

УДК 621.873.3

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-2\(43\)-1571-1584](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-2(43)-1571-1584)

Стефанов Володимир Олександрович кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту, <https://orcid.org/0000-0002-7947-2718>

Держинський Ігор Віталійович аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту, <https://orcid.org/0009-0009-7188-2948>

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ, СПРИЧИНЕНИХ ВІТРОВИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ НА БАШТОВИЙ КРАН

Анотація. У статті розглянуто проблему забезпечення безпеки експлуатації баштових кранів в умовах вітрових навантажень. Проаналізовано існуючі методи та системи захисту, виявлено їх недоліки, зокрема недостатню ефективність у випадку раптових та сильних поривів вітру. Запропоновано інтелектуальну систему, що базується на адаптивних нейронних мережах, для прогнозування вітрових навантажень та запобігання аварійним ситуаціям. Описано принцип роботи системи, її компоненти та алгоритми. Підкреслено важливість своєчасного реагування на зміни вітрових умов для забезпечення стійкості крана та безпеки персоналу. Результати дослідження можуть бути використані для розробки та впровадження сучасних систем керування баштовими кранами, що підвищить безпеку будівельних робіт.

Обґрунтовано, що ризик виникнення небезпечних вітрових навантажень існує не тільки в регіонах з сильними вітрами, але й у місцевостях з помірним кліматом. Пояснюється це тим, що вітер, як явище, характеризується наявністю енергетично потужних поривів, що можуть виникати спонтанно та нести значну загрозу для стійкості баштового крана.

Аналіз багаторічних спостережень свідчить не тільки про наявність проблеми небезпечних динамічних вітрових навантажень, а й про тенденцію до її посилення.

Зазначено, що проблема забезпечення стійкості баштових кранів у робочому стані під дією сильного вітру залишається актуальною, оскільки втрата динамічної стійкості може призвести до аварійних ситуацій та значних матеріальних збитків. Особливу небезпеку становлять раптові пориви вітру та

шквали, які здатні викликати критичне збільшення вітрового навантаження, що в кілька разів перевищує середнє значення. У таких випадках сила від короткочасного вітрового впливу додається до інших факторів, що сприяють перекиданню, створюючи загрозу для безпечної експлуатації крана. Тому критично важливо розробити ефективний метод забезпечення стійкості баштових кранів у разі динамічних вітрових збурень.

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

Stefanov Volodymyr Oleksandrovych Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport, <https://orcid.org/0000-0002-7947-2718>

Dzerzhinsky Ihor Vitaliyovych Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport, <https://orcid.org/0009-0009-7188-2948>

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO PREDICT AND PREVENT EMERGENCY SITUATIONS CAUSED BY WIND LOADS ON A TOWER CRANE

Abstract. The article considers the problem of ensuring the safety of operation of tower cranes under wind loads. Existing methods and protection systems are analyzed, their shortcomings are identified, in particular, insufficient efficiency in the case of sudden and strong wind gusts. An intelligent system based on adaptive neural networks is proposed to predict wind loads and prevent emergency situations. The principle of operation of the system, its components and algorithms are described. The importance of timely response to changes in wind conditions is emphasized to ensure the stability of the crane and the safety of personnel. The results of the study can be used to develop and implement modern tower crane control systems, which will increase the safety of construction work.

It is substantiated that the risk of dangerous wind loads exists not only in regions with strong winds, but also in areas with a temperate climate. This is explained by the fact that wind, as a phenomenon, is characterized by the presence of energetically powerful gusts that can arise spontaneously and pose a significant threat to the stability of the tower crane.

Analysis of many years of observations indicates not only the existence of the problem of dangerous dynamic wind loads, but also a tendency to its intensification.

It is noted that the problem of ensuring the stability of tower cranes in working condition under the influence of strong wind remains relevant, since the loss of

dynamic stability can lead to emergency situations and significant material damage. Of particular danger are sudden gusts of wind and squalls, which can cause a critical increase in wind load, which is several times higher than the average value. In such cases, the force from a short-term wind effect is added to other factors that contribute to tipping, creating a threat to the safe operation of the crane. Therefore, it is critically important to develop an effective method for ensuring the stability of tower cranes in the event of dynamic wind disturbances.

Keywords: tower crane, accidents, stability, external loads, safety system, forecasting, artificial intelligence, neural network.

Постановка проблеми. Баштові крани відіграють важливу роль у будівництві, оскільки забезпечують підйом і переміщення вантажів як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Їх широке застосування зумовлено простотою монтажу та відсутністю просторових обмежень для ефективної роботи. У зв'язку зі збільшенням обсягів інфраструктурного будівництва та кількості використовуваних баштових кранів, питання безпеки їх експлуатації набуває особливої актуальності.

Баштові крани, як висотні споруди, вразливі до різноманітних навантажень, серед яких значну частку становлять ненормовані навантаження, тобто ті, що не піддаються точному прогнозуванню та нормуванню. Безпека функціонування баштового крана безпосередньо залежить від його здатності протистояти цим ненормованим навантаженням, що можуть призвести до втрати стійкості та навіть падіння.

У даній роботі основна увага приділяється проблемі ненормованих вітрових навантажень, оскільки саме вітер є одним з найбільш значущих факторів, що впливають на стійкість баштових кранів. Вітрове навантаження характеризується своєю випадковістю та мінливістю, що робить його особливо небезпечним. Сильні пориви вітру, що виникають раптово та мають різну силу, здатні значно збільшити навантаження на конструкцію крана, створюючи критичні ситуації.

Важливо зазначити, що ризик виникнення небезпечних вітрових навантажень існує не тільки в регіонах з сильними вітрами, але й у місцевостях з помірним кліматом. Пояснюється це тим, що вітер, як явище, характеризується наявністю енергетично потужних поривів, що можуть виникати спонтанно та нести значну загрозу для стійкості баштового крана.

Аналіз багаторічних спостережень свідчить не тільки про наявність проблеми небезпечних динамічних вітрових навантажень, а й про тенденцію до її посилення[1].

Проблема забезпечення стійкості баштових кранів у робочому стані під дією сильного вітру залишається актуальною, оскільки втрата динамічної стійкості може призвести до аварійних ситуацій та значних матеріальних

збитків. Особливу небезпеку становлять раптові пориви вітру та шквали, які здатні викликати критичне збільшення вітрового навантаження, що в кілька разів перевищує середнє значення. У таких випадках сила від короточасного вітрового впливу додається до інших факторів, що сприяють перекиданню, створюючи загрозу для безпечної експлуатації крана. Тому критично важливо розробити ефективний метод забезпечення стійкості баштових кранів у разі динамічних вітрових збурень.

В Україні, на жаль, також трапляються аварії, пов'язані з падінням баштових кранів. Один із таких випадків стався 2014 року в Харкові (Рис.1), де внаслідок падіння будівельного крану одна людина загинула та п'ятеро отримали поранення. Цей трагічний інцидент стався через сильні пориви вітру, які призвели до падіння крану на продуктивні кіоски[2]. Такі випадки підкреслюють важливість розробки та впровадження ефективних систем безпеки для баштових кранів, які б враховували мінливість погодних умов та здатні були протистояти екстремальним вітровим навантаженням.



Рис. 1 Аварія баштового крану (м. Харків 17.05.14)

У зв'язку з цим, розробка та впровадження інтелектуальних систем, здатних прогнозувати та компенсувати вплив вітрових навантажень на баштові крани, є надзвичайно актуальним завданням. Такі системи повинні базуватися на комплексному аналізі метеорологічних даних, даних про стан крана та його оточення, а також враховувати особливості конструкції та умов експлуатації. Тільки таким чином можливо забезпечити безпечну та ефективну роботу баштових кранів, мінімізувавши ризик виникнення аварійних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент активно проводяться дослідження з управління системами баштових кранів, включаючи адаптивне керування [3], формування команд [4], нейронні мережі [5], керування плануванням посилення [6] та прогнозне керування моделлю [7]. Паралельно з цим, адаптивні нейронні мережі знаходять широке застосування

для контролю вібрації в різних системах. Управління на основі адаптивних нейронних мереж вирізняється високою адаптивністю та здатністю до самонавчання, що робить їх ефективними для вирішення складних завдань керування. Зазвичай існуючі методи керування складними системами розробляються на основі лінеаризованої моделі, і більшість з них потребують точного знання моделі [3]. На відміну від цього, адаптивне нейронне керування має перевагу, яка полягає в здатності мережі самостійно налаштовувати свої параметри на основі отриманих даних, що дозволяє обходитися без точної математичної моделі об'єкта керування. Запропоновано різноманітні варіанти контролерів на основі адаптивних нейронних мереж в системах баштових кранів[8-9].

Найбільш поширені засоби контролю стійкості, такі як обмежувачі вантажопідйомності та системи вітрового захисту, мають ряд недоліків, які роблять їх недостатньо ефективними для забезпечення безпечної експлуатації кранів.

Обмежувачі вантажопідйомності, хоча і здатні запобігти перевантаженню крана, не можуть повністю гарантувати його стійкість при сильному вітрі. Ці пристрої працюють в індикаторному режимі, тобто, вони лише попереджають оператора про наближення критичної ситуації, але не вживають активних заходів для запобігання перекиданню крана. У разі перевищення номінальної вантажопідйомності, обмежувач спрацьовує та знеструмлює вантажопідйомну машину, що може призвести до зупинки роботи та втрати часу. Проте, при критичній швидкості вітру, обмежувач лише сповіщає машиніста, не впливаючи на управління краном, що може бути недостатньо для запобігання аварії.

Системи вітрового захисту, які базуються на реєстрації швидкості вітру та утриманні крана протиугінними захватами, також мають свої обмеження. Вони активуються лише після того, як швидкість вітру досягне небезпечного значення, що може бути занадто пізно для запобігання аварійній ситуації. Крім того, ці системи не враховують поривчастий характер вітру та його зміну напрямку, що може призвести до неадекватної реакції системи та недостатнього захисту крана.

Головний недолік існуючих систем захисту полягає в тому, що вони активуються вже після того, як зафіксовано небезпечні параметри вітрового навантаження. Крім того, обмежувачі вантажопідйомності не мають функції контролю стійкості до перекидання. Вирішенням цієї проблеми є використання адаптивних нейронних мереж для управління вантажопідйомними механізмами.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даного дослідження є створення системи, яка гарантуватиме збереження стійкості баштових кранів від перекидання під дією неприпустимо сильних та тривалих поривів

вітру. Запропонована система має враховувати напрямок вітру, його змінний та випадковий характер, а також вплив шквалів на стійкість крана.

Новизна дослідження полягає у застосуванні адаптивної нейронної мережі для обробки даних про вітрове навантаження та прогнозування небезпечних ситуацій. Використання штучного інтелекту дозволить системі самонавчатися та адаптуватися до мінливих умов навколишнього середовища, що значно підвищить ефективність протидії небезпечним метеорологічним факторам.

Основним завданням дослідження є розробка системи безпеки, яка забезпечуватиме динамічну стійкість баштових кранів під час раптового посилення вітру, поривчастих вітрів та екстремальних шквалів. Це передбачає розробку алгоритмів прогнозування вітрових навантажень, вибір оптимальних способів їх компенсації та впровадження інтелектуальних методів управління для запобігання втраті стійкості баштових кранів.

Виклад основного матеріалу. Під час дії високих вітрових навантажень, переведення баштового крана в неробоче положення є критично важливим для забезпечення безпеки. Проте, процес переведення крана в неробочий стан часто займає значний час та включає велику кількість операцій, що може становити проблему в умовах швидко змінного вітрового навантаження. Зокрема, кранівник повинен виконати низку дій, таких як опускання та звільнення вантажу, підйом гакової підвіски, розворот стріли за вітром, встановлення вантажного візка на мінімальний виліт та інші операції, що потребують часу та уваги. У складних погодних умовах, коли швидкість вітру може змінюватися дуже швидко, затримка з переведенням крана в неробочий стан може призвести до критичних ситуацій та навіть аварій. Тому, оптимізація процесу переведення крана в неробочий стан та зменшення кількості необхідних операцій є важливим завданням для забезпечення безпеки праці на будівельному майданчику.

Порядок дій кранівника під час граничних вітрових навантажень чітко регламентований інструкцією з експлуатації та поділяється на два етапи. Перший етап передбачає негайне припинення роботи та виконання першочергових дій для зменшення впливу вітру на кран. Другий етап включає підготовку крана до тривалої стоянки та забезпечення його безпеки під час шторму або при наближенні грози, зливи, снігопаду, ожеледі або туману. Важливо зазначити, що кранівник повинен суворо дотримуватися інструкції та виконувати всі необхідні дії своєчасно та чітко.

Суттєвим недоліком цього порядку дій на першому етапі є те, що при різкому посиленні вітру кранівник залишається в кабіні, що ставить його під потенційну загрозу у разі екстремальних поривів вітру. В умовах сильної бурі чи шквалу, коли вітрове навантаження може досягати критичних значень, кранівник може опинитися в зоні прямої небезпеки, адже кабіна не забезпечує

достатнього захисту від можливих механічних пошкоджень або випадкового перекидання крана.

Наступним недоліком є відсутність чітких розпоряджень щодо дій у разі відсутності інформації про посилення вітру, що ускладнює реагування на непередбачувані зміни погодних умов. Відсутність точних вимог у таких ситуаціях робить систему менш ефективною в умовах непередбачуваних загроз. Інший важливий недолік полягає в тому, що при евакуації кранівника пориви вітру різної інтенсивності і повторюваності можуть становити серйозну загрозу для його безпеки. Це може ускладнити процес евакуації та підвищити ризик травмування, особливо при сильних поривах вітру. Зазначені проблеми вказують на невідповідність поточних вимог нормам промислової безпеки, тому необхідно розробити систему, яка забезпечить надійний захист не тільки кранівника, але й інших працівників будівельного майданчика під час раптового або тривалого посилення вітру, мінімізуючи ризики для їхнього життя та здоров'я.

Ключове завдання роботи - це розробка інтелектуальної системи, що інтегрується з системою керування баштового крана для своєчасного виявлення та попередження небезпечних вітрових навантажень. Для досягнення цієї мети найбільш підходящими є адаптивні нейронні мережі.

Адаптивні нейронні мережі є класом нейронних мереж, які здатні змінювати свої параметри (ваги зв'язків) в процесі навчання, підлаштовуючись під змінні умови[10]. Історія розвитку адаптивних нейронних мереж починається з робіт зі створення перцептронів наприкінці 1950-х років. Однак, справжній прорив у галузі адаптивних нейронних мереж стався у 1980-х роках, коли були розроблені алгоритми зворотного поширення помилки, що дозволило навчати багат шарові нейронні мережі. Сьогодні адаптивні нейронні мережі є потужним інструментом, який використовується в багатьох сферах, від розпізнавання образів[11] та обробки сигналів[12] до керування складними системами та прогнозування[13]. Завдяки своїй здатності до самонавчання та адаптації, вони знаходять застосування у робототехніці, медицині, фінансовій сфері та багатьох інших галузях, де потрібно обробляти великі обсяги даних та приймати рішення в умовах невизначеності.

Для збереження стійкості баштових кранів від перекидання при різкій зміні швидкості вітру пропонується спосіб стабілізації їх положення. В основі цього способу лежить алгоритм прогнозування небезпечного наростання вітрового потоку та його напрямку, який реалізується на адаптивній нейронній мережі. Ідея полягає в зборі поточної інформації про швидкості та напрямки повітряного потоку, що отримується за допомогою сучасних датчиків, таких як метеостанція MaxMet GMX600 (Рис.2), її обробці та прогнозуванні швидкості та напрямку вітру на наступний момент часу.



Рис. 2 Метеостанція MaxiMet GMX600 (Сенсор швидкості та напрямку вітру, температури, вологості)

У разі прогнозу неприпустимо високої швидкості пориву, це дозволить завчасно автоматично забезпечити поворот стріли або башти та стріли (в залежності від конструкції баштового крана) за вітром до виникнення критичного моменту від вітрового навантаження та заздалегідь вжити заходів з евакуації машиніста. Модель, що реалізує запропонований спосіб, містить блокування, що виключає можливе зіткнення гакової підвіски з споруджуваним об'єктом при екстремому повороті стріли.

Загальний принцип прогнозування можна зобразити графічно (Рис.3) та розглянути на прикладі прогнозу швидкості вітрового пориву. На входні канали нейромережі поступають дані про швидкість вітру, зафіксовані у попередні моменти часу:

$$V(t-1), V(t-2), \dots, V(t-k). \quad (1)$$

Після обробки цих даних, на вихідному каналі з'являється інформація про швидкість вітру в найближчий момент часу $V(t+1)$. Для оцінки якості навчання нейромережі використовується поняття помилки прогнозування. Помилка визначається як різниця між фактичним (реальним) значенням швидкості вітру та значенням, яке спрогнозувала нейромережа:

$$e(t) = V(t) - V(t+1). \quad (2)$$

Чим менша помилка прогнозування, тим краще нейромережа навчилася. За умови достатнього навчання, нейромережа досягає мінімальної помилки прогнозування. Аналогічний підхід застосовується й для прогнозування напрямку вітру.

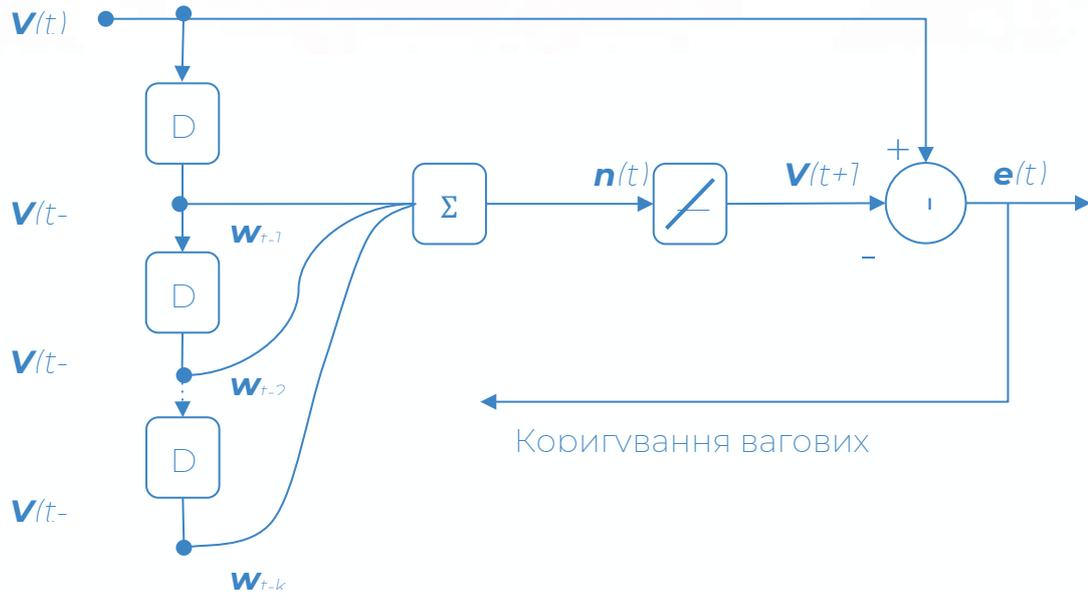


Рис. 3 Структурна схема нейромережі прогнозування

де $V(t)$ – бажане значення швидкості вітру;

$V(t-1), \dots, V(t-k)$ – значення швидкостей вітру в попередні моменти часу;

$V(t+1)$ – прогнозоване значення швидкості вітру;

$w_{t-1}, w_{t-2}, \dots, w_{t-k}$ – вагові коефіцієнти;

D – лінія затримки;

$n(t)$ – результат виваженого підсумовування вхідних даних;

$e(t)$ – помилка прогнозування.

Детальна схема роботи системи керування приводом повороту крана при вітрових навантаженнях відображена на структурній схемі (Рис.4), яка ілюструє взаємодію між різними компонентами системи.

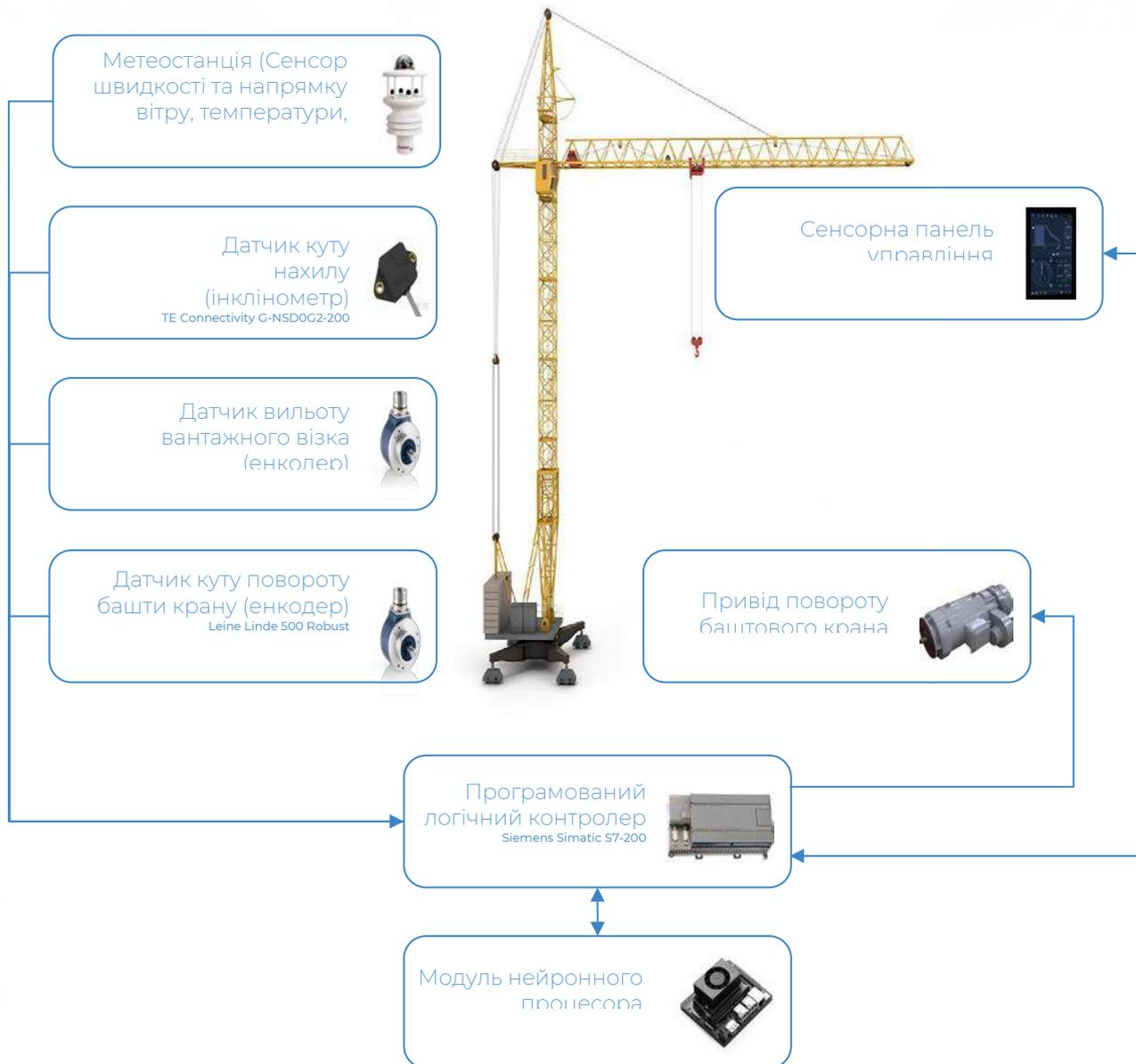


Рис. 4 Структурна схема системи керування

Система прогнозування на основі нейронної мережі інтегрується з існуючою системою керування краном шляхом встановлення на програмований логічний контролер (ПЛК) модуля нейронного процесора (NPU), наприклад, NVIDIA Jetson Orin Nano Super. Цей модуль забезпечує високу продуктивність завдяки своїй здатності виконувати до 67 трильйонів операцій за секунду [14], що дозволяє обробляти великі обсяги даних та швидко приймати рішення.

Для роботи системи прогнозування використовуються дані з метеостанції, яка включає в себе датчики напрямку та швидкості вітру, а також датчики температури та вологості.

Окрім метеостанції, система також використовує дані з обмежувача навантаження крана, який включає в себе інклінометр, датчик положення стріли, датчик висоти підйому гака та датчик вильоту вантажного візка.

У разі відсутності на крані систем обмежувача навантаження крана та/або метеостанції, то для роботи системи прогнозування, кран необхідно буде обладнати всіма вищезгаданими датчиками.

Отримана з датчиків інформація, передається до програмованого логічного контролера, де відбувається її первинна обробка та фільтрація з метою усунення шумів та випадкових спотворень. Цей етап є критично важливим для забезпечення точності та надійності подальшого аналізу даних.

Наступним етапом є застосування алгоритмів прогнозування, що базуються на нейронних мережах. Контролер, використовуючи історичні дані про вітрові режими місцевості, а також поточні значення метеорологічних параметрів, будує короткостроковий прогноз швидкості та напрямку вітру на найближчі часові інтервали. Для цього використовується модуль нейронного процесора, який забезпечує високу обчислювальну потужність, необхідну для швидкої та ефективної роботи нейронної мережі. Важливим аспектом даного алгоритму є здатність адаптуватися до локальних умов та враховувати особливості мікроклімату будівельного майданчика. Нейронна мережа, завдяки своїй здатності до навчання та адаптації, здатна виявляти складні закономірності у даних та прогнозувати зміни вітрових параметрів з високою точністю.

Прогностична модель, дозволяє ідентифікувати потенційно небезпечні ситуації, пов'язані з перевищенням критичних значень швидкості вітру або різкою зміною його напрямку. У разі виявлення критичної загрози, система автоматично генерує керуючий сигнал, спрямований на зміну кута стріли крана. При цьому, алгоритм враховує інерційність механізмів крана та оптимізує траєкторію повороту стріли для мінімізації динамічних навантажень на конструкцію.

Система безпеки також запобігає зіткненню гакової підвіски з об'єктом будівництва під час екстреного повороту стріли. Вона постійно слідкує за кількома ключовими параметрами: висотою, на якій висить вантаж, висотою вже збудованого поверху (об'єкта) та вильотом візка з вантажем. Якщо виявляється, що вантаж висить нижче рівня будівлі (об'єкта), система безпеки спочатку зменшить виліт крюка, щоб при повороті, стріла точно нічого не зачепила, і тільки потім поверне її.

Окрім автоматичного керування, система також передбачає можливість інформування оператора крана про наближення небезпечних вітрових умов. Попередження може бути візуальним (індикація на дисплеї) або звуковим. Оператор, отримавши попередження, може вжити додаткових заходів безпеки, таких як опускання вантажу на землю та підготовка крана до штормового режиму.

Висновки. Проблема забезпечення стійкості баштових кранів в умовах складних зовнішніх впливів є критично важливою для сучасного будівництва. Традиційні методи оцінки навантажень та розрахунку міцності часто не враховують динамічний характер вітрових та інших зовнішніх навантажень, нелінійні деформації металоконструкцій та інші фактори, що впливають на стійкість кранів.

Проведене дослідження виявило тісний взаємозв'язок між організаційними, технічними та зовнішніми факторами, що значно ускладнює забезпечення безпечної експлуатації баштових кранів. Для адекватної оцінки ризиків необхідно враховувати не тільки статичні навантаження, але й динамічні процеси, що виникають під час роботи крана. Зокрема, вітрове навантаження є одним з основних факторів, що впливають на стійкість крана має пульсуючий характер та залежить від багатьох параметрів, таких як швидкість вітру, його напрямок, форма і розміри конструкції крана.

Для вирішення цієї проблеми було розроблено інноваційну систему забезпечення стійкості баштових кранів, яка базується на методах штучного інтелекту, зокрема на адаптивних нейронних мережах. Система здійснює постійний моніторинг параметрів роботи крана та навколишнього середовища, прогнозує можливі ризики та видає рекомендації щодо коригування режимів роботи. Використання методів машинного навчання дозволяє системі адаптуватися до змінних умов експлуатації та підвищувати точність прогнозування.

Розроблена система враховує особливості динаміки вітрових навантажень, здатна прогнозувати небезпечні ситуації та своєчасно вживати заходів для запобігання втраті стійкості крана. Застосування адаптивних нейронних мереж забезпечує можливість навчання системи на основі даних, що постійно надходять, що дозволяє їй адаптуватися до конкретних умов експлуатації та підвищувати ефективність роботи.

Перспективами подальшого розвитку теми є моделювання навантажень та розробка автоматизованої системи контролю безпечної роботи кранів за умов комплексного впливу факторів зовнішнього середовища. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціональності системи, зокрема на врахування впливу інших зовнішніх факторів.

Література:

1. Pryor S. C., Barthelmie R. J. A global assessment of extreme wind speeds for wind energy applications // Nature Energy. 2021. Vol. 6. P. 268–276. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00773-7>.
2. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Надзвичайні події [Електронний ресурс]. URL: <https://dsns.gov.ua/news/nadzvicaini-podiyi/20926> (дата звернення: 04.09.2024).
3. Sun N., Fang Y., Chen H., Lu B., Fu Y. Slew/translation positioning and swing suppression for 4-DOF tower cranes with parametric uncertainties: design and hardware experimentation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. P. 6407–6418.

4. Lawrence J., Singhose W. Command shaping slewing motions for tower cranes // *Journal of Vibration and Acoustics*. 2010. Vol. 132. Article 011002.
5. Duong S. C., Uezato E., Kinjo H., Yamamoto T. A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 23. P. 55–63.
6. Omar H. M., Nayfeh A. H. Gain scheduling feedback control for tower cranes // *Journal of Vibration and Control*. 2003. Vol. 9. P. 399–418.
7. Böck M., Kugi A. Real-time nonlinear model predictive path-following control of a laboratory tower crane // *IEEE Transactions of Control Systems Technology*. 2014. Vol. 22. P. 1461–1473.
8. Zhang M., Jing X. Adaptive Neural Network Control for Double-Pendulum Tower Crane Systems // 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-7670-6_8.
9. Wang K., Ma X., Li J. Neural Network-Based Adaptive Swing Suppression Control for Tower Cranes With Obstacle Avoidance // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1109/TMECH.2024.3435794.
10. Widrow B., Lehr M. A. Perceptrons, Adalines, and backpropagation // *Arbib*. 1995. Vol. 4. P. 719–724.
11. Zhu Q., Du B., Yan P. Boundary-weighted domain adaptive neural network for prostate MR image segmentation // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2019. Vol. 39, No. 3. P. 753–763.
12. Ebhota V. C., Isabona J., Srivastava V. M. Investigating signal power loss prediction in a metropolitan island using ADALINE and multi-layer perceptron back propagation networks // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13, No. 18. P. 13409–13420.
13. Sutawinaya I. P., Astawa I. N. G. A., Hariyanti N. K. D. Comparison of Adaline and multiple linear regression methods for rainfall forecasting // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 953, No. 1. Article 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/953/1/012046.
14. Valladares S., et al. Performance evaluation of the Nvidia Jetson Nano through a real-time machine learning application // *Intelligent Human Systems Integration 2021: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2021): Integrating People and Intelligent Systems, February 22–24, 2021, Palermo, Italy*. Springer International Publishing, 2021.

References:

1. Pryor, S. C., Barthelmie, R. J. (2021). A global assessment of extreme wind speeds for wind energy applications. *Nature Energy*, 6, 268–276. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00773-7>. [in English].
2. Derzhavna sluzhba Ukraïni z nadzvichajnih situacij [State Emergency Service of Ukraine]. *dsns.gov.ua* Retrieved from <https://dsns.gov.ua/news/nadzvicaini-podiyi/20926> [in Ukrainian].
3. Sun, N., Fang, Y., Chen, H., Lu, B., Fu, Y. (2016). Slew/translation positioning and swing suppression for 4-DOF tower cranes with parametric uncertainties: design and hardware experimentation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63, 6407–6418 [in English].
4. Lawrence, J., Singhose, W. (2010). Command shaping slewing motions for tower cranes. *Journal of Vibration and Acoustics*, 132, 011002. [in English].
5. Duong S. C., Uezato E., Kinjo H., Yamamoto T. A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 23. P. 55–63 [in English].
6. Omar H. M., Nayfeh A. H. Gain scheduling feedback control for tower cranes // *Journal of Vibration and Control*. 2003. Vol. 9. P. 399–418 [in English].

7. Böck M., Kugi A. Real-time nonlinear model predictive path-following control of a laboratory tower crane // *IEEE Transactions of Control Systems Technology*. 2014. Vol. 22. P. 1461–1473 [in English].
8. Zhang M., Jing X. Adaptive Neural Network Control for Double-Pendulum Tower Crane Systems // 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-7670-6_8. [in English].
9. Wang K., Ma X., Li J. Neural Network-Based Adaptive Swing Suppression Control for Tower Cranes With Obstacle Avoidance // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1109/TMECH.2024.3435794. [in English].
10. Widrow B., Lehr M. A. Perceptrons, Adalines, and backpropagation // *Arbib*. 1995. Vol. 4. P. 719–724 [in English].
11. Zhu Q., Du B., Yan P. Boundary-weighted domain adaptive neural network for prostate MR image segmentation // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2019. Vol. 39, No. 3. P. 753–763 [in English].
12. Ebhota V. C., Isabona J., Srivastava V. M. Investigating signal power loss prediction in a metropolitan island using ADALINE and multi-layer perceptron back propagation networks // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13, No. 18. P. 13409–13420 [in English].
13. Sutawinaya I. P., Astawa I. N. G. A., Hariyanti N. K. D. Comparison of Adaline and multiple linear regression methods for rainfall forecasting // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 953, No. 1. Article 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/953/1/012046. [in English].
14. Valladares S., et al. Performance evaluation of the Nvidia Jetson Nano through a real-time machine learning application // *Intelligent Human Systems Integration 2021: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2021): Integrating People and Intelligent Systems, February 22–24, 2021, Palermo, Italy*. Springer International Publishing, 2021. [in English].