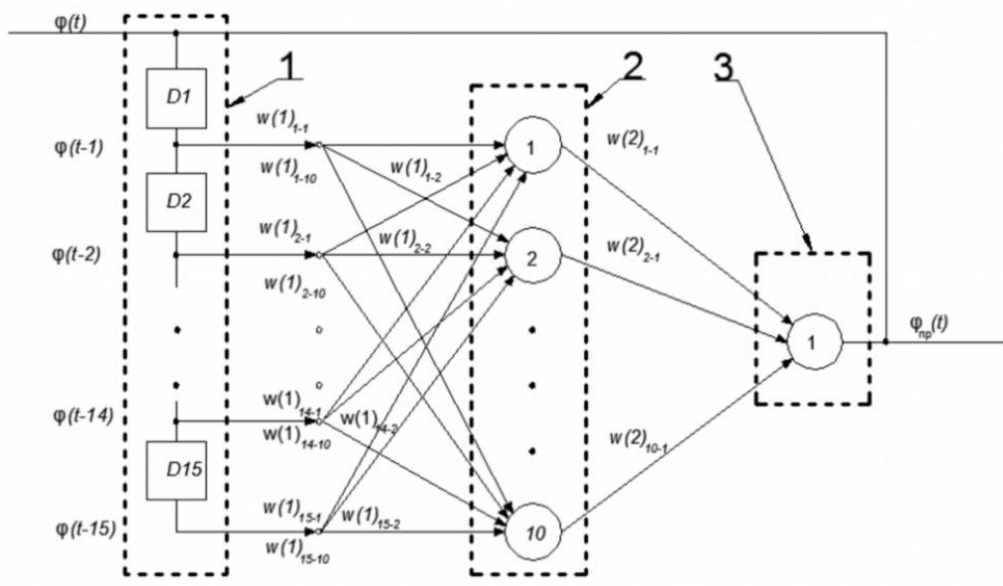


Рис. 7. Схема неймережевої моделі прогнозування напрямку вітру:
 1 – лінія затримки з відводами; 2 – проміжний шар; 3 – вихідний шар;
 $\varphi(t)$ – поточне значення напрямку вітру; $\varphi_{np}(t)$ – прогнозоване значення напрямку вітру;
 $\varphi(t-1) \dots \varphi(t-15)$ – попередні значення напрямку вітру;
 $w(1)_{1-1} \dots w(1)_{15-10}, w(2)_{1-1} \dots w(2)_{10-1}$ – вагові коефіцієнти;
 $D1 \dots D15$ – елементи лінії затримки

У промисловий контролер закладено алгоритм завчасного керування приводами повороту, піднімання та/або зміни вильоту. Алгоритм призначений для видавання сигналу керування на основі нейромережевої моделі (програма нейромережевої моделі записана в пам'ять контролера) і значення датчиків швидкості і напрямку вітру. Прогнозуючи небезпечний порив і його напрямок, контролер формує сигнал керування, що надходить на привод повороту і/або привод зміни вильоту гака, для розвороту поворотної частини баштового крана в напрямку прогнозованого пориву вітру. Якщо розворот відбувається з вантажем, то небезпечних прискорень вантажу нема, оскільки розворот проводиться заздалегідь із номінальною кутовою швидкістю.

Система безпеки автоматично втручається в роботу машиніста лише для прогнозування небезпечної швидкості вітру, амплітуди коливання та зростання завантаженості однієї опори, що перевищує допустиме значення.

Система розроблена для забезпечення стабільності баштового крана в робочому стані. У неробочому стані баштовий кран стійкіший до вітрових навантажень за рахунок меншої вітрильності. У неробочому стані триває збирання інформації про параметри вітру. Можливе корегування положення баштового крана в неробочому стані за умови підключення його до мережі живлення після закінчення зміни.

Для запобігання відмови системи безпеки застосовують такі дії:

- навчання нейромережевим алгоритмам;
- планово-попереджувальні перевірки нейромережевих алгоритмів.

Для виконання першого пункту необхідно створити базу даних параметрів вітру місцевості, де буде експлуатований баштовий кран. База даних повинна мати значення параметрів вітру за тривалий період спостереження з різними кроками реєстрації. Далі відбувається навчання

нейромережевих алгоритмів у лабораторних умовах на початок експлуатації баштового крана. Потім контролер із навченими алгоритмами підключають до шафи керування баштового крана.

З проведенням перевірок нейромережевих алгоритмів під час експлуатації баштового крана можливе донавчання контролера. Це пов'язано з тим, що у процесі роботи баштового крана база даних параметрів вітру постійно поповнюється.

Безперервний контроль з екстраполяцією параметрів для майбутнього стану дасть змогу реалізувати запобіжний захист, який забезпечує раннє виявлення небезпечних поривів вітру.

Для перевірки теоретичних результатів досліджень доопрацьована фізична модель стрілової системи баштового крана на базі навчальної моделі КБ403А, яка дала змогу в лабораторних умовах провести експериментальні дослідження. Під час досліджень за допомогою лебідки під різними кутами до осі башти відбувалося навантаження. Датчики зусиль були встановлені на чотирьох несучих стрижнях башти, у місцях максимальних навантажень башти і стріли. Датчики рівня встановлювали в трьох точках, віддалених за висотою башти. Зміни навантаженості башти виводили на екран ПК, а розроблена програма давала команду механізму повороту на зміну кута для зниження навантаженості. Крім того, розроблено методику проведення експериментальних досліджень, підібрано вимірювально-реєструвальне обладнання (датчики та система збору даних). Керування рухами механізмів лабораторної установки на базі баштового крана КБ-403А у масштабі 1:20 (рис. 8) проводили за допомогою розробленої комп'ютерної програми. Отримані у ході експериментів дані оброблені за допомогою методів математичної статистики. На основі проведених досліджень обґрунтовано будову системи автоматичного керування

механізмами баштового крана та запропоновано правила її функціонування. Для підтвердження отриманих

експериментальних даних заплановано проведення експерименту на нинішній моделі баштового крана.



Рис. 8. Модель баштового крана КБ-403А (масштаб 1:20)

Висновки. Запропонована методика визначення стійкості баштового крана на основі визначення опорних реакцій на чотирьох несучих стрижнях башти за допомогою тензодатчиків і промислового триосьового акселерометра-гіроскопа та комп'ютерного моделювання. При цьому з'являється можливість розробити і застосувати систему автоматизованого моніторингу та систему автоматизованого контролю за стійкістю крана.

Подана система забезпечення стійкості виконує функції забезпечення контролю параметрів баштового крана та навантажень за ненормованих зовнішніх впливів із використанням методів штучного інтелекту.

Подальшу роботу зведено до порівняння результатів роботи систем керування, побудованих на методах нечіткої логіки, штучних нейронних мереж і нейронечіткої логіки.

Список використаних джерел

1. Кружилко О. Є., Майстренко В. В., Атаманюк О. О. Перспективи використання інформаційної системи обліку баштових кранів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2015. № 29. С. 64-69. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pop_2015_29_10, 2015. (дата звернення: 02.05.2024).
2. Rosenfeld J. Safety Data About Tower Crane Accidents. URL: <https://www-rosenfeldinjurylawyers-com.translate.goog/news/what-osha-safety-data-tells-us-about-tower-crane-accidents> (last access 03.05.2024).

3. Fedina E. V., Pushenko S. L. Analysis of the main causes of injuries when operating tower cranes. *Inzhenernyi vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]*. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/> (дата звернення: 02.05.2024).
4. Polina N., Povetkina Elena A. Khamidullina Analysis of emergency and industrial injuries when dealing with loading mechanisms. XXI century. *Technosphere safety*. 2018. Vol. 3(4). P. 40—50. DOI: 10.21285/1814-35202018-4-40-50.
5. Короткий А. А., Павленко А. Н., Кинжибалов А. А., Кинжибалов А. В. Системы безопасности башенных кранов в аспекте решения проблемы аварийности и производственного травматизма. *Вопросы безопасности*. 2018. № 5. С. 25-34.
6. Design, construction, and control of a novel tower crane / J. J. Rubio-Avila, R. Alcantara-Ramirez, J. Jaimes-Ponce, I. I. Siller-Alcala. *International journal of mathematics and computers in simulation*. Mexico, 2007. Vol. 1, iss. 2. P. 119-126.
7. Рациональні приводи підйомно-транспортних, дорожніх машин та логістичних комплексів: монографія / О. В. Григоров, В. В. Стрижак, Н. О. Петренко та ін.; за ред. О. В. Григорової. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. 352 с.
8. РД 22-166-86. Краны башенные строительные. Нормы расчета. СКТБ «Стройдормаш». Москва, 1987. 62 с.
9. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: МІНБУД УКРАЇНИ, 2006. 75 с.
10. Slew/translation positioning and swing suppression for 4-DOF tower cranes with parametric uncertainties: design and hardware experimentation / N. Sun, Y. Fang, H. Chen, B. Lu and Y. Fu. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. № 63. P. 6407–6418.
11. Lawrence J. and Singhose W. Command shaping slewing motions for tower cranes. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2010. № 132. 011002.
12. Radial-motion assisted command shapers for nonlinear tower crane rotational slewing / D. Blackburn, J. Lawrence, J. Danielson, W. Singhose, T. Kamoi and A. Taura. *Control Engineering Practice*. 2010. № 18. P. 523–531.
13. Duong S. C., Uezato E., Kinjo H. and Yamamoto T. A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane. *Automation in Construction*. 2012. № 23. P. 55–63.
14. Omar H. M. and Nayfeh A. H. Gain scheduling feedback control for tower cranes. *Journal of Vibration and Control*. 2003. № 9. P. 399–418.
15. Böck M. and Kugi A. Real-time nonlinear model predictive path-following control of a laboratory tower crane. *IEEE Transactions of Control Systems Technology*. 2014. № 22. P. 1461–1473.
16. Al-mousa A. A., Nayfeh A. H. and Kachroo P. Control of rotary cranes using fuzzy logic. *Shock and Vibration*. 2003. № 10. P. 81–95.
17. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control / T. S. Wu, M. Karkoub, W. S. Yu, C. T. Chen, M. G. Her and K. W. Wu. *Fuzzy Sets and Systems*. 2016. № 290. P. 118–137.
18. Sadati N. and Hooshmand A. Design of a gain-scheduling anti-swing controller for tower cranes using fuzzy clustering techniques. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation*. Sydney, Australia, 2006. P. 172–177.
19. Watany M., Eltantawie M. A. and Abouel-seoud S. A. Application of an adaptive neuro fuzzy inference system for low speed planetary gearbox vibration control. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2015. № 34. P. 323–341.
20. Kurczyk S. and Pawel M. Fuzzy control for semi-active vehicle suspension. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2013. № 32. P. 217–225.

21. Liu C., Zhao H. and Cui Y. Research on application of fuzzy adaptive PID controller in bridge crane control system. *IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science*. Beijing, China, 2014. P. 1–4.

22. Al-mousa A. A. Control of rotary cranes using fuzzy logic and time-delayed position feedback control, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2000.

23. Omar H. M. and Nayfeh A. H. Anti-swing control of gantry and tower cranes using fuzzy and time delayed feedback with friction compensation. *Shock and Vibration*. 2005. № 12. P. 73–89.

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38 (068) 819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Держинський Ігор Віталійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-7188-2948. Тел.: +38 (095) 433-00-19.

E-mail: dzerzhynskiy@gmail.com.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.

E-mail: vstef@ukr.net.

Dzerzhynskiy Ihor, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID. iD: 0009-0009-7188-2948.

E-mail: dzerzhynskiy@gmail.com.

Статтю прийнято 11.11.2024 р.