

FORECASTING AND PREVENTING TOWER CRANE FAILURES USING AI TECHNOLOGIES UNDER WIND LOAD CONDITIONS

V. Stefanov*, I. Dzerzhinsky

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES

AM
CM

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:

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

Article history:

Received 10.07.2025

Accepted 28.08.2025

***Corresponding author:**

stefanov.v@kart.edu.ua

ABSTRACT

The article discusses the application of artificial intelligence technologies for forecasting and preventing tower crane failures caused by wind loads. It analyzes data processing methods from sensors measuring wind loads and their integration with crane control systems for real-time monitoring and prediction of hazardous situations. Special attention is given to the use of machine learning algorithms to process large volumes of data and identify critical parameters that could lead to an accident. The implementation of such systems allows for the timely detection of potential threats, automatic adjustment of crane operating parameters, and the adoption of necessary measures to prevent accidents. The study results confirm that the integration of AI technologies into the operation of tower cranes can significantly improve their safety and efficiency.

The issue of tower crane safety under wind loads is also examined. The shortcomings of existing protection methods are analyzed, particularly their inadequate effectiveness during strong wind gusts. An intelligent system based on adaptive neural networks is proposed for forecasting wind loads and preventing accidents. The system's operating principles and algorithms are described. The importance of timely response to changes in wind conditions to ensure the safety of the crane and personnel is emphasized. The results of the study can be used to develop modern crane control systems, improving work safety. It is noted that the risk of dangerous wind loads exists not only in areas with strong winds but also in regions with moderate climates.

Analysis of long-term observations indicates not only the existence of the problem of dangerous dynamic wind loads but also a trend towards its intensification. The problem of ensuring the stability of tower cranes under strong winds remains relevant, as the loss of dynamic stability can lead to accidents and material damage. Especially dangerous are sudden wind gusts and squalls, which can significantly increase wind loads. These short-term wind impacts, along with other factors, may cause crane overturning, creating a threat to operational safety. Therefore, it is important to develop an effective method for ensuring crane stability during dynamic wind disturbances.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1841**To cite this article:**

tefanov, V., & Dzerzhinsky, I. (2025). Forecasting and preventing tower crane failures using AI technologies under wind load conditions. *Agricultural Machines*, 51, 159-168. <https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1841>

УДК 621.873.3

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЙ БАШТОВОГО КРАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ШІ-ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

В. О. Стефанов*, І. В. Держинський

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

AGRICULTURAL MACHINES

A M
C M

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:

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

Історія публікації:

Отримано 10.07.2025

Затверджено 28.08.2025

***Автор для листування:**

stefanov.v@kart.edu.ua

АНОТАЦІЯ

В статті розглядається застосування технологій штучного інтелекту для прогнозування та запобігання аваріям баштових кранів, спричиненим вітровими навантаженнями. Аналізуються методи обробки даних з сенсорів, що вимірюють вітрові навантаження, та їх інтеграція з системами управління краном для реального часу моніторингу та прогнозування небезпечних ситуацій. Особливу увагу приділено використанню алгоритмів машинного навчання для обробки великих обсягів даних та визначення критичних параметрів, які можуть призвести до аварії. Впровадження таких систем дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози, автоматично коригувати робочі параметри крана та приймати необхідні заходи для запобігання аваріям. Результати дослідження підтверджують, що інтеграція ШІ-технологій у роботу баштових кранів може значно підвищити їхню безпеку та ефективність.

Розглянуто проблему безпеки експлуатації баштових кранів за вітрових навантажень. Проаналізовано недоліки існуючих методів захисту, зокрема їхню недостатню ефективність під час сильних поривів вітру. Запропоновано інтелектуальну систему на базі адаптивних нейронних мереж для прогнозування вітрових навантажень і запобігання аваріям. Описано принцип роботи системи та її алгоритми. Підкреслено важливість своєчасного реагування на зміни вітрових умов для забезпечення безпеки крана та персоналу. Результати дослідження можуть бути використані для розробки сучасних систем керування баштовими кранами, що підвищать безпеку робіт. Зазначено, що ризик небезпечних вітрових навантажень існує не лише в регіонах з сильними вітрами, а й у місцевостях з помірним кліматом. Аналіз багаторічних спостережень свідчить не тільки про наявність проблеми небезпечних динамічних вітрових навантажень, а й про тенденцію до її посилення.

Проблема забезпечення стійкості баштових кранів під сильним вітром залишається актуальною, оскільки втрата динамічної стійкості може призвести до аварій та матеріальних збитків. Особливо небезпечні раптові пориви вітру та шквали, що можуть значно збільшити вітрове навантаження. Ці короткочасні вітрові впливи, разом з іншими факторами, можуть спричинити перекидання крана, створюючи загрозу безпеці експлуатації. Тому важливо розробити ефективний метод забезпечення стійкості кранів при динамічних вітрових збуреннях.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1841

Цитувати цю статтю:

Стефанов, В. О., Держинський, І. В. (2025). Прогнозування та запобігання аварій баштового крану за допомогою ШІ-технологій при вітрових навантаженнях. *Сільськогосподарські машини*, 51, 159-168. <https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1841>

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 ненормованих навантажень, зокрема вітрових, що не піддаються точному прогнозуванню. Безпека їх функціонування залежить від здатності витримувати ці навантаження, які можуть призвести до втрати стійкості або падіння. Вітрове навантаження є особливо небезпечним через свою випадковість та мінливість. Раптові сильні пориви вітру можуть значно збільшити навантаження на кран, створюючи критичні ситуації. Ризик небезпечних вітрових навантажень існує не тільки в районах з сильними вітрами, а й у місцевостях з помірним кліматом через спонтанні потужні пориви вітру, які загрожують стійкості крана. Аналіз багаторічних спостережень свідчить не тільки про наявність проблеми небезпечних динамічних вітрових навантажень, а й про тенденцію до її посилення (Pryor & Barthelmie, 2021).

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 продуктові кіоски (State Emergency Service of Ukraine, 2024). 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.

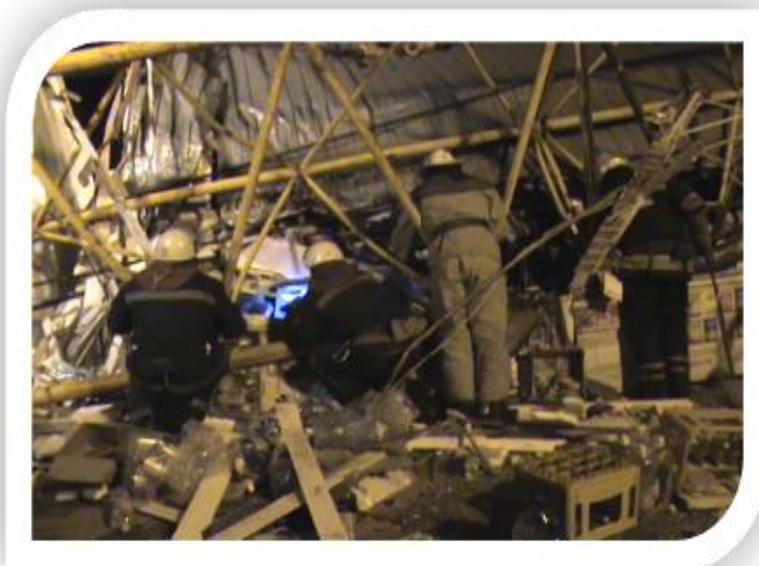


Рис. 1 – Аварія баштового крану (м. Харків 17.05.14)

В 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, формування команд, нейронні мережі, керування плануванням посилення та прогнозне керування моделлю. 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. 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 (*Pryor & Barthelmie, 2021; State Emergency Service of Ukraine, 2024; Sun et al., 2016; Lawrence & Singhose, 2010; Duong et al., 2012; Omar & Nayfeh, 2003; Böck & Kugi, 2014; Zhang & Jing, 2020; Wang et al., 2024; Widrow & Lehr, 1995; Zhu et al., 2019; Ebhota et al., 2018; Sutawinaya et al., 2018; Valladares et al., 2021*).

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

Розробки системи прогнозування та запобігання аваріям баштових кранів, спричиненим вітровими навантаженнями, є надзвичайно високою. Вітрові навантаження можуть значно впливати на стійкість кранів, що може призводити до аварій та матеріальних збитків. Раніше дослідження показали, що необхідно вдосконалити способи сповіщення кранівника про небезпечні умови, пов'язані з вітровими навантаженнями. Розробка інтелектуальної системи на базі адаптивних нейронних мереж, яка прогнозує вітрові навантаження та автоматично коригує роботу крана, може значно підвищити безпеку та ефективність його експлуатації.

Метою даного дослідження є розробка та впровадження системи штучного інтелекту для прогнозування та запобігання аварійним ситуаціям, спричиненим вітровими навантаженнями на баштовий кран, з метою підвищення безпеки експлуатації та зниження ризиків пошкодження обладнання і загроз для життя персоналу. 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.

ОСНОВНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ.

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 (*Widrow & Lehr, 1995*). 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 багатосарові нейронні мережі. Сьогодні адаптивні нейронні мережі є потужним інструментом, який використовується в багатьох сферах, від розпізнавання образів (*Zhu et al., 2019*) та обробки сигналів (*Ebhota et al., 2018*) до керування складними системами та прогнозування (*Sutawinaya et al., 2018*). 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 MaxMet 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 вхідні 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.

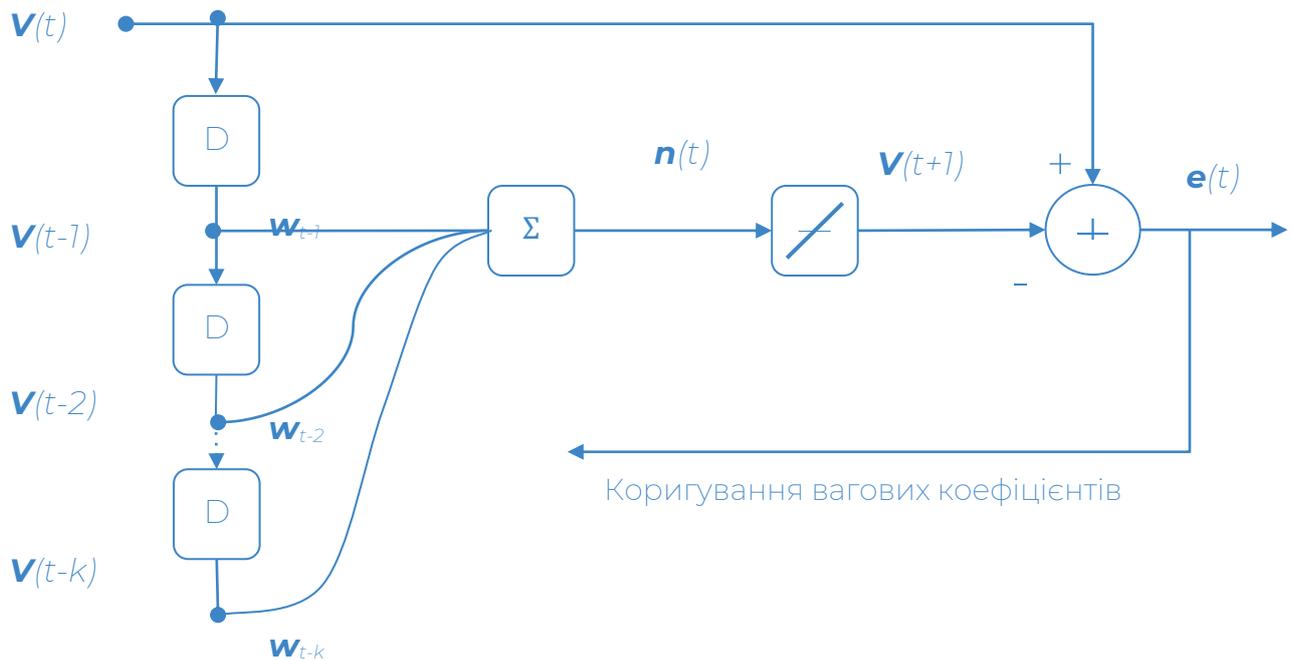


Рис. 3 – Структурна схема нейромережі прогнозування

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.

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 (Valladares et al., 2021), 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. В 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.

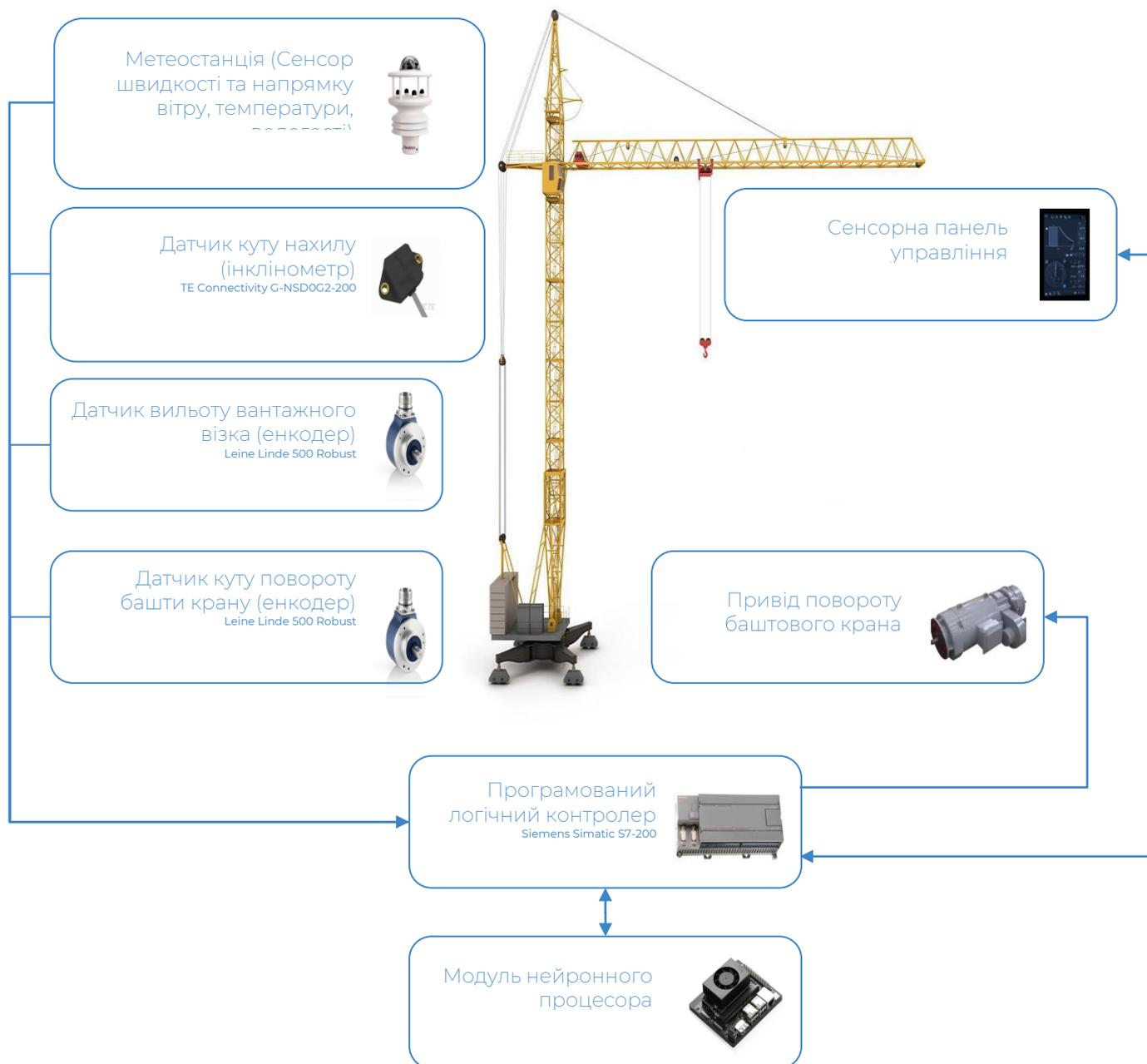


Рис. 3 – Структурна схема системи керування

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, буде 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.

Таким чином, наступний етап передбачає застосування алгоритмів прогнозування на основі нейронних мереж, які будують короткостроковий прогноз швидкості та напрямку вітру, використовуючи історичні дані та поточні метеорологічні параметри. Модуль нейронного процесора забезпечує високу

обчислювальну потужність для ефективної роботи мережі. Алгоритм адаптується до локальних умов і прогнозує зміни вітрових параметрів з високою точністю. Прогностична модель ідентифікує небезпечні ситуації, автоматично генерує керуючі сигнали для зміни кута стріли та оптимізує траєкторію повороту для мінімізації навантажень. Система також попереджає оператора про небезпечні вітрові умови через візуальні або звукові сигнали, даючи змогу вжити заходів безпеки.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження було виявлено, що баштові крани є вразливими до ненормованих вітрових навантажень, які можуть суттєво вплинути на їхню стійкість та безпеку експлуатації. Вітрові пориви, що виникають раптово, здатні значно збільшити навантаження на конструкцію крана, що підвищує ризик аварійних ситуацій. Оскільки такі навантаження можуть виникати навіть у районах з помірним кліматом, необхідно розробляти ефективні методи прогнозування та управління цими ризиками. Впровадження інтелектуальних систем для моніторингу вітрових навантажень та автоматичного коригування роботи крана може значно підвищити безпеку та ефективність його експлуатації.

Проблема забезпечення стійкості баштових кранів під впливом зовнішніх навантажень є важливою для будівництва. Традиційні методи не враховують динамічні вітрові навантаження та нелінійні деформації конструкцій, що ускладнює оцінку стійкості. Дослідження показало, що для точної оцінки ризиків необхідно враховувати динамічні процеси, зокрема вітрові навантаження, що змінюються залежно від швидкості вітру, напрямку та інших факторів. Для вирішення цієї проблеми розроблено систему на базі штучного інтелекту, яка моніторить параметри роботи крана та навколишнього середовища, прогнозує ризики і дає рекомендації щодо коригування роботи. Методи машинного навчання дозволяють адаптувати систему до змінних умов і підвищити точність прогнозування.

Розроблена система прогнозує небезпечні ситуації, враховує динаміку вітрових навантажень і своєчасно вживає заходів для запобігання втраті стійкості крана. Завдяки адаптивним нейронним мережам система навчається на основі постійно надходящих даних, що дозволяє їй адаптуватися до умов експлуатації та підвищувати ефективність роботи. Подальші дослідження зосереджені на моделюванні навантажень та розробці автоматизованої системи контролю безпечної роботи кранів, зокрема враховуючи інші зовнішні фактори.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

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.