Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Дзержинський Ігор Віталійович

УДК 621.873.1

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БАШТОВОГО КРАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У КЕРУЮЧИХ СИСТЕМАХ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Дзержинський І. В.

Науковий керівник:
Стефанов Володимир Олександрович,
кандидат технічних наук, доцент

Харків 2025

АНОТАЦІЯ

Дзержинський І.В. Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення безпеки експлуатації баштових кранів шляхом розробки та обґрунтування комплексної інтелектуальної системи безпеки на основі технологій штучного інтелекту. Запропонована система спрямована на проактивне запобігання аварійним ситуаціям, зумовленим основними факторами ризику: людським фактором, конструктивними дефектами та впливом зовнішніх чинників, зокрема вітрових навантажень. Це дозволить суттєво знизити аварійність, мінімізувати матеріальні збитки та, найголовніше, зберегти життя та здоров'я людей на будівельних майданчиках.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні актуальної науково-технічної задачі підвищення експлуатаційної безпеки та надійності баштових кранів шляхом створення та інтеграції інтелектуальних підсистем предиктивного обслуговування, розпізнавання сонливості та втрати уваги оператора в режимі реального часу, прогнозування вітрових навантажень з урахуванням локальних метеорологічних умов та динамічних характеристик крана. Вперше отримані закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану механізму повороту баштового крану, які дозволили розробити підсистему предиктивного обслуговування з використанням технології глибокого навчання нейронної мережі

Удосконалено математичну модель підсистеми моніторингу психофізіологічного стану оператора баштового крану на основі методів машинного зору для розпізнавання втоми та сонливості в режимі реального часу та математичну модель прогнозування небезпечних вітрових навантажень

на основі глибокого навчання нейронної мережі, яка дозволяє розробити алгоритми роботи підсистеми автоматичного превентивного керування стійкістю крану.

Набув подальшого розвитку метод підвищення безпеки експлуатації баштових кранів в частині удосконалення системи керування, яка враховує закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану, психофізіологічного стану оператора крану та прогнозування небезпечних вітрових навантажень та використовує технології штучного інтелекту.

Практичні результати роботи полягають у розробці конкретних програмно-апаратних модулів для кожної з трьох інтелектуальних підсистем (моніторингу оператора, прогнозування вітрових навантажень, предиктивного обслуговування), придатних для імплементації на доступних обчислювальних платформах (Raspberry Pi, NVIDIA Jetson). Розроблено та експериментально підтверджено ефективність алгоритмів, що дозволяють проактивно запобігати аваріям, пов'язаним із втомою оператора, автоматично захищати кран від небезпечних вітрових навантажень та переходити до економічно ефективного предиктивного обслуговування. Проведене техніко-економічне обґрунтування довело, що при капітальних вкладеннях у 500 тис. грн, щорічний економічний ефект від впровадження системи на одному крані становить 1,122 млн. грн.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету та задачі, визначено об’єкт, предмет та гіпотезу, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі проведено аналіз причин аварійності кранів, що включають конструктивні дефекти, людський фактор та зовнішні впливи , який показав обмеженість існуючих реактивних систем безпеки. Виявлено науково-технічний розрив: інтелектуальні підходи для діагностики, моніторингу втоми та прогнозування вітру розвиваються ізольовано і не об'єднані в єдину систему.

У другому розділі розроблено підсистему предиктивного обслуговування механізму повороту. На основі аналізу фізичних моделей зношування обґрунтовано вибір вібрації та температури як ключових діагностичних індикаторів. Вперше отримано закономірності зміни цих параметрів, що пов'язують їх рівні з різними стадіями зносу , що стало основою для створення моделі діагностики на базі нейронної мережі та розробки програмно-апаратного модуля для предиктивного обслуговування.

У третьому розділі розроблено інтелектуальну систему прогнозування небезпечних вітрових навантажень. Проаналізовано недоліки існуючих регламентів, які створюють загрозу для оператора при непередбачуваних змінах погоди. Створена система на основі нейронної мережі прогнозує швидкість та напрямок вітру з похибкою 16.27% і здатна автоматично повертати стрілу для мінімізації аеродинамічного опору, що підвищує безпеку.

У четвертому розділі проаналізовано людський фактор як домінантну причину аварій та класифіковано помилки операторів на перцептивні, когнітивні та виконавчі. Для протидії ризикам втоми та стресу розроблено систему розпізнавання сонливості на основі машинного зору. Система, реалізована на Raspberry Pi , використовує згорткову нейронну мережу для ідентифікації втоми з точністю 96% та може інтегруватися з ПЛК крана для автоматичної зупинки.

У п'ятому розділі обґрунтовано стратегію інтеграції розроблених модулів в єдину інтелектуальну систему безпеки (ІІСБ) для переходу до проактивного управління ризиками. Розроблено вимоги до модульної архітектури системи та протоколи взаємодії для ключових користувачів. Проведено техніко-економічне обґрунтування.

Ключові слова: будівельні машини, баштовий кран, транспортна механіка, вантажозахоплювальний пристрій, система приводу, система змащування, механізм повороту, підшипник ковзання, експлуатація, напрацювання, надійність, відмова, ресурс, безпека, стійкість, технічне обслуговування,

технічний стан, вбудований засіб контролю, керуючі системи, мікропроцесорна система, штучний інтелект, Індустрія 4.0

ABSTRACT

Dzerzhynskyi I.V. Enhancing the Operational Safety of Tower Cranes Using Artificial Intelligence in Control Systems. – Qualifying scientific work in manuscript rights.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 133 – Sectoral Mechanical Engineering. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is dedicated to solving the urgent scientific and practical problem of enhancing the operational safety of tower cranes through the development and justification of a comprehensive intelligent safety system based on artificial intelligence technologies. The proposed system aims at the proactive prevention of emergency situations caused by major risk factors: the human factor, structural defects, and the influence of external factors, particularly wind loads. This will allow for a significant reduction in accident rates, minimization of material losses, and, most importantly, the preservation of the life and health of people on construction sites.

Scientific novelty of the dissertation lies in addressing a pressing scientific and technical challenge enhancing the operational safety and reliability of tower cranes by developing and integrating intelligent subsystems for predictive maintenance, real-time detection of operator fatigue and loss of attention, and wind load forecasting that considers local meteorological conditions and the dynamic characteristics of the crane.

For the first time, patterns of changes in diagnostic parameters of the slewing mechanism's technical condition have been identified, enabling the development of a predictive maintenance subsystem based on deep learning neural network technology.

The mathematical model of the operator's psychophysiological state monitoring subsystem has been improved using computer vision methods for real-time recognition of fatigue and drowsiness. Additionally, the mathematical model for forecasting hazardous wind loads has been refined using deep learning neural networks, making it possible to develop algorithms for the automatic preventive stability control subsystem of the crane.

The method for improving tower crane operational safety has been further advanced through enhancements to the control system, which now accounts for the patterns of changes in diagnostic parameters, operator psychophysiological state, and wind load forecasts, and employs artificial intelligence technologies.

The practical results of the work consist in the development of specific software and hardware modules for each of the three intelligent subsystems (operator monitoring, wind load forecasting, predictive maintenance), suitable for implementation on accessible computing platforms, particularly those based on single-board computers. An algorithm for the automatic rotation of the crane boom with the wind has been created and its effectiveness experimentally confirmed. A comprehensive methodology for the experimental verification of the integrated safety system has been developed, allowing for the assessment of its performance under conditions close to real-life scenarios. The conducted experimental studies confirmed the high accuracy and fast reaction time of the developed subsystems: the operator drowsiness recognition system demonstrated an average accuracy of over 96% with a reaction time of less than one second; the wind load forecasting system provided high prediction accuracy with minimal computation time; the predictive maintenance system showed the ability to detect bearing assembly defects at early stages with a prediction accuracy of over 90%. The integrated system as a whole demonstrated stable functioning and an adequate response to combined threats. Practical

recommendations for the implementation of the developed system on construction sites and its integration with existing infrastructure have been provided.

In the introduction, the relevance of the dissertation topic is justified, the goal and objectives of the research are formulated, the object, subject, and hypothesis are defined, and the scientific novelty and practical significance of the obtained results are presented, along with a general characterization of the work, and information on its approbation and publications.

In the first chapter, an analysis of the causes of crane accidents was conducted, including structural defects, the human factor, and external influences. This analysis revealed the limitations of existing reactive safety systems. A scientific and technical gap was identified: intelligent approaches for diagnostics, fatigue monitoring, and wind forecasting are being developed in isolation and are not integrated into a single system.

In the second chapter, a predictive maintenance subsystem for the slewing mechanism was developed. Based on an analysis of physical wear models, the choice of vibration and temperature as key diagnostic indicators was substantiated. For the first time, patterns of change in these parameters were established, linking their levels to different stages of wear. This became the basis for creating a diagnostic model based on a neural network and developing a hardware-software module for predictive maintenance.

In the third chapter, an intelligent system for forecasting dangerous wind loads was developed. The shortcomings of existing regulations, which create a threat to the operator during unpredictable weather changes, were analyzed. The created system, based on a neural network, forecasts wind speed and direction with a Mean Absolute Percentage Error of 16.27%. It is capable of automatically slewing the jib to minimize aerodynamic resistance, thereby increasing safety.

In the fourth chapter, the human factor was analyzed as a dominant cause of accidents, and operator errors were classified into perceptual, cognitive, and executive categories. To counter the risks of fatigue and stress, a drowsiness detection system based on machine vision was developed. The system, implemented on a

Raspberry Pi, uses a convolutional neural network to identify fatigue with 96% accuracy and can be integrated with the crane's PLC for an automatic stop.

In the fifth chapter, a strategy for integrating the developed modules into a single intelligent safety system (IISS) for proactive risk management is substantiated. Requirements for the modular architecture of the system and interaction protocols for key users have been developed. A technical and economic feasibility study was conducted.

Keywords: construction machines, tower crane, transport mechanics, load-handling device, transmission system, lubrication system, rotation mechanism, sliding bearing, operation, operating time, reliability, refusal, resource, safety, stability, technical maintenance, technical condition, built-in test equipment, control systems, microprocessor system, artificial intelligence, Industry 4.0

Список публікацій здобувача

Основні наукові праці:

Публікації у науковому фаховому виданні України категорії "Б", що включене до міжнародних наукометричних баз:

1. Стефанов В. О., Дзержинський І. В. Керування стійкістю баштового крана за допомогою використання штучного інтелекту. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2024. Вип. 210. С. 7—18 https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320673

2. Стефанов В. О., Дзержинський І. В. Системний аналіз аварій баштових кранів та інноваційні методи їх попередження. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2025. Вип. 211. С. 7—23 https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327113

3. І.В. Дзержинський, В.О. Стефанов. Дослідження стійкості різних типів баштових кранів та методів для підвищення безпеки експлуатації. Комунальне господарство міст, 2025, том 1, Вип. 189 С. 32—42 https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-32-42

4. Стефанов В.О., Дзержинський І.В. Оптимізація роботи баштового крана за допомогою автоматизованих систем управління. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2025, Вип. 1(24) С. 409—417 https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1748

Додаткові праці та апробаційного характеру:

5. Стефанов В.О. Дзержинський І.В. Використання штучного інтелекту для прогнозування та запобігання аварійних ситуацій, спричинених вітровими навантаженнями на баштовий кран. Наука і техніка сьогодні, 2025 Вип. 2(43), С. 1570-1585 https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-2(43)-1571-1584

6. Дзержинський І.В., Зменшення аварійних випадків баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту. Наука та технології у сучасному розвитку галузевого машинобудування. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 25.10.2023 р., - Харків : ХНАДУ, 2023. – С.57-68.

7. Dzerzhynskyi I.V. Analysis of welded structural fatigue and durability in foundry cranes. Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві. Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції, 25-27.09.2023 р. / під заг. ред. А. М. Фесенка, М. А. Турчаніна. — Краматорськ : ДДМА, 2023. – С.167-168.

8. Дзержинський І.В., Кассов В.Д. Аналіз ризиків безпеки баштового крану. Наука як універсальний інструмент розвитку: збірник тез наук. конф. молодих вчених 23.12.2022 р., – Краматорськ, – С. 34.

9. Дзержинський І.В., Кассов В.Д. Аналіз моделей і методів діджиталізації управління баштовим. Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: збірник наук. праць Міжнародної молодіжної наук.-техн. конф., 12-14 квітня 2023 р., .. / за заг. ред. С. В. Ковалевського — Краматорськ-Тернопіль,: ДДМА, 2023, – С. 82.

10. Дзержинський І.В., Кассов В.Д. Роль баштових кранів в четвертій промисловій революції. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукраїнської наук.-техн. конф, 20-22.04.2023 р. . / За заг. ред. О. Ф. Тарасова. — Краматорськ-Тернопіль,: ДДМА, 2023. — С. 36.

11. Dzerzhynskyi I.V. Increasing the safety of the tower crane through the application of digital technologies. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 20-22.06.2023 р. / за заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023 – С.6.

12. Дзержинський І.В., Кассов В.Д. Математичне моделювання процесу переміщення баштових кранів. Машинобудування очима молодих: прогресивні

ідеї – наука – виробництво. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції 31 жовтня 2023 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2021. — С. 122.

13. Dzerzhynskyi I.V. The use of augmented reality in the operation of the tower crane in the rain and fog. МОЛОДЬ І НАУКА: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ: збірник тез наукової конференції молодих вчених 16 грудня 2021 р., – м. Краматорськ: Донецька обласна державна адміністрація, Рада молодих вчених при Донецькій облдержадміністрації, 2021. – 127-129 с.

14. Дзержинський І.В., Кассов В.Д. Розробка систем контролю на основі нейромережі для стійкості баштових кранів. Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: збірник наук. Праць Міжнародної молодіжної наук.-техн. конф., 20 червня 2022 р., .. / за заг. ред. С. В. Ковалевського — Краматорськ-Тернопіль,: ДДМА, 2022, – С. 45-51.

15. Malyhin M., Pryhodko O., Korsun V., Dzerzhynskyi I. Basic part of machine base: work drawing, process simulation, finished part. Scientific Collection «InterConf», (114): with the Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions» (June 26-28, 2022). Melbourne, Australia: CSIRO Publishing House, 2022. 359-365 pp.

ЗМІСТ

ВСТУП

Актуальність та доцільність дослідження. Зростання обсягів будівельних робіт, зокрема відновлення зруйнованих об'єктів, супроводжується широким застосуванням вантажопідіймальних машин, серед яких ключову роль відіграють баштові крани. Ці складні технічні системи функціонують в умовах значних статичних та динамічних навантажень, а також під впливом різноманітних зовнішніх факторів, є об'єктами підвищеної небезпеки. Незважаючи на вдосконалення конструкцій кранів та впровадження сучасних систем безпеки, проблема аварійності на будівельних майданчиках, пов'язана з експлуатацією баштових кранів, залишається вкрай актуальною. Статистичний аналіз аварійних випадків, як в Україні, так і в інших країнах світу, демонструє стійку тенденцію до зростання їхньої кількості, що свідчить про недостатню ефективність існуючих заходів щодо забезпечення безпеки.

Аварії баштових кранів, окрім значних матеріальних збитків, пов'язаних з пошкодженням або руйнуванням самого крана, будівельних конструкцій та обладнання, призводять до затримок у виконанні будівельних робіт, а найголовніше – створюють серйозну загрозу життю та здоров'ю працівників будівельних майданчиків та осіб, що знаходяться в зоні потенційної небезпеки. Це зумовлює необхідність проведення фундаментальних досліджень, спрямованих на виявлення глибинних причин аварійності, розробку та впровадження принципово нових підходів до забезпечення безпеки експлуатації баштових кранів.

Аналіз причин аварійності свідчить про складну, багатофакторну природу цього явища. До основних факторів ризику належать: помилки операторів кранів, зумовлені психофізіологічними особливостями людини (втома, зниження уваги, стрес), недостатнім рівнем кваліфікації або порушенням правил експлуатації; конструктивні дефекти, що виникають на етапах проектування, виготовлення, монтажу або в процесі експлуатації обладнання; а

також вплив зовнішніх чинників, серед яких домінуючим є вітрове навантаження, особливо в умовах сучасного висотного будівництва.

Традиційні підходи до забезпечення безпеки, що базуються на дотриманні нормативних вимог, проведенні планово-попереджувальних ремонтів та навчанні персоналу, є, безумовно, необхідними, але, як показує практика, недостатньо ефективними для запобігання аваріям, зумовленим комплексною взаємодією різних факторів ризику. Існуючі системи безпеки, як правило, орієнтовані на реагування на небезпечні ситуації (перевищення допустимого навантаження, вихід за межі робочої зони) після їх виникнення або, в кращому разі, під час їх виникнення, і не мають достатнього прогностичного потенціалу.

Принципово нові можливості для підвищення безпеки експлуатації баштових кранів відкриває застосування технологій штучного інтелекту (ШІ), зокрема, машинного навчання, глибокого навчання, комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу даних. Розробка та впровадження інтелектуальних систем безпеки, здатних до проактивного виявлення та прогнозування потенційних загроз, адаптації до змінних умов експлуатації та підтримки прийняття рішень оператором, є перспективним напрямком, що дозволяє перейти від реактивного управління ризиками до превентивного.

Доцільність дослідження визначається нагальною потребою у вирішенні проблеми аварійності баштових кранів шляхом створення та впровадження інтелектуальної системи безпеки нового покоління, що забезпечує:

- Комплексний захист від множинних факторів ризику. Система повинна інтегрувати функції моніторингу стану оператора (виявлення ознак втоми та сонливості), прогнозування вітрових навантажень з урахуванням локальних особливостей будівельного майданчика та динамічних ефектів, а також предиктивного обслуговування, що дозволяє виявляти конструктивні дефекти на ранніх стадіях їхнього розвитку.
- Підвищення точності та оперативності виявлення загроз. Застосування методів машинного навчання та глибокого навчання дозволяє виявляти складні, нелінійні залежності між параметрами роботи крана, зовнішніми

чинниками та станом оператора, що забезпечує більш точне та своєчасне прогнозування небезпечних ситуацій порівняно з традиційними підходами.

- Адаптивність до змінних умов експлуатації. Інтелектуальна система повинна бути здатною до адаптації до різних типів кранів, умов будівельного майданчика, характеристик вантажу та індивідуальних особливостей оператора.
- Зниження впливу людського фактора. Автоматизація процесів моніторингу, прогнозування та прийняття рішень дозволяє знизити навантаження на оператора крана, зменшити ймовірність помилок, зумовлених втомою, неуважністю або недостатньою кваліфікацією.
- Підвищення економічної ефективності. Зменшення кількості аварій, скорочення часу простою обладнання, оптимізація процесів технічного обслуговування та ремонту призводять до значного економічного ефекту.

Таким чином, дисертаційне дослідження, спрямоване на розробку та впровадження інтелектуальної системи безпеки для баштових кранів на основі технологій штучного інтелекту, є актуальним та має важливе науково-практичне значення. Результати дослідження сприятимуть суттєвому підвищенню рівня безпеки на будівельних майданчиках, зниженню аварійності, пов'язаної з експлуатацією баштових кранів, збереженню життя та здоров'я людей, а також підвищенню економічної ефективності будівельної галузі.

Актуальність проблеми дослідження, науково-безпекове значення проблематики та недостатня її теоретична та практична розробленість, зазначені вище суперечності, зумовили вибір теми дисертації **«Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах».**

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до основоположних принципів міжнародних та національних документів, спрямованих на підвищення рівня безпеки праці та впровадження інноваційних технологій, зокрема, Цілей

сталого розвитку ООН, зокрема Цілі 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура» та Цілі 8 «Гідна праця та економічне зростання». Тема дисертаційної роботи пов’язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, наведеними в «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок та середньострокових пріоритетних напрямків інноваційної діяльності загальнодержавного та галузевого рівнів», затвердженому Постановою Кабінету міністрів України № 942 від 7 вересня 2011, зі змінами згідно Постанови №782 від 12 липня 2022р та Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні, схваленій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 2 грудня 2020 р. № 1556-р, в частині сприяння впровадженню технологій штучного інтелекту у пріоритетних галузях економіки та забезпечення безпеки їх застосування; а також науково-дослідних робіт за темами, у яких автор брав безпосередню участь як виконавець: “Розробка методологічних основ проектування, дослідження та обґрунтування напрямків підвищення ефективності виконавчих механізмів, вузлів та конструкцій підйомно-транспортних, будівельних та дорожніх машин.” (ДР № 0120U103983).

Об'єкт дослідження – процеси підвищення безпеки експлуатації баштових кранів з використанням інтелектуальних систем моніторингу, прогнозування та сигналізації.

Предмет дослідження – закономірності впливу структурних та діагностичних параметрів технічного стану механізмів, сонливості оператора, вітрового навантаження на безпеку експлуатації крана.

Гіпотеза дослідження полягає у припущенні, що підвищення безпеки експлуатації баштових кранів можна досягти шляхом впровадження інтелектуальної системи моніторингу, прогнозування та сигналізації на основі штучного інтелекту, яка складається з підсистем предиктивного обслуговування, розпізнавання сонливості та втрати уваги оператора в режимі реального часу, прогнозування вітрових навантажень з урахуванням локальних

метеорологічних умов та динамічних характеристик крана з використанням технологій глибокого навчання нейронної мережі та машинного зору.

Мета дослідження – підвищення безпеки експлуатації баштового крану шляхом застосування штучного інтелекту в системах керування для проактивного запобігання аварійним ситуаціям, зумовленим конструктивними дефектами, людським фактором та впливом зовнішніх чинників.

Для досягнення мети необхідно **виконати наступні задачі**:

1. Провести системний аналіз науково-технічної літератури, стандартів безпеки, статистичних даних для виявлення та класифікації ключових факторів ризику при експлуатації баштових кранів, сучасного стану застосування штучного інтелекту для підвищення рівня безпеки кранів.

2. Дослідити параметри технічного стану механізмів крану та розробити підсистему предиктивного обслуговування критичних вузлів на основі глибокого навчання нейронної мережі.

3. Розробити математичну модель та програмно реалізувати підсистему моніторингу психофізіологічного стану оператора на основі методів машинного зору та нейронних мереж для розпізнавання втоми та сонливості в режимі реального часу.

4. Розробити математичну модель прогнозування небезпечних вітрових навантажень на основі глибокого навчання нейронної мережі та розробити алгоритми роботи підсистеми автоматичного превентивного керування стійкістю крану.

5. Розробити архітектуру інтегрованої інтелектуальної системи безпеки крану (ІІСБ) шляхом поєднання підсистем предиктивного обслуговування, розпізнавання сонливості та втрати уваги оператора в режимі реального часу, прогнозування вітрових навантажень.

6. Провести техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованої ІІСБ на прикладі баштового крану КБ-403.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні актуальної науково-технічної задачі підвищення експлуатаційної безпеки та надійності

баштових кранів шляхом створення та інтеграції інтелектуальних підсистем предиктивного обслуговування, розпізнавання сонливості та втрати уваги оператора в режимі реального часу, прогнозування вітрових навантажень з урахуванням локальних метеорологічних умов та динамічних характеристик крана.

Вперше:

– отримані закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану механізму повороту баштового крану, які дозволили розробити підсистему предиктивного обслуговування з використанням технології глибокого навчання нейронної мережі

Удосконалено:

– математичну модель підсистеми моніторингу психофізіологічного стану оператора баштового крану на основі методів машинного зору для розпізнавання втоми та сонливості в режимі реального часу;

– математичну модель прогнозування небезпечних вітрових навантажень на основі глибокого навчання нейронної мережі, яка дозволяє розробити алгоритми роботи підсистеми автоматичного превентивного керування стійкістю крану

Набув подальшого розвитку:

– метод підвищення безпеки експлуатації баштових кранів в частині удосконалення системи керування, яка враховує закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану, психофізіологічного стану оператора крану та прогнозування небезпечних вітрових навантажень та використовує технології штучного інтелекту.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено архітектуру та алгоритми інтегрованої інтелектуальної системи безпеки (ІІСБ), які можуть бути використані як технічне завдання для промислового виробництва та впровадження в системах керування баштових кранів.

2. Розроблено три функціональні програмно-апаратні модулі, що можуть бути імплементовані як окремо, так і в складі інтегрованої системи: модуль розпізнавання сонливості оператора на базі Raspberry Pi та камери; модуль прогнозування вітрових навантажень на базі обчислювального NPU-модуля та метеостанції; модуль предиктивної діагностики на основі вібродатчиків та обчислювального блоку.

3. В цілому, отримані результати дозволяють:

– проактивно запобігати аваріям, пов'язаним із втомою та втратою пильності оператора з підвищенням безпеки на 18%;

– автоматично захищати кран від небезпечних вітрових навантажень, мінімізуючи ризик перекидання, підвищенням рівня безпеки експлуатації на 24,2% для КБ-403;

– розробляти для окремих механізмів крану рекомендації щодо удосконалення системи технічних обслуговувань та ремонтів, а саме, переходу від планово-попереджувальної системи до предиктивного обслуговування, запобігаючи раптовим відмовам обладнання.

4. Проведене техніко-економічне обґрунтування довело високу доцільність впровадження розроблених рішень. Встановлено, що при капітальних вкладеннях у 500 тис. грн., щорічний економічний ефект від впровадження системи на одному крані становить 1,122 млн. грн., що забезпечує швидку окупність інвестицій та суттєве зниження експлуатаційних ризиків.

5. Результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) при підготовці бакалаврів за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування за освітньою програмою “Будівельні, колійні, гірничі та нафтогазопромислові машини” та при підготовці магістрів за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування за освітньою програмою “Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, колійні машини та обладнання”.

6. Практичні розробки пройшли апробацію та впроваджені у діяльність будівельних компаній ТОВ «Будівельна компанія «Престиж», ТОВ «Техпідряд» та ТОВ «ВОЛИНЬЕКОБУД», що підтверджується відповідними актами впровадження.

Експериментальна база дослідження. Дослідно-експериментальна робота проводилася на базі Галузевої науково-дослідної лабораторії «Механізація вантажно-розвантажувальних та шляхових робіт на залізничному транспорті» Українського державного університету залізничного транспорту.

Апробація результатів дослідження. Основні положення та результати дисертаційного дослідження, що присвячене розробці інтелектуальної системи безпеки для баштових кранів, були апробовані на низці наукових заходів різного рівня, включаючи міжнародні та всеукраїнські науково-практичні конференції. Зокрема, результати дослідження були представлені та обговорені на Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Наука та технології у сучасному розвитку галузевого машинобудування" (м. Харків, 2023), IX Міжнародній науково-технічній конференції "Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві" (м. Краматорськ, 2023), науковій конференції молодих вчених "Наука як універсальний інструмент розвитку" (м. Краматорськ, 2022), Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції "Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування" (м. Краматорськ-Тернопіль, 2023), VII Всеукраїнській науково-технічній конференції "Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод" (м. Краматорськ-Тернопіль, 2023), XXI Міжнародній науково-технічній конференції "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку" (м. Краматорськ-Тернопіль, 2023) та XX Міжнародній науково-практичній конференції "Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво" (м. Краматорськ, 2021). Участь у цих конференціях дозволила оприлюднити основні ідеї та результати дослідження, отримати відгуки та конструктивні зауваження від провідних фахівців у галузі

машинобудування, будівництва, автоматизації та інформаційних технологій, а також обмінятися досвідом з іншими дослідниками, що працюють над вирішенням суміжних проблем. Представлені доповіді та публікації охоплювали різні аспекти розробленої інтелектуальної системи безпеки, включаючи загальну концепцію, архітектуру, принципи функціонування окремих підсистем (розпізнавання сонливості, прогнозування вітрових навантажень, предиктивного обслуговування), методи машинного навчання та штучного інтелекту, що були використані при розробці, а також результати експериментальної перевірки.

Публікації. Відповідно до теми дисертації опубліковано 15 наукових праць, з яких основних праць: чотири статті, що опубліковані у фахових наукових виданнях категорії “Б”, які включені до міжнародних наукометричних баз та затверджених МОН України; та додаткових праць: одна стаття у виданнях категорії “Б”, які включені до міжнародних наукометричних баз, десять праць апробаційного характеру – тези доповіді.

Особистий внесок здобувача в наукових працях опублікованих в співавторстві включає розробку нових методів, алгоритмів та технічних рішень, які дозволили ефективно вирішити поставлені в дисертаційній роботі завдання та досягти поставлених цілей. У спільних наукових публікаціях здобувачеві належить наступний внесок.

В статті [1] – система забезпечення стійкості баштового крана за допомогою методів штучного інтелекту та алгоритм керування механізмами крана; в роботі [2] – дослідження причин виникнення аварій баштових кранів і методи застосування передових технологій, зокрема систем штучного інтелекту і нейронних мереж; в [3] – аналіз проблем забезпечення стійкості баштових кранів різних типів при дії робочих та зовнішніх навантажень, аналіз методів підвищення безпеки: комп'ютерне моделювання, адаптивне управління, компенсація навантажень; в статті [4] – аналіз ризиків, пов'язаних з людськими помилками, та їхній вплив на безпеку й продуктивність будівельних робіт, наведено методи реалізації систем безпеки за допомогою

камер, сенсорів та алгоритмів глибокого навчання. Досліджено ефективність алгоритмів, таких як згорткові нейронні мережі, і технічні виклики, що виникають при інтеграції цих технологій;

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 168 сторінок, з яких обсяг основного тексту – 121 сторінка, 48 рисунків і 2 таблиці за текстом, список використаних джерел із 154 найменування, і 4 додатки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БАШТОВИХ КРАНІВ ТА ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

1.1. Аналіз причин аварій баштових кранів та нормативні вимоги до безпеки їх експлуатації

У більшості країн Європи та Азії використання баштових кранів під час зведення висотних будівель є традиційним і щороку зростає. Так, у Південній Кореї кількість баштових кранів зросла з 3408 у 2015 році до 4385 у 2020 році, тобто на 22% [1]. Починаючи з 2016 року спостерігається щорічне зростання попиту на баштові крани і в Китаї, де до кінця 2020 року їх кількість досягла близько 410 000 одиниць [2]. Сьогодні у світі експлуатується понад мільйон кранів різної конструкції та вантажопідйомності, зокрема в Україні їх близько 5 тисяч [3]. В перспективі, незважаючи на появу різноманітних технологій будівництва, баштові крани залишаться основними вантажопідіймальними механізмами, а їхня кількість продовжуватиме зростати.

Необхідно зазначити, що в останні роки спостерігається зростання аварійності баштових кранів на будівельних майданчиках (Рис. 1.1.), причому вони становлять до 40% від загальної кількості аварій стрілових вантажопідіймальних кранів [4]. Основна частка аварій спричинена втратою стійкості крана та його перекиданням, часто з попереднім руйнуванням металоконструктивних елементів.

Ці інциденти завдають шкоди не лише будівельній інфраструктурі та здоров’ю персоналу, що перебуває на майданчику, а й становлять небезпеку для інших споруд та людей поблизу, оскільки радіус падіння крана може бути досить значним.

Основними етапами аналізу аварійності баштових кранів є збір і аналіз даних про аварії та їх систематизація.


Рис. 1.1. Аварії баштових кранів, з руйнуванням: стріли (м. Львів 24.10.24) та башти (м. Рівне 16.03.16)

Статистичні дані свідчать про стійку тенденцію до зростання кількості аварій баштових кранів як в Україні, так і в світі. Наприклад, в Іспанії за період з 2012 по 2021 рік внаслідок аварій баштових кранів загинуло 62 працівники [5], а в Південній Кореї з 2015 по 2020 рік відбулося понад 40 аварій з тенденцією до зростання. В Китаї за період з 2016 по 2018 рік щорічно реєструвалося понад 100 аварій [6], а вже у 2020 році, згідно з даними Міністерства житлового будівництва та розвитку міських і сільських районів КНР [7], відбулося близько 125 аварій. Ці дані є особливо показовими на тлі зростання кількості інтелектуальних будівельних майданчиків в Китаї, оснащених системами візуалізації та іншими сучасними технологіями, що мали б сприяти зниженню аварійності.

Проте, впровадження інтелектуальних систем управління не завжди призводить до бажаного результату. Надмірне навантаження на оператора крана, пов'язане з управлінням складним інтерфейсом, може призвести до зростання кількості помилок, таких як плутанина в режимах роботи та втрата ситуаційної обізнаності.

Таким чином, зростання кількості аварій баштових кранів обумовлене не лише збільшенням їх кількості, але й недостатньою увагою до проблем безпечної експлуатації. Для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно розширити концепцію "людина-машина-середовище", включивши до неї технічні та фізичні аспекти робочого середовища оператора.

Проведено аналіз наукових публікацій за період з 2018 по 2023 роки, присвячених дослідженню причин аварій баштових кранів та розробці методів їх запобігання.

Аналіз вітчизняних досліджень свідчить про те, що основна увага приділяється аналізу конкретних аварій та впливу окремих факторів, таких як раптові пориви вітру чи коливання вантажу [8-10]. Тобто дослідження зосереджені на безпосередніх причинах аварій, не завжди враховуючи складну взаємодію різних факторів, що призводить до катастрофічних наслідків.

Для комплексного розуміння причин аварій необхідно виходити за межі аналізу окремих випадків та виявляти системні фактори, що сприяють виникненню аварійних ситуацій. Це дозволить простежити розвиток подій від першопричин до безпосередніх причин аварії та оцінити взаємодію системи "людина-машина-середовище".

Зарубіжні дослідження в галузі безпеки експлуатації баштових кранів охоплюють три основні напрямки:

- аналіз причин аварій [11,12];
- розробка систем моніторингу та обладнання для виявлення небезпечних ситуацій в режимі реального часу [13,14];
- оцінка факторів безпеки з урахуванням структурно-механічних характеристик кранів [15-17].

На підставі проведених досліджень фахівці пропонують різноманітні методи запобігання безпосереднім причинам аварій баштових кранів, таких як помилки оператора, руйнування конструкційних елементів та несприятливі умови експлуатації. Проте, існуюча практика оцінки ризиків має певні недоліки. Зокрема, недостатньо уваги приділяється комплексній оцінці ризиків протягом

всього життєвого циклу крана. Крім того, виявлено, що сучасні методи оцінки ризиків часто базуються на неповних даних, обмеженому наборі параметрів та відсутності спеціалізованого програмного забезпечення. Важливість переходу до проактивних підходів, зокрема оперативної ідентифікації та локалізації небезпек на основі концепції ризик-менеджменту в цифрових системах керування, показана в роботі [18].

Недосконалість систем управління безпекою є систематичною проблемою, яка призводить до багатьох аварій. Для підвищення рівня безпеки необхідно розробити комплексний підхід, який враховуватиме всі фактори, що впливають на надійність та безпеку кранів. Вивчення умов експлуатації та особливостей керування кранами дозволяє отримати цінну інформацію для вдосконалення конструкцій та систем управління нових машин.

В основі більшості аварій лежать людські помилки, тобто людський фактор. Помилки можуть бути допущені на всіх етапах життєвого циклу баштового крана (Рис. 1.2.). Основними причинами аварій баштових кранів є технічні, через несправність технічних пристроїв та пристроїв безпеки - більше 50 % від усіх аварій. Значною, більше 30 %, залишається кількість аварій, що сталися з організаційних причин, в основному через порушення технологічної та трудової дисципліни, неправильної чи неузгодженої дії некваліфікованого обслуговуючого персоналу [2-3].

Щорічно у світі понад 20 % з усіх аварій баштових кранів, трапляються внаслідок дії сукупності несприятливих зовнішніх впливів, що діють на баштові крани, серед яких переважним є вітрове навантаження. Вітрове навантаження є випадковим процесом. Нерівномірні пориви вітру, що виникають з 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 більш половини (близько 60 %) випадків аварій пов'язані з людським фактором [4], також непрофесійні дії машиніста крана призводять до появи аварійної

ситуації або погіршують дії при зовнішніх навантаженнях, що раптово виникли.

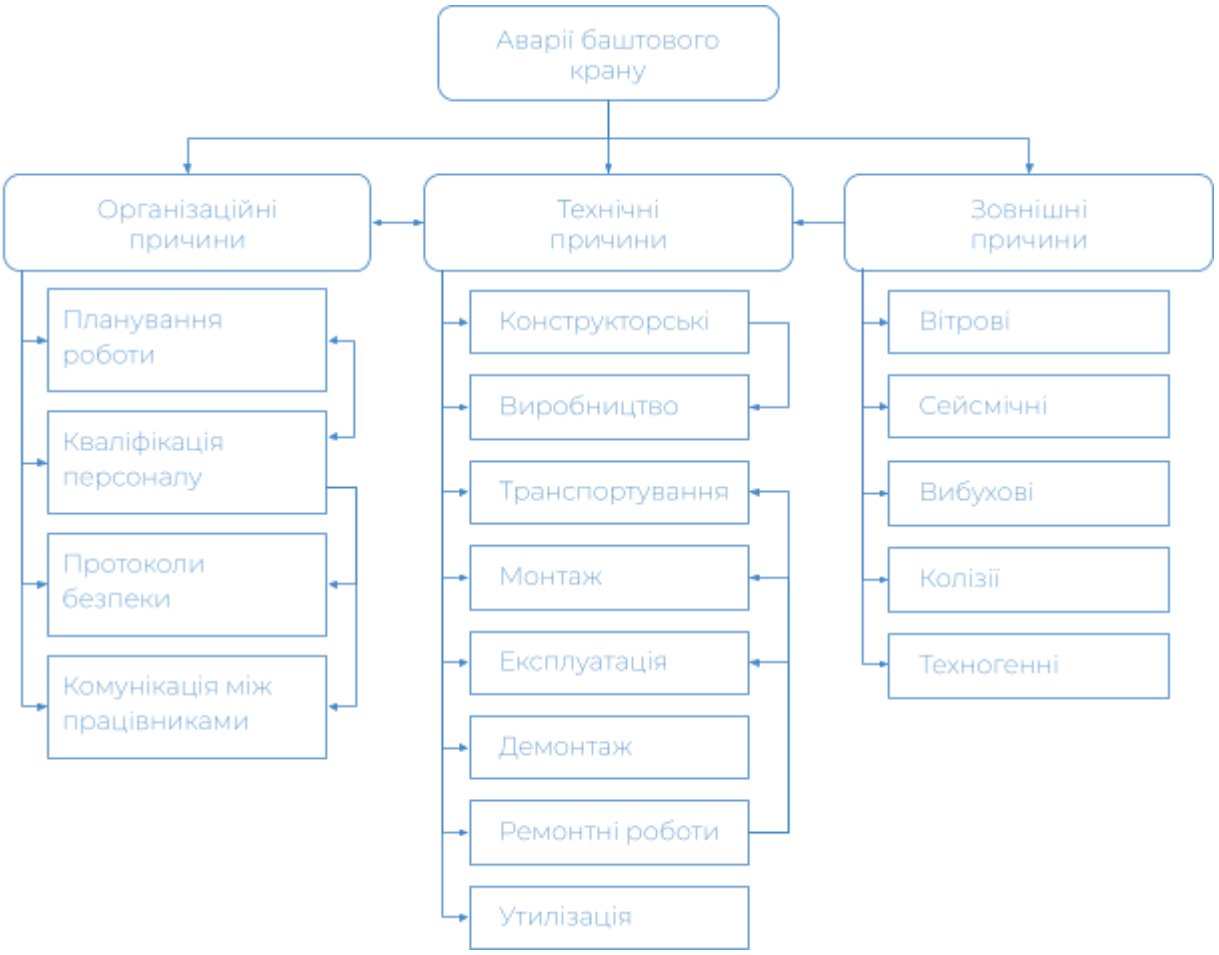


Рис. 1.2. Причини аварій баштових кранів

Зниження аварійності баштових кранів є не лише питанням економічної доцільності, що полягає у зменшенні витрат на ремонт, відновлення та компенсації, але й, перш за все, питанням збереження людського життя та здоров'я. Кожна аварія, незалежно від її масштабів, несе в собі потенційну загрозу для працівників будівельного майданчика, а також для людей, що знаходяться в зоні потенційного падіння крана або його елементів. Ця проблема є спільною для всіх галузей, пов'язаних з експлуатацією складної техніки, де

питання забезпечення безпеки руху та модернізації обладнання, зокрема вантажозахоплювальних пристроїв, є першочерговими [19-20].

Крім того, аварії баштових кранів часто призводять до значних матеріальних збитків, руйнування будівель і споруд, пошкодження інфраструктури, а також до затримок у виконанні будівельних робіт, що негативно впливає на економічні показники проекту. Один із таких випадків стався 2014 року в Харкові (Рис.1.3.), 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[21]. 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. 1.3. Аварія баштового крану (м. Харків 17.05.14)

Тому, забезпечення безпечної експлуатації баштових кранів є комплексним завданням, що вимагає системного підходу та врахування всіх факторів ризику, від людського до технічного та природного. Для досягнення цієї мети необхідне глибоке розуміння причин аварійності, що дозволить розробити ефективні превентивні заходи та мінімізувати ймовірність виникнення небезпечних ситуацій.

Представлений детальний аналіз причин аварійності баштових кранів, свідчить про складну, багатофакторну природу цього явища. Для систематизації та подальшого дослідження, всі причини аварій можна умовно розділити на три основні групи: людський фактор, конструктивні дефекти та зовнішні чинники. Кожна з цих груп включає в себе широкий спектр потенційних загроз, що вимагають ретельного вивчення та розробки специфічних заходів щодо їх запобігання.

Після здобуття Україною незалежності було взято курс на поступову інтеграцію національної системи стандартизації з європейськими нормами. Це було обумовлено як політичними та економічними чинниками, так і необхідністю підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції на міжнародному ринку.

До 2013 року в Україні діяв перехідний період, коли паралельно застосовувалися як радянські ГОСТи, так і новостворені Державні стандарти України (ДСТУ), розроблені на основі європейських стандартів. Процес заміни ГОСТів на ДСТУ відбувався поступово.

Прийняття Технічного регламенту безпеки машин (ТРБМ), затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 62 від 30 січня 2013 року[22], стало ключовим етапом реформування системи технічного регулювання в галузі машинобудування, і, зокрема, кранобудування. Даний документ імплементував в національне законодавство основні положення Директиви 2006/42/ЄС Європейського Парламенту та Ради щодо безпеки машин.

ТРБМ визначив загальні вимоги безпеки до машин та обладнання, включаючи баштові крани, а також процедури підтвердження відповідності. Для деталізації вимог ТРБМ Міністерством економічного розвитку і торгівлі України було затверджено перелік національних стандартів, ідентичних гармонізованим європейським стандартам.

Приблизно з середини 2000-х років ведеться робота з уніфікації європейських стандартів у цій галузі. Результатом цього процесу, що розпочався у 2004 році, є розробка стандарту EN 13001. Наразі EN 13001 має статус

експериментального, але поступово починає впроваджуватися у стандарти на продукцію, і в перспективі має замінити собою раніше згадані нормативи.

На сучасному етапі основними нормативними документами, що регламентують проектування та виготовлення баштових кранів в Україні, є ДСТУ, гармонізовані з європейськими стандартами серії EN 13001, а саме:

- ДСТУ EN 13001-1:2018 (EN 13001-1:2015, IDT) КРАНИ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНІ. Загальні принципи проектування. Частина 1. Загальні положення та вимоги.
- ДСТУ EN 13001-2:2021 (EN 13001-2:2021, IDT) КРАНИ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНІ. Загальні принципи проектування. Частина 2. Впливи навантаг.
- ДСТУ EN 13001-3-1:2019 (EN 13001-3-1:2012 + A2:2018, IDT) КРАНИ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНІ. Загальні принципи проектування. Частина 3-1. Граничні стани та підтвердження безпеки сталевих конструкцій.
- ДСТУ EN 14439:2019 (EN 14439:2006+A2:2009, IDT) КРАНИ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНІ. Безпека. Баштові крани. (Даний стандарт містить специфічні вимоги до баштових кранів, доповнюючи загальні положення серії EN 13001).

Окрім стандартів, що регламентують проектування та виготовлення, важливу роль у забезпеченні безпечної експлуатації баштових кранів відіграють нормативно-правові акти з охорони праці.

Процедура розслідування та обліку аварій на виробництві визначається "Порядком розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві", затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 17.04.2019 № 337 [23]. Цей Порядок класифікує аварії за категоріями (перша, друга та інші) залежно від масштабу наслідків та рівня надзвичайної ситуації (державний, регіональний, місцевий, об'єктовий). Розслідування аварій першої та другої категорії, а також аварій, що призвели до нещасних випадків, проводиться Держпраці. Аварії, що не відносяться до

першої чи другої категорій, а також випадки порушення технологічних процесів, розслідуються комісіями, створеними роботодавцем.

Мінімальні вимоги безпеки до вантажопідіймальних кранів, включаючи баштові, встановлюють "Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання" (НПАОП 0.00-1.80-18), затверджені наказом Міністерства соціальної політики України від 19.01.2018 № 62 [24]. Ці Правила зобов'язують роботодавця забезпечувати належний технічний стан обладнання шляхом проведення регулярних технічних оглядів, експертних обстежень та нагляду за безпечною експлуатацією.

"Порядок проведення технічного огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки", затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 26.05.2004 № 687 [25], регламентує процедуру проведення технічного огляду та експертного обстеження кранів спеціалізованими або експертними організаціями.

Вимоги до кваліфікації машиніста крана визначені у Випуску 1 "Професії працівників, що є загальними для всіх видів економічної діяльності" Довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників, затвердженого наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 29.12.2004 № 336 [26].

Таким чином, дотримання роботодавцями вимог нормативно-правових актів з охорони праці є ключовим фактором у забезпеченні профілактики аварій при експлуатації баштових кранів.

Імплементація європейських норм сприяє підвищенню рівня безпеки та якості баштових кранів, що виробляються в Україні, полегшує процедури сертифікації та розширює можливості експорту продукції на європейський ринок. Застосування сучасних стандартів стимулює впровадження інноваційних технологій та використання прогресивних матеріалів, що, в результаті, сприяє підвищенню конкурентоспроможності української продукції на світовому ринку. Разом із тим, важливу роль продовжує відігравати і національне

законодавство в сфері промислової безпеки, спрямоване на профілактику аварій та забезпечення безпечних умов праці при експлуатації баштових кранів.

1.2. Етапи розвитку та сучасний стан систем безпеки баштових кранів

Становлення баштового кранобудування, що припадає на кінець XIX – початок XX століття, нерозривно пов'язане з першими, ще вельми примітивними, спробами забезпечення безпеки експлуатації цих, на той час, революційних вантажопідіймальних машин [27]

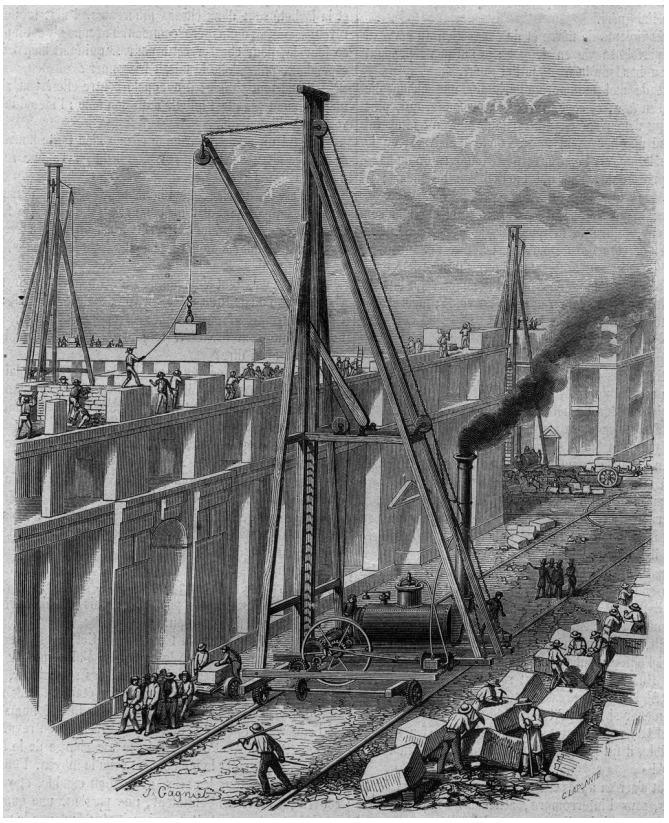


Рис. 1.4. Паровий кран, що використовується на будівельному майданчику будинку (гравюра, кінець XIX століття)

Рівень технологічного розвитку того періоду, а саме – відсутність розвиненої електротехнічної бази та електроніки, обумовлював застосування

виключно механічних принципів побудови систем безпеки [28]. Ефективність цих систем, що ґрунтувалася на простих фізичних законах, значною мірою залежала від запасу міцності самої конструкції крана, а також від кваліфікації, досвіду та пильності кранівника, який відігравав ключову роль у забезпеченні безпечної роботи [29].

Основним, і, по суті, єдиним завданням перших систем безпеки було запобігання найбільш очевидним та катастрофічним за своїми наслідками аварійним ситуаціям: перевантаженню крана, що могло призвести до його руйнування; виходу рухомих елементів (вантажного візка, гакової підвіски) за межі допустимої робочої зони, що загрожувало зіткненням з конструкцією крана або навколишніми об'єктами; а також неконтрольованому руху вантажу, що міг спричинити його падіння [30].

Для вирішення цих завдань застосовувалися, головним чином, три типи механічних пристроїв: механічні обмежувачі вантажопідйомності, кінцеві вимикачі, механічні гальма [31]. Простота конструкції механічних пристроїв, з одного боку, забезпечувала певну надійність, але, з іншого боку, робила їх вразливими до зносу, впливу зовнішніх факторів (пил, волога, температурні коливання) та, що найважливіше, не забезпечувала достатньої точності спрацьовування [32].

Середина XX століття характеризується інтенсивним розвитком електротехніки, що справило визначальний вплив на еволюцію систем безпеки баштових кранів [33]. Заміна механічних принципів обмеження та контролю електричними та електромеханічними, з використанням релейно-контакторної апаратури, ознаменувала собою перехід до якісно нового рівня забезпечення безпеки експлуатації цих вантажопідіймальних машин [34].

Впровадження електротехнічних рішень дозволило суттєво розширити функціональні можливості систем безпеки. Зокрема, на зміну примітивним механічним обмежувачам вантажопідйомності прийшли електромеханічні та електронні аналоги [35]. В основі їхньої роботи лежав принцип вимірювання електричних величин, пропорційних діючому навантаженню [36].

Електромеханічні обмежувачі, як правило, використовували тензометричні датчики (рис 1.5.), що реєстрували деформацію пружних елементів конструкції крана (канатів, спеціальних тензометричних балок тощо) [37]. Зміна електричного опору тензодатчика, пропорційна деформації, слугувала вхідним сигналом для релейної схеми, що забезпечувала розмикання кола керування лебідкою при досягненні граничного навантаження [38]. Електронні обмежувачі, у свою чергу, базувалися на більш складних електронних схемах обробки сигналів, що надходили від датчиків, що дозволяло не тільки підвищити точність вимірювань, але й реалізувати додаткові функції, наприклад, попереджувальну сигналізацію [39].

Рис. 1.5. Обмежувач навантаження ОНК-М на основі тензометричного датчика (1979 рік)

Важливим напрямком розвитку стало впровадження систем захисту електродвигунів від перевантаження. З цією метою застосовувалися теплові реле, що контролювали температуру обмоток двигуна та розмикали коло живлення при перевищенні допустимого значення, запобігаючи тим самим перегріву та виходу двигуна з ладу [40].

Рис. 1.6. Анемометр крановий М-95 (1985 рік)

У цей період починається впровадження анемометрів для контролю швидкості вітру (рис 1.6.). Дані з яких могли бути використані для автоматичного блокування роботи крана при досягненні небезпечних значень швидкості вітру, запобігаючи його перекиданню [41].

Застосування релейно-контакторної апаратури дозволило реалізувати системи блокувань, що унеможливлювали виконання потенційно небезпечних, несумісних операцій. Прикладом є блокування одночасного ввімкнення механізмів підйому вантажу та зміни вильоту стріли, що могло б призвести до втрати стійкості крана [42].

Також, обов'язковим елементом систем безпеки того часу стають пристрої звукової та світлової сигналізації, що інформували кранівника про наближення до граничних режимів роботи (перевантаження, досягнення крайніх положень, перевищення допустимої швидкості вітру тощо), забезпечуючи можливість своєчасного втручання в процес керування та запобігання аварійній ситуації [43].

Період кінця XX – початку XXI століття, що характеризується бурхливим розвитком обчислювальної техніки, мікроелектроніки та інформаційних технологій, став епохою кардинальних перетворень у багатьох галузях промисловості. Не стало винятком і кранобудування, де впровадження

цифрових технологій призвело до фундаментальних змін у принципах побудови та функціонування систем безпеки баштових кранів [44]. Цей етап, який по праву можна назвати цифровою еволюцією, ознаменувався переходом від відносно простих електромеханічних систем захисту до складних, інтелектуальних комплексів, що забезпечують якісно новий рівень безпеки та ефективності експлуатації цих, без перебільшення, незамінних на сучасному будівництві вантажопідіймальних машин [45].

Ключовим фактором, що зумовив ці зміни, стало впровадження мікропроцесорів та інтегральних схем [46]. Це дозволило подолати цілий ряд принципових обмежень, властивих попереднім поколінням систем безпеки, що базувалися на релейно-контакторній апаратурі [47]. Насамперед, мініатюризація компонентної бази, що стала наслідком прогресу в мікроелектроніці, сприяла створенню значно більш компактних і легких пристроїв [48]. Це, в свою чергу, спростило їхнє розміщення на крані та зменшило навантаження на його конструкцію [49]. Крім того, суттєво зросла швидкодія систем безпеки, що є критично важливим фактором для своєчасного запобігання аварійним ситуаціям, де рахунок може йти на мілісекунди [50].

Однією з найбільш значущих переваг мікропроцесорних систем є їхня програмованість. Це означає, що логіка роботи системи безпеки може бути гнучко налаштована та адаптована до конкретних умов експлуатації, типу вантажу, конфігурації будівельного майданчика та інших факторів, що впливають на безпеку роботи крана [51]. Більше того, зміна програмного забезпечення дозволяє швидко модифікувати та вдосконалювати систему безпеки без необхідності внесення змін в апаратну частину, що значно спрощує процес модернізації та адаптації до нових вимог [52].

Нарешті, цифрова обробка сигналів, що прийшла на зміну аналоговій, забезпечила принципово вищу точність вимірювань та контролю параметрів роботи крана [53]. Це дозволило не лише більш точно визначати поточний стан машини, але й реалізовувати складні алгоритми прогнозування та запобігання небезпечним ситуаціям [54].

Завдяки цим фундаментальним технологічним досягненням стало можливим створення комплексних, інтегрованих систем безпеки, що об'єднують в єдиний, злагоджено працюючий функціональний комплекс, функції обмеження вантажопідйомності (з урахуванням вильоту стріли та інших факторів), контролю положення робочих органів у просторі (запобігання зіткненням), а також безперервної реєстрації параметрів роботи крана ("чорні скриньки") [55]. Такі інтегровані системи, на відміну від розрізнених, незалежно функціонуючих пристроїв попереднього покоління, здатні аналізувати взаємозв'язок різних факторів, що впливають на безпеку, і реалізовувати складні, багаторівневі алгоритми запобігання аварійним ситуаціям [56].

Центральну роль у сучасних, високотехнологічних системах безпеки відіграють програмовані логічні контролери (англ., PLC) (рис. 1.7.) [57]. По суті, PLC є спеціалізованими промисловими комп'ютерами, призначеними для керування технологічними процесами в режимі реального часу [58]. Вони забезпечують гнучке програмне керування всіма компонентами системи безпеки, включаючи датчики, виконавчі механізми, пристрої індикації та сигналізації [59]. Завдяки можливості програмування, PLC дозволяють реалізувати практично будь-які алгоритми керування та захисту, адаптуючи роботу системи до специфічних умов будівельного майданчика, типу вантажу, кваліфікації кранівника та інших факторів [60].

Рис. 1.7. Програмований логічний контролер Siemens Simatic S7-300

Важливим напрямком розвитку стало впровадження широкого спектру різноманітних датчиків. Сучасні баштові крани оснащуються датчиками навантаження (тензометричні датчики, датчики тиску в гідросистемі), датчиками кута нахилу стріли та платформи, датчиками швидкості та напрямку вітру (анемометри), датчиками абсолютного та відносного положення робочих органів (енкодери, потенціометри, ультразвукові та лазерні датчики), датчиками прискорення (акселерометри) та іншими [61]. Таке різноманіття вимірювальних пристроїв надає системі безпеки вичерпну інформацію про поточний стан крана, його положення в просторі та характеристики навколишнього середовища [62]. Це дозволяє системі не лише реагувати на вже наявні відхилення від норми, але й, завдяки складним алгоритмам обробки даних, прогнозувати розвиток потенційно небезпечних ситуацій і вживати превентивних заходів [63].

Окремо слід виділити системи координатного захисту, що набули широкого розповсюдження в останні десятиліття. Ці системи, використовуючи дані від датчиків положення (енкодерів, GPS-приймачів тощо) (рис. 1.8.), створюють віртуальну тривимірну модель робочого простору крана та

навколишніх об'єктів [64]. Це дозволяє програмно обмежувати зону дії крана, запобігаючи його зіткненню з будівлями, спорудами, лініями електропередач, іншими кранами та будь-якими іншими об'єктами інфраструктури, що знаходяться в зоні його роботи [65].

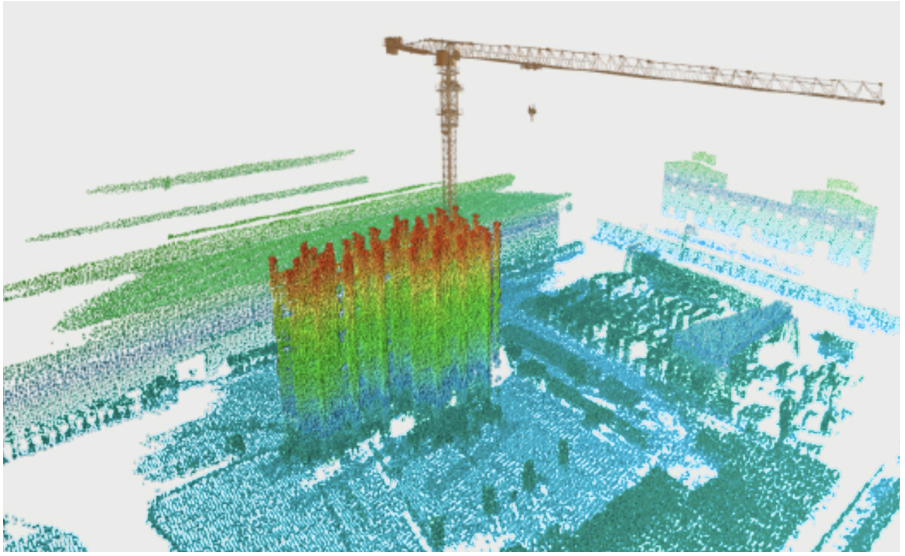


Рис. 1.8. 3д модель робочого простору крана та навколишніх об'єктів

Розвиток технологій бездротового зв'язку та радіоелектроніки сприяв створенню систем дистанційного керування баштовими кранами [66]. Дистанційне керування не лише підвищує зручність роботи оператора, дозволяючи йому вибрати найбільш зручну та безпечну точку огляду, але й значно покращує безпеку, оскільки дозволяє вивести кранівника з потенційно небезпечної зони, наприклад, з кабіни, розташованої на великій висоті, або з зони безпосередньої близькості до вантажу, що переміщується [67].

1.3. Огляд досліджень предиктивного обслуговування та сучасні підходи до діагностики

Предиктивне обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) — це стратегія технічного обслуговування, що передбачає прогнозування несправностей обладнання на основі аналізу даних із сенсорів, дозволяючи виконувати ремонт до виникнення критичних відмов [68, 75]. Цей підхід мінімізує незаплановані простої, знижує витрати на ремонт і подовжує строк служби обладнання, переходячи від реактивної моделі “поломка–ремонт” до проактивної “прогнозування–запобігання” [70, 77]. Розвиток технологій Індустрії 4.0, таких як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI), хмарні обчислення та аналіз великих даних, зробив предиктивне обслуговування ключовим інструментом для підвищення ефективності промислових систем [69, 72]. У контексті баштових кранів, зокрема їх механізмів повороту та підйому, PdM має особливе значення через критичність цих систем для безпеки та продуктивності будівельних майданчиків [80].

Предиктивне обслуговування базується на моніторингу стану обладнання в реальному часі та прогнозуванні залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) за допомогою даних із сенсорів вібрації, температури, струму тощо [71, 73]. Воно інтегрує технології IoT, великі дані та машинне навчання для створення інтелектуальних систем, здатних виявляти деградацію на ранніх стадіях [72, 79]. Згідно з ринковими прогнозами, глобальний ринок PdM зростає і до 2030 року досягне значних обсягів завдяки широкому впровадженню в машинобудуванні, енергетиці, авіації та інших галузях [74].

Основні переваги PdM включають: зменшення аварійних відмов, що критично для безпеки експлуатації баштових кранів [77], оптимізацію графіків технічного обслуговування, знижуючи витрати [76], досягнення “нульових простоїв” шляхом завчасного усунення несправностей [75].

Напрямок діагностики та прогнозного обслуговування є одним із ключових у сучасних академічних та промислових дослідженнях і розробках, що охоплюють спеціалізовані підходи для Індустрії 4.0 [69], виробництва [81], енергетики [84], авіації [85], транспорту [86], медицини [87] та роторного обладнання, зокрема редукторів баштових кранів [82]. Успішна реалізація вимагає мультидисциплінарного підходу, вирішення питань кібербезпеки, якості даних та економічної доцільності [79, 83].

Баштові крани є критично важливим обладнанням, де відмови механізмів, зокрема редукторів підйому та повороту, можуть призвести до аварій із катастрофічними наслідками [80]. Традиційні системи моніторингу кранів контролюють експлуатаційні параметри, такі як робоче навантаження, момент вантажу, висота підйому, положення візка та цілісність конструкції, використовуючи датчики та обмежувачі для запобігання перевантаженням [88]. Однак ці методи не завжди виявляють приховані деградаційні процеси, що призводять до раптових відмов [80].

Найнебезпечнішим сценарієм для підйомного механізму є руйнування зубця шестерні редуктора, що спричиняє втрату зчеплення та неконтрольоване падіння вантажу [88]. Динамічні навантаження, удари та втома матеріалу зубців є основними причинами таких відмов [78]. Статистика показує, що відмови механізмів залишаються однією з головних причин аварій баштових кранів, що мотивує розробку інтелектуальних систем діагностики [80, 88].

Предиктивне обслуговування є ключовим елементом Індустрії 4.0, що дозволяє переходити від реактивного до прогнозного підходу в технічному обслуговуванні. Використання вібраційних сенсорів, методів обробки сигналів та AI, зокрема глибокого навчання, забезпечує високу точність діагностики та прогнозування відмов. Для баштових кранів, де відмови редукторів можуть мати катастрофічні наслідки, PdM має особливе значення. Однак виклики, пов’язані з якістю даних, інтеграцією з застарілим обладнанням та інтерпретованістю моделей, вимагають подальших досліджень. Розробка спеціалізованих систем моніторингу для механізмів баштових кранів, що

інтегрують IoT, AI та цифрові двійники, є перспективним напрямком для підвищення безпеки та ефективності будівельної галузі.

1.4. Огляд досліджень в галузі вітрових навантажень на баштові крани та систем безпеки

Напрямок дослідження вітрових навантажень на баштові крани та розробки систем безпеки від цих навантажень є критично важливим у сучасних інженерних і прикладних науках [89, 90]. Актуальність теми зумовлена високою часткою аварій, спричинених вітром, які становлять значну загрозу для безпеки персоналу, обладнання та навколишнього середовища на будівельних майданчиках [91]. Наприклад, повідомлення про аварії в Польщі у 2022 році [92] та 2023 році [93] підкреслюють трагічні наслідки недостатнього врахування вітрових навантажень, включаючи перекидання кранів і людські жертви. Дослідження в цій галузі об’єднують фахівців із аеродинаміки, механіки конструкцій, комп’ютерних наук, обробки сигналів, штучного інтелекту, Інтернету речей (IoT) та сенсорних технологій. Спеціалізовані підходи розробляються для вирішення завдань у таких напрямах, як чисельне моделювання вітрових навантажень [94, 95], прогнозування стійкості кранів [96], створення інтелектуальних систем безпеки [97], оптимізація розташування кранів [98, 99], аналіз аеродинамічної взаємодії з оточенням [100] та оцінка ризиків аварій [101].

Сучасні методи чисельного моделювання, такі як метод скінченних елементів і обчислювальна гідродинаміка, дозволяють детально аналізувати аеродинамічні сили, що діють на баштові крани [94, 95]. Експериментальні випробування в аеродинамічній трубі [102] показали, що оптимізація форми стріли знижує момент перекидання на 15–20%, що є особливо важливим для

кранів у неробочому стані. У роботі [103] розроблено аналітичну модель для оцінки критичної швидкості вітру, яка може призвести до перекидання швидкомонтованих кранів, підтверджену експериментами, але обмежену фіксованою геометрією конструкції. Дослідження [104] застосувало метод віртуального збудження для аналізу динамічної надійності, виявивши високу чутливість кранів до поривів вітру.

Резонансні коливання, викликані збігом частоти пульсацій вітру з власною частотою крана, становлять значний ризик втрати стійкості [101]. У роботі [101] проаналізовано аварії, спричинені вітровими вібраціями, і запропоновано встановлення демпфуючих пристроїв для зменшення амплітуди коливань. Дослідження [97] розробило "розумний" кран із сенсорами та актуаторами, які знижують вібрації на 25–30% шляхом активного демпфування. У роботі [104] показано, що нелінійні вібрації, викликані поривами, ускладнюють прогнозування традиційними методами, що вимагає використання передових обчислювальних підходів, таких як методи віртуального збудження. Хитання вантажу, описане в [105], є однією з основних причин аварій, таких як зіткнення з конструкціями, що потребує розробки адаптивних контролерів.

Міжнародні стандарти [106, 107] та національні норми, такі як ДСТУ EN 13001-2, встановлюють граничні швидкості вітру для роботи кранів (20 м/с у робочому стані, до 42 м/с у неробочому) і визначають методи оцінки навантажень на основі швидкісного напору, аеродинамічного коефіцієнта та коефіцієнта динамічності. Проте ці стандарти базуються на усереднених значеннях, що обмежує їхню застосовність у складних умовах, таких як щільна забудова чи екстремальні пориви [95]. У роботі [108] підкреслюється, що нормативні розрахунки часто не враховують локальні турбулентні потоки, що знижує точність прогнозування.

Електромеханічні системи безпеки інтегрують анемометри, тензодатчики та камери для моніторингу вітрових умов у реальному часі [101]. У роботі [109] описано системи, які автоматично зупиняють кран або коригують положення стріли при перевищенні граничної швидкості вітру. Такі системи включають

датчики температури, вологості та інклінометри для комплексного аналізу умов, але їхня ефективність залежить від якості метеоданих.

Інтелектуальні системи на основі технологій Індустрії 4.0, зокрема штучного інтелекту, набувають дедалі більшого поширення. У дослідженні [96] застосовано рекурентні нейронні мережі (LSTM) для прогнозування швидкості вітру з точністю MAPE 12–15%, що дозволяє передбачати пориви та коригувати положення стріли. У роботі [97] розроблено систему адаптивного керування, яка автоматично повертає стрілу за напрямком вітру, зменшуючи аеродинамічний опір на 20–25%. Дослідження [110] запропонувало автоматизовану систему аналізу стійкості на основі BIM, яка враховує вітрові навантаження при виборі крана та його розташування, знижуючи ризики на 15–20%.

Оптимізація розташування баштових кранів із урахуванням вітрових навантажень є важливим напрямом для підвищення безпеки та ефективності [98]. У роботі [98] розроблено модель на основі генетичних алгоритмів (GA), яка враховує вітрові ризики та знижує ймовірність аварій на 10–15%. Дослідження [99] інтегрувало BIM і GA для вибору оптимального розташування, що дозволяє скоротити час монтажу та знизити ризики, але потребує значних обчислювальних ресурсів. У роботі [111] запропоновано модель змішано-цілочисельного програмування, яка оптимізує розташування та графік роботи кранів, але не враховує нелінійні динамічні ефекти вітру.

Аеродинамічна взаємодія кранів із сусідніми будівлями суттєво впливає на вітрові навантаження [100]. У дослідженні [100] показано, що крани можуть змінювати навантаження на висотні будівлі до 10% через ефект сліду. У роботі [112] встановлено, що турбулентність, спричинена сусідніми структурами, може збільшувати навантаження на 15–25%, що ускладнює прогнозування. Ці ефекти недостатньо враховуються в нормативних розрахунках, що знижує їхню точність у реальних умовах.

Аналіз сучасної наукової літератури в галузі вітрових навантажень на баштові крани та систем безпеки виявляє проблему недостатньої точності

локального прогнозування навантажень, що зумовлено обмеженим урахуванням мікрометеологічних умов. Більшість чисельних моделей, описаних у роботах [95, 100], базуються на усереднених значеннях швидкості та напрямку вітру, які не відображають локальної турбулентності, спричиненої щільною забудовою чи складним рельєфом. Наприклад, дослідження [95] показує, що турбулентні потоки, викликані висотними будівлями, можуть збільшувати навантаження до 20%, але універсальних моделей для прогнозування таких ефектів не запропоновано. Це знижує ефективність оцінки ризиків і підвищує ймовірність аварій, особливо в умовах міських будівельних майданчиків, де локальні аеродинамічні особливості є критичними. Відсутність точних методів локального прогнозування підкреслює актуальність розробки інтелектуальних систем, які використовують нейронні мережі для аналізу метеоданих у реальному часі.

Безпека оператора кранів у екстремальних вітрових умовах залишається недостатньо дослідженою. У роботах [91, 92, 93] підкреслюється, що відсутність чітких протоколів евакуації оператора під час штормових поривів створює пряму загрозу життю. Наприклад, аварія [92] призвела до загибелі двох осіб через перекидання крана, а в [93] оператор зазнав смертельних травм через падіння крана на контейнер. Ці інциденти вказують на необхідність розробки автоматизованих систем, які не лише прогнозують небезпечні умови, але й забезпечують своєчасне попередження та безпечну евакуацію.

1.5. Огляд наукових досліджень у галузі розпізнавання втоми операторів обладнання та машин

Безпека експлуатації баштових кранів є критично важливою в будівельній галузі, де людський фактор становить значну частку аварій [113, 114, 115]. Втома, сонливість і зниження рівня пильності операторів є ключовими причинами помилок, що можуть призвести до катастрофічних наслідків, враховуючи роботу на значній висоті та складність умов будівельного майданчика. Дослідження в галузі розпізнавання фізіологічного стану операторів, зокрема втоми, активно розвиваються, спираючись на передові технології машинного зору, обробки фізіологічних сигналів і штучного інтелекту.

Дослідження підтверджують, що втома операторів є значним фактором ризику в будівельній галузі, зокрема при роботі з баштовими кранами. Наприклад, автори [116] у своїй роботі підкреслюють, що втома та зниження концентрації уваги операторів сприяють значній кількості аварій у будівництві. Аналогічно, у дослідженні безпеки баштових кранів [117] у Гонконгу виявили, що втома та психоемоційне напруження операторів є ключовими причинами інцидентів. Інші [118] встановили, що втома підвищує ризик нещасних випадків на виробництві, що підкреслює необхідність моніторингу фізіологічного стану працівників.

Дослідження [119, 116, 120] акцентують увагу на проблемі втоми операторів баштових кранів у контексті складних умов будівництва, таких як тривалі зміни, монотонність роботи та нічні зміни. Вони пропонують використовувати гібридні глибокі нейронні мережі для моніторингу та попередження втоми, що демонструє високу точність у виявленні ознак зниження працездатності. Ці роботи підкреслюють важливість технологічних рішень для підвищення безпеки, що безпосередньо пов’язано з тематикою дисертації.

Поведінкові методи виявлення втоми базуються на аналізі дій оператора, таких як рухи керма, відхилення траєкторії чи частота коригувальних дій. Наприклад, дослідники [121] і науковці [122] досліджували поведінку водіїв через аналіз рухів керма, виявивши, що нестабільні рухи є індикатором втоми. Автори [123] показали, що відхилення автомобіля від смуги руху можуть бути адаптовані для операторів кранів, що працюють у динамічних умовах будівельного майданчика, де такі показники, як рухи важелів або зміна положення крана, можуть свідчити про зниження пильності.

Сучасні підходи до розпізнавання втоми активно використовують глибоке навчання. Дослідники [124] заклали основи для використання згорткових нейронних мереж у задачах комп'ютерного зору, що стало основою для багатьох систем розпізнавання втоми. Автори [125] і науковці [126] підкреслюють, що глибоке навчання дозволяє обробляти великі обсяги даних і адаптуватися до складних умов, таких як мінливе освітлення чи різні пози оператора. Дослідники [120] показали, що гібридні моделі, які комбінують CNN і LSTM, є особливо ефективними для аналізу динамічних ознак втоми, таких як зміна частоти моргання чи позіхання. Дослідники [127] розробили базову модель для раннього виявлення сонливості, використовуючи датасет із реалістичними умовами, що підкреслює важливість адаптації алгоритмів до змінного освітлення та різних положень голови.

Більшість досліджень, таких як [127-133], зосереджені на розпізнаванні втоми водіїв транспортних засобів, де основний акцент робиться на поведінкових ознаках (рухи керма, відхилення від смуги) або фізіологічних маркерах (стан очей, позіхання). Проте умови роботи операторів баштових кранів суттєво відрізняються: висока відповідальність, обмежена оглядовість, робота на значній висоті, тривалі монотонні зміни та вплив вібрації чи шуму. Автори [119, 116, 120] досліджували втому кранівників, але їхні роботи обмежуються специфічними сценаріями, такими як збірка модульних конструкцій, і не охоплюють повний спектр умов експлуатації кранів.

Відсутність спеціалізованих датасетів і алгоритмів, адаптованих до цих умов, ускладнює розробку ефективних систем моніторингу.

Дослідники [127] підкреслюють важливість адаптації алгоритмів до реалістичних умов, але таких досліджень для операторів кранів бракує. Наприклад, у кабінах кранів часто спостерігаються перепади освітлення (нічні зміни, тіні від конструкцій), що знижує точність розпізнавання ознак втоми. Відсутність систем, які б ефективно працювали в таких умовах, є значною прогалиною.

Хоча автори [119, 116, 120] пропонують використовувати гібридні нейронні мережі для виявлення втоми, їхні системи переважно обмежуються сигналізацією (візуальні чи звукові попередження). Інтеграція з програмованими логічними контролерами (ПЛК) для автоматичної зупинки крана в разі виявлення небезпечного стану оператора досліджена недостатньо. Це критично важливо для баштових кранів, де навіть короткочасна втрата уваги може призвести до катастрофічних наслідків. Відсутність комплексних рішень, які поєднують моніторинг стану оператора з автоматизованим керуванням, обмежує практичну цінність таких систем.

Аналіз прогалин у дослідженнях розпізнавання втоми операторів обладнання показує, що сучасні технології, попри значний прогрес, не повною мірою відповідають потребам будівельної галузі, зокрема експлуатації баштових кранів. Недостатня адаптація до специфіки роботи кранівників, обмеження в обробці складних умов, слабка інтеграція з системами керування, обмежене використання мультимодальних підходів, недостатня увага до ергономіки та психологічних факторів, а також брак реалістичних випробувань і стандартизації є ключовими бар’єрами.

1.4. Формулювання гіпотези, мети та задач дослідження

Аналіз сучасних наукових досліджень у галузі предиктивного обслуговування, вітрових навантажень і моніторингу стану операторів свідчить про наявність значного потенціалу для підвищення безпеки експлуатації баштових кранів через впровадження інтелектуальних технологій. У той же час виявлено низку обмежень і прогалин, які не дозволяють існуючим рішенням ефективно працювати в реальних умовах будівельного майданчика.

По-перше, хоча предиктивне обслуговування (PdM) довело свою ефективність у промисловості та енергетиці, його застосування до механізмів баштових кранів досі залишається обмеженим. Причиною є складність збору якісних даних, відсутність адаптованих моделей для поворотних і підйомних редукторів, а також недостатня інтеграція з кранами, що вже експлуатуються. Існує потреба у створенні спеціалізованої системи PdM, яка враховує характерні дефекти вузлів, зокрема втомне руйнування зубців шестерень, і забезпечує прогнозування на основі мультисенсорних даних у реальному часі.

По-друге, існуючі системи безпеки не враховують локальні метеорологічні умови та не забезпечують точного прогнозування вітрових навантажень. Більшість моделей базуються на усереднених даних, що не дозволяє вчасно попередити про небезпечні пориви вітру в міському середовищі або за наявності високої забудови. Таким чином, актуальною є розробка підсистеми прогнозування вітрових навантажень із використанням штучних нейронних мереж та аналізу локальних метеоданих.

По-третє, наявні підходи до моніторингу психофізіологічного стану оператора зазвичай не враховують специфіку кабіни баштового крану – обмежене освітлення, тривалу ізольованість, монотонну діяльність. І хоча технології глибокого навчання і комп’ютерного зору демонструють високий потенціал, більшість досліджень зосереджені на автомобільному транспорті. Це вимагає створення підсистеми моніторингу, адаптованої саме до умов

експлуатації баштового крану, з можливістю інтеграції в загальну систему безпеки.

Окремо варто зазначити, що всі ці підходи – предиктивне обслуговування, розпізнавання втоми та прогноз вітрових навантажень – активно розвиваються в межах концепції Індустрії 4.0 та базуються на використанні технологій штучного інтелекту. Вони довели свою ефективність у суміжних галузях, але досі не інтегровані в єдину багатокомпонентну систему моніторингу технічного стану та ризиків для баштових кранів.

Отже, існує очевидний науково-технічний розрив між поточними можливостями ШІ-систем та фактичними практиками експлуатації баштових кранів. Це створює підстави для формування наукової гіпотези, що передбачає інтеграцію інтелектуальних підсистем у єдину інтегральну систему безпеки.

Гіпотеза дослідження полягає у припущенні, що підвищення безпеки експлуатації баштових кранів можна досягти шляхом впровадження інтелектуальної системи моніторингу, прогнозування та сигналізації на основі штучного інтелекту, яка складається з підсистем предиктивного обслуговування, розпізнавання сонливості та втрати уваги оператора в режимі реального часу, прогнозування вітрових навантажень з урахуванням локальних метеорологічних умов та динамічних характеристик крана з використанням технологій глибокого навчання нейронної мережі та машинного зору.

Мета дослідження – підвищення безпеки експлуатації баштового крану шляхом застосування штучного інтелекту в системах керування для проактивного запобігання аварійним ситуаціям, зумовленим конструктивними дефектами, людським фактором та впливом зовнішніх чинників.

Для досягнення мети необхідно **виконати наступні задачі**:

1. Провести системний аналіз науково-технічної літератури, стандартів безпеки, статистичних даних для виявлення та класифікації ключових факторів ризику при експлуатації баштових кранів, сучасного стану застосування штучного інтелекту для підвищення рівня безпеки кранів.

2. Дослідити параметри технічного стану механізмів крану та розробити підсистему предиктивного обслуговування критичних вузлів на основі глибокого навчання нейронної мережі.

3. Розробити математичну модель та програмно реалізувати підсистему моніторингу психофізіологічного стану оператора на основі методів машинного зору та нейронних мереж для розпізнавання втоми та сонливості в режимі реального часу.

4. Розробити математичну модель прогнозування небезпечних вітрових навантажень на основі глибокого навчання нейронної мережі та розробити алгоритми роботи підсистеми автоматичного превентивного керування стійкістю крану.

5. Розробити архітектуру інтегрованої інтелектуальної системи безпеки крану (ІІСБ) шляхом поєднання підсистем предиктивного обслуговування, розпізнавання сонливості та втрати уваги оператора в режимі реального часу, прогнозування вітрових навантажень.

6. Провести техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованої ІІСБ на прикладі баштового крану КБ-403.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз засвідчив, що попри зростання кількості та важливості баштових кранів у сучасному будівництві, рівень їх аварійності залишається стабільно високим. Встановлено, що причини аварій мають комплексну природу і класифікуються на три основні групи: конструктивні відмови та дефекти, людський фактор (помилки операторів) та вплив зовнішніх чинників, серед яких домінує динамічне вітрове навантаження. Визначено, що нормативна база України активно гармонізується з європейськими стандартами

(серія ДСТУ EN 13001), що створює підґрунтя для впровадження більш досконалих технологій безпеки.

2. Досліджено еволюцію систем безпеки від примітивних механічних пристроїв до сучасних комплексів на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК). Виявлено, що навіть сучасні системи, попри їхню високу точність та наявність функцій координатного захисту, здебільшого функціонують у реактивному режимі – тобто реагують на подію, що вже сталася (перевищення навантаження, вихід за межі зони). Їм бракує проактивного підходу, який би дозволяв прогнозувати та запобігати небезпечним ситуаціям до їх виникнення.

3. Системний огляд наукових досліджень виявив значний потенціал технологій штучного інтелекту (ШІ) для вирішення цієї проблеми. Встановлено, що методи глибокого навчання (DL) ефективно застосовуються для: 1) предиктивного обслуговування (PdM) шляхом аналізу вібраційних сигналів для раннього виявлення дефектів у критичних вузлах; 2) розпізнавання втоми та сонливості операторів у реальному часі за допомогою машинного зору з точністю понад 90%; 3) короткострокового прогнозування локальних вітрових умов на основі аналізу часових рядів метеоданих.

3. Виявлено ключовий науково-технічний розрив: попри доведену ефективність, ці інтелектуальні підходи розвиваються ізольовано і досі не були об'єднані в єдину інтегральну систему безпеки для баштових кранів. На основі цього сформульовано головну мету дослідження – підвищення безпеки експлуатації баштового крана шляхом розробки та інтеграції трьох інтелектуальних підсистем (предиктивного обслуговування, моніторингу стану оператора та прогнозування вітрових навантажень) у єдиний комплекс на основі технологій ШІ для проактивного запобігання аваріям.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ КРАНУ

2.1 Дослідження діагностичних параметрів технічного стану механізмів крану

Аналіз наукових праць показує, що хоча існують численні методи для діагностики окремих вузлів машин, бракує комплексних, інтегрованих систем, розроблених спеціально для умов експлуатації баштових кранів. При цьому, в суміжних галузях, таких як залізничний транспорт, активно розвиваються інноваційні технології моніторингу технічного стану критичних вузлів, наприклад, буксових вузлів вагонів, за допомогою вбудованих систем контролю [134], що доводить перспективність даного напрямку. Більшість існуючих систем вимагають значних обчислювальних ресурсів або є занадто дорогими для широкого впровадження на застарілому парку кранів. Відсутня єдина методологія, яка б пов'язувала фізичні процеси зношування конкретних механізмів крану (механізму повороту) з діагностичними параметрами (вібрація, температура) та використовувала б моделі глибокого навчання для їх предиктивного аналізу в режимі реального часу.

Таким чином, задачею даного розділу є розробка підсистеми предиктивного обслуговування критичних вузлів баштового крана (на прикладі механізму повороту) на основі глибокого навчання нейронної мережі.

Об’єктом дослідження в даній роботі є механізм повороту баштового крана серії КБ. Зокрема, розглядається типова конструкція механізму моделі У3515.42С.1, що встановлюється на широкому спектрі кранів, таких як КБ-100, КБ-160, КБ-403, КБ-405, КБ-408 та інших. Призначенням даного вузла є забезпечення обертання поворотної частини крана (башти зі стрілою) відносно

неповоротної рами. Він монтується на спеціальній платформі у верхній частині башти (рис 2.1.).

Динамічні характеристики роботи подібних механізмів та підходи до їх математичного моделювання, зокрема шляхом синтезу багатомасових моделей, були глибоко досліджені у працях [135-136].Підходи до проведення чисельних експериментів з динаміки роботи кранів з використанням методів скінченних елементів та визначення динамічних сил у металоконструкціях на основі багатомасових моделей детально описані в роботах [137-138].

Рис. 2.1. – Схема розташування механізму повороту

Конструкція механізму повороту (рис. 2.2.) включає три основні компоненти: вертикальний триступеневий редуктор (1), електродвигун фланцевого виконання (2) та спеціальне електромагнітне колодкове гальмо (3).

Дослідження напружено-деформованого стану та міцності елементів гальмівних систем, зокрема гальмівних колодок, під впливом нерівномірного

навантаження є важливою задачею для забезпечення загальної безпеки, як показано в роботі [139].

Подачу мастила до деталей редуктора реалізовано за допомогою масляного насоса, особливістю якого є збереження постійного напрямку потоку рідини при реверсивному обертанні вала. Візуальний контроль за функціонуванням насоса забезпечується через оглядове скло або штуцер маслопроводу, які змонтовані на кришці редуктора.

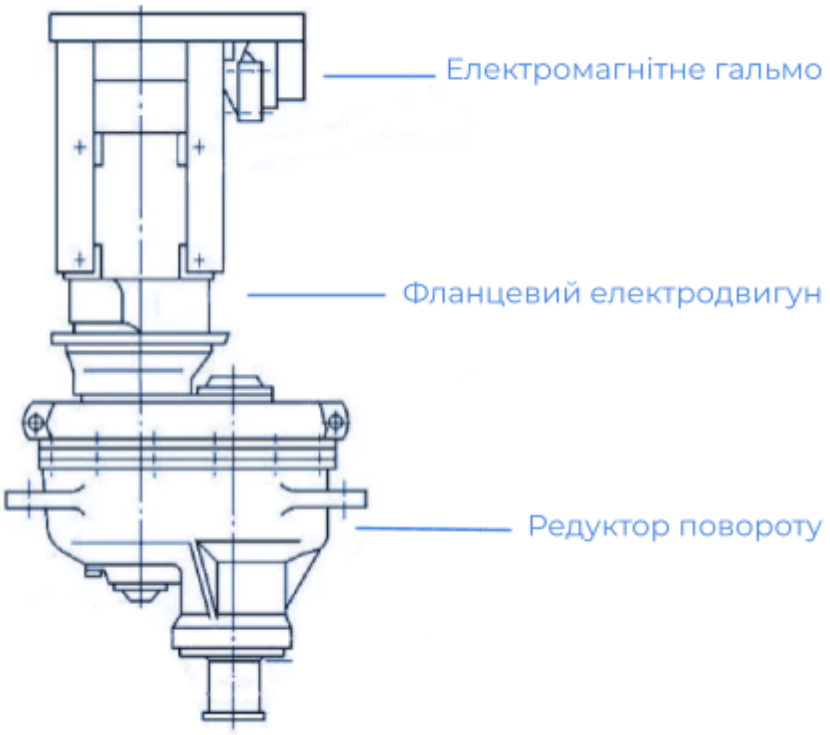


Рис. 2.2. – Схема механізму повороту баштового крану

Цей вузол зазнає значних динамічних навантажень під час пусків, гальмувань та реверсів, що безпосередньо впливає на його довговічність, частоту ремонтів та є однією з головних причин утворення втомних пошкоджень та прискореного зношування, що безпосередньо впливає на його довговічність, частоту ремонтів та є однією з головних причин утворення втомних пошкоджень та прискореного зношування. Методикам визначення таких динамічних навантажень, що виникають у механізмах, присвячено низку робіт [140-141], що підкреслює важливість врахування динаміки для оцінки

надійності. Важливість контролю за станом поверхонь тертя та мастильних матеріалів для підвищення зносостійкості та ресурсу ключових вузлів, таких як підшипники ковзання, підтверджується в роботі [142].

Зважаючи на конструктивні особливості механізму повороту та характер його навантажень, ключовим завданням при розробці системи предиктивного обслуговування є глибоке розуміння процесів зношування його елементів. Це дозволяє визначити найбільш інформативні діагностичні параметри та побудувати моделі, здатні прогнозувати технічний стан вузла в реальному часі.

Зношування — це процес поступової втрати матеріалу з поверхні твердого тіла або накопичення залишкової деформації внаслідок тертя. В умовах експлуатації механізму повороту баштового крана, що піддається циклічним динамічним навантаженням, зношування проявляється як в абразивному, так і в контактно-втомному режимах. Найбільше це стосується елементів редуктора, гальмівної системи та підшипників [143].

Кількісними показниками зношування є – знос, швидкість, інтенсивність зношування, та умовно зносостійкість. Розглянемо ці показники.

Результатом (наслідком) зношування є *знос* твердого тіла U, який вимірюється в одиницях довжини – лінійний знос U_h [м], об'єму – об'ємний знос U_V [м^3] та маси – ваговий знос U_m [кг].

Швидкість зношування V_U – відношення величини зносу до часу, протягом якого він відбувся [м/с], [м^3/с] або [кг/с].

$$V_U = \frac{\Delta U}{\Delta t}; \quad \text{якщо } t_0 = 0 \text{ і } U_0 = 0, \text{ тоді } \quad V_U = \frac{U}{t}. \qquad (2.1)$$

Інтенсивність зношування I – питома характеристика зношування, яка по аналогії зі зносом може бути лінійною I_h, ваговою I_m або енергетичною I_W. Вона визначається як відношення величини зносу до шляху тертя L або роботи сили тертя W_T.

Лінійна інтенсивність зношування є безрозмірною величиною та визначається як кількість лінійного зносу (висота зношеного шару) на одиницю шляху тертя:

$$I_h = \frac{U_h}{L}, \left[\frac{м \text{ зносу}}{м \text{ шляху}}\right]; \quad \text{або} \quad I_h = \frac{U_V}{A_a L}, \left[\frac{м^3 \text{ зносу}}{м^2 \text{ поверхні} \times м \text{ шляху}}\right] \tag{2.2}$$

де A_a – ***номінальна*** площа контакту;

Енергетична інтенсивність зношування є розмірною величиною, вона уявляє собою об'єм зношеного матеріалу, приведений до одиниці роботи сили тертя:

$$I_W = \frac{U_V}{W_T} = \frac{U_V}{F_T L}, \left[\frac{м^3 \text{ зносу}}{Дж \text{ роботи}}\right] \tag{2.3}$$

Для пристроїв, що характеризуються великою роботою сили тертя (гальмівні пристрої, муфти зчеплення та інш.) доцільно користуватись енергетичною інтенсивністю зношування. Для вузлів тертя, в умову роботи яких покладений мінімум сил тертя та зношування, доцільною є лінійна або інтенсивність зношування.

Зносостійкість Z не є прямою кількісною характеристикою зношування, вона є властивістю матеріалу твердого тіла чинити опір зношуванню. Однак, зносостійкість умовно відносять до кількісних характеристик зношування, оскільки вона визначається як величина обернена інтенсивності або швидкості зношування:

$$Z_I = \frac{1}{I} \quad \text{або} \quad Z_{V_U} = \frac{1}{V_U} \quad . \tag{2.4}$$

З метою глибшого розуміння процесів зношування, що мають місце у механізмах баштового крана в умовах реальної експлуатації, доцільно розглянути їх у контексті загального життєвого циклу машини. Життєвий цикл машини (ЖЦМ) охоплює весь період її існування — від стадії проєктування до остаточної утилізації (рис. 2.3.). Саме на етапі експлуатації, що є найдовшим та найбільш насиченим з точки зору технічного навантаження, формуються основні закономірності зношування деталей, які безпосередньо впливають на надійність та довговічність механізмів крана.

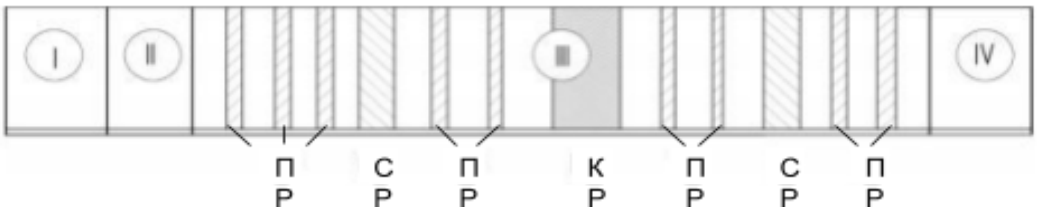


Рис. 2.3. – Схема життєвого циклу машини:
I – конструювання; II – виробництво; III – експлуатація; IV – утилізація
ПР, СР, КР – відповідно поточний, середній та капітальний ремонти

Якщо розглянути експлуатаційну (найбільш тривалу) стадію життєвого циклу машини, загальний розвиток зношування та пов’язаних з ним показників надійності підпорядковується закономірностям, встановленим В.Ф. Лоренцем, як показано на рис. 2.4.

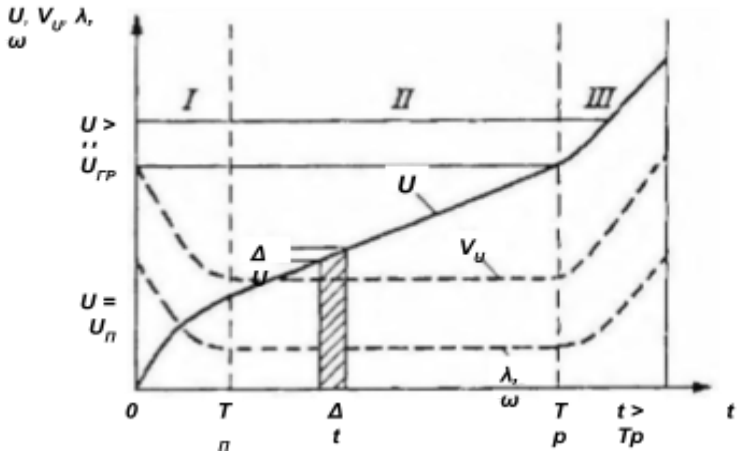


Рис. 2.4. – Загальна закономірність зміни зносу ***U***, швидкості зношування $\boldsymbol{V_U}$ та інтенсивності відмов $\boldsymbol{\lambda}$ в машинах: I – стадія припрацювання; II – стадія сталого зношування (нормальна робота); III – стадія катастрофічного зношування (аварійна робота)

На рис. 2.4 $U_{ГР}$ – граничний знос, котрому на шкалі часу відповідає ресурс машини Тр. Знос $U_П$ – загальний знос припрацювання, яке відбулося за час $T_П$. Згідно накопиченого досвіду, час припрацювання $T_П$ набагато менший за час нормальної роботи в діапазоні ($T_П$; Тр), його значення не перевищують 5 % від Тр.

Як видно з рис. 2.4, головною умовою забезпечення заданого ресурсу та мінімальної прогнозованої інтенсивності відмов є сталість (незмінність у часі) швидкості зношування. Для такого випадку, для стадії нормальної роботи, зв'язок між швидкістю зношування та інтенсивністю відмов можна записати у вигляді

$$\lambda = k_\lambda V_U = k_\lambda \frac{\Delta U}{\Delta t}, \qquad (2.5)$$

де k_λ – розмірний коефіцієнт, розмірність якого залежить від типу зносу. Наприклад, для лінійного зносу, розмірність k_λ складе [$м^{-1}$], для вагового – [$кг^{-1}$].

З точки зору надійності найбільш цікавим та актуальним при експлуатації машин є встановлення впливу закономірностей зношування на показники довговічності, а саме – на ресурс. Для аналогічного випадку, коли знос деталей при нормальній роботі машини зростає лінійно, при цьому V_U = const, тоді запишемо наступні залежності для процесу зношування:

$$V_U = \frac{\Delta U}{\Delta t}; \tag{2.6}$$

$$U(t) = U_П + V_U t. \tag{2.7}$$

Якщо в залежність (14) замість *U(t)* підставити $U_{ГР}$, тоді на місці *t* буде значення *Тр*, а формула для його визначення буде мати вигляд:

$$Тр = T_П + \frac{U_{ГР} - U_П}{V_U}. \tag{2.8}$$

Тобто, для визначення ресурсу машини або вузла необхідно знати час та знос припрацювання, граничний знос вузла і швидкість його зношування на стадії нормальної роботи, згідно рис. 1.

На практиці, для спрощення розрахунків часто нехтують значеннями $T_П$ та $U_П$, тоді формула для визначення ресурсу буде мати вигляд

$$Тр = \frac{U_{ГР}}{V_U}, \tag{2.9}$$

а головною задачею залишається пошук значення швидкості зношування, крім того є необхідність адекватного визначення граничного зносу.

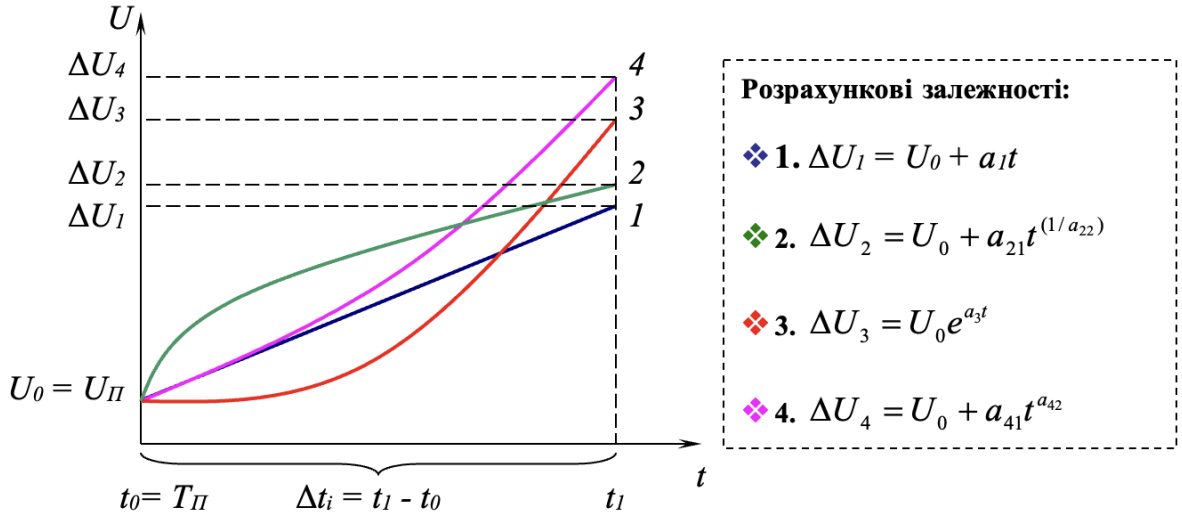


Рис. 2.5. – Реальні закономірності зношування на стадії нормальної роботи

Досвід експлуатації парків машин різного призначення показав, що дійсні закономірності зношування на стадії нормальної роботи мають інший характер, порівняно з кривими на рис. 2.4, наприклад, знос ΔU_i за малий проміжок часу $\Delta t_i < \Delta t$ на стадії II в реальних умовах, без застосування зовнішніх впливів на зношування, зростає як лінійно, так й нелінійно, коли $V_U \neq const$ або $V_U = f(t)$, при чому прирощення зносу має імовірнісний характер. На рис. 2.5. наведені приклади таких закономірностей [144].

Імовірність розвитку зношування за кожною з наведених на рис. 2 закономірностей залежить від конструкції та умов роботи агрегату. Однак найбільш типовою для деталей баштових кранів є ступенева залежність 4, яку можна записати так:

$$U(t) = U_П + bt^{\alpha}, \tag{2.10}$$

де α – безрозмірний показник ступеня при t;

b – розмірний коефіцієнт [*знос / час*], який є швидкістю зношування, але лише у випадку, якщо $\alpha = 1$.

У цих же роботах був встановлений зв'язок між ресурсом і періодичністю виконання ТО, що є дуже важливим, оскільки саме ТО є операціями, спрямованими на підтримку надійності баштового крану (заміна оливи, фільтрів, регулювання). Ця залежність за умови, що $U_П = 0$, має такий вигляд [7]:

$$Tp = \frac{U_{\text{ГР}}}{\Delta U_i} \cdot t_{\text{ТО}} = \frac{U_{ГР}}{b t_{\text{ТО}}^{\alpha-1}} \quad . \tag{2.11}$$

де $U_{ГР}$ – граничний знос;

$t_{ТО}$ – періодичність виконання ТО.

Висновки із залежності (20). Чим менша періодичність ТО, тобто чим частіше виконується ТО, тим більше ресурс машини.

Дійсні закономірності зношування елементів приводів баштових кранів мають імовірнісний характер, який залежить від багатьох експлуатаційних факторів та системи організації та оптимізації ТО. Таким чином, для розробки підсистеми моніторингу технічного стану та предиктивного обслуговування механізмів крану постає задача встановлення закономірностей зміни вказаних параметрів у часі напрацювання механізму.

Розвиток зношування у механізмах повороту баштових кранів відбувається під впливом характерних експлуатаційних навантажень, що реалізуються в окремих режимах роботи приводу. Саме ці режими є критичними з точки зору діагностики та безпосередньо впливають на інтенсивність деградації основних елементів. До таких режимів належать:

1. Пуск (розгін) — перехідний процес, який супроводжується піковими динамічними навантаженнями на кінематичний ланцюг і викликає інтенсивне теплове навантаження на обмотки електродвигуна.

2. Гальмування — процес розсіювання кінетичної енергії, особливо небезпечний у разі форсованого гальмування, що створює ударні навантаження на редуктор та значний знос фрикційних накладок гальма.

3. Реверс (режим противмикання) — найбільш руйнівний режим, за якого двигун вмикається в напрямку, протилежному поточному обертанню. Це призводить до надмірних ударних навантажень, які часто перевищують розрахункові значення та можуть спричинити катастрофічні відмови.

Проведений аналіз дозволяє ідентифікувати основні механізми деградації, які необхідно відстежувати системі діагностики: прогресуюче втомне викришування робочих поверхонь зубів, виникнення втомних тріщин біля основи зуба, руйнування тіл та доріжок кочення підшипників, термічна деградація ізоляції обмоток двигуна та інтенсивний абразивний знос фрикційних накладок гальма.

Кожен із цих деградаційних процесів є джерелом специфічних діагностичних сигналів. Наприклад, виникнення дефектів у зубчастих зачепленнях та підшипниках генерує характерні зміни у вібраційному спектрі механізму. Термічна деградація двигуна та інтенсивний знос гальма безпосередньо корелюють з підвищенням температури відповідних вузлів. Окрім прямого моніторингу вібрації та температури, важливим напрямком підвищення надійності є вдосконалення систем змащування.

Як показують дослідження [145], температура моторної оливи в редукторі, також напряму впливає на експлуатаційні властивості та довговічність.

Отже, саме параметри вібрації та температури — є найбільш інформативними для побудови предиктивної моделі технічного стану на основі глибокого навчання, що і є завданням подальшого дослідження.

З метою підтвердження інформативності параметрів температури та вібрації для діагностики технічного стану механізму повороту, було проведено експериментальні випробування на будівельному майданчику в умовах

наближених до робочих на трьох механізмах баштового крана КБ-403 (рис. 2.6), що знаходяться у різних технічних станах:

– механізм у нормальному стані (базовий рівень без зношування);

– механізм зі зношеними фрикційними накладками гальма;

– механізм із дефектами підшипників редуктора.

Рис. 2.6. Механізм повороту баштового крана КБ-403

Гіпотеза експеременту полягає в тому, що кожен тип несправності механізму повороту (зношені гальма або підшипники редуктора) генерує унікальну комбінацію вібраційних та температурних сигнатур, які можна чітко розрізнити за допомогою вимірювань у різних режимах роботи. Зокрема:

- Зношені гальма проявляються у вигляді аномальних вібраційних сплесків та локального перегріву гальмівного вузла під час гальмування.
- Зношені підшипники редуктора спричиняють підвищений фоновий рівень вібрації протягом усього режиму обертання та перегрів корпусу редуктора.
- Еталонний стан характеризується низьким рівнем вібрації та збалансованим нагріванням обох вузлів.

Контроль параметрів здійснювався за допомогою двох триосьових акселерометрів Analog Devices ADXL345, змонтованих на корпусі редуктора та корпусі гальма, і термодатчиків NTC KG-A212, встановлених поряд (рис. 2.8).

Випробування проводились у трьох характерних режимах роботи: пуск (розгін), гальмування, реверс (режим противмикання).

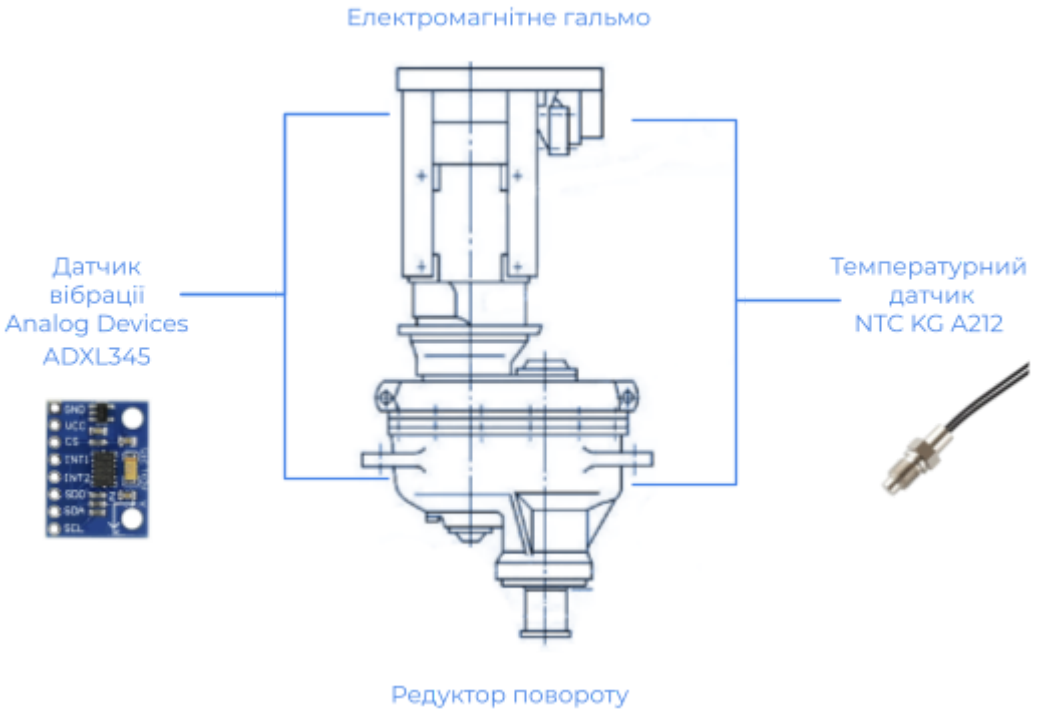


Рис. 2.7. – Схема розташування датчиків

Аналіз вібраційних сигналів (рис. 2.8) виявив чіткі патерни, що дозволяють ідентифікувати тип несправності за її проявом у часі. Так, для еталонного стану характерний низький фоновий рівень вібрації з очікуваними піками на перехідних процесах. Натомість, дефект гальм однозначно ідентифікується за аномальним сплеском вібрації виключно в режимі «Гальмування». А знос підшипників, у свою чергу, проявляється у вигляді стабільно підвищеного рівня вібрації протягом усього періоду роботи двигуна в режимі «Поворот», що надійно відрізняє цей стан від інших.

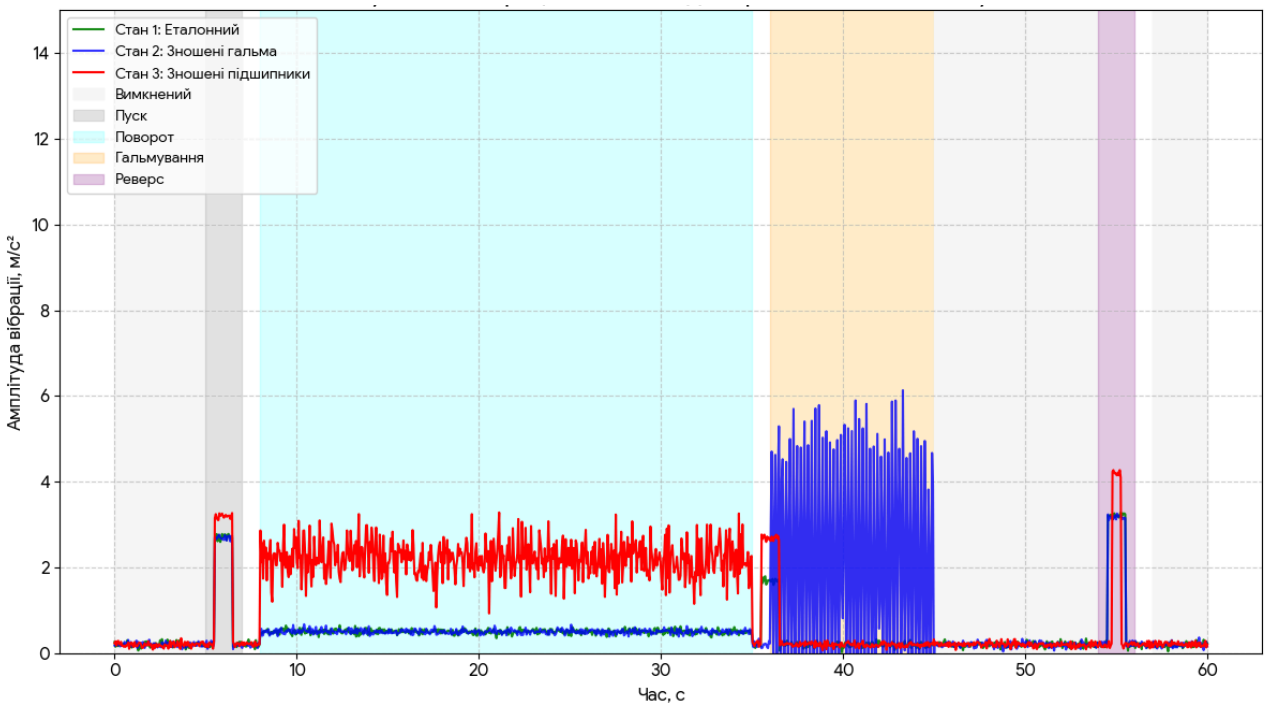


Рис. 2.8. Зміна вібраційних характеристик механізму повороту в різних технічних станах під час режимів: пуск, гальмування, реверс

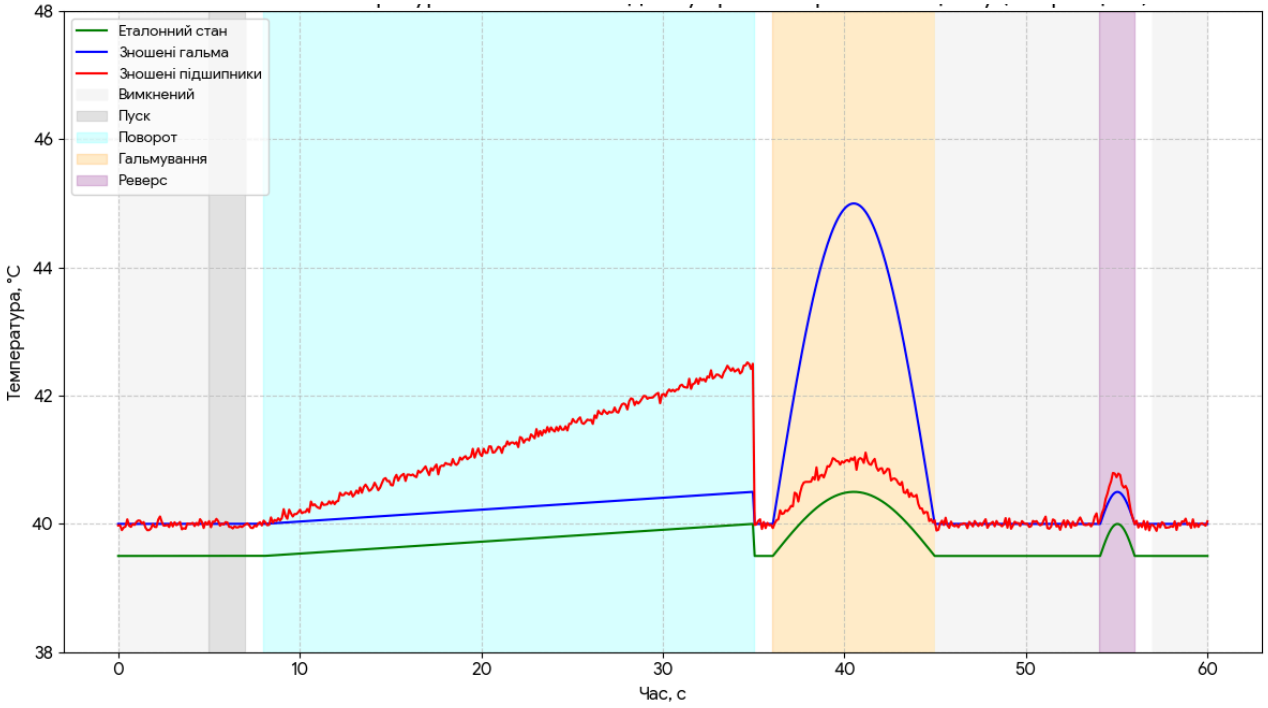


Рис. 2.9. Зміна температури механізму повороту в різних технічних станах під час тих самих режимів

Температурний аналіз (рис. 2.9) підтверджує та доповнює вібраційну діагностику, вказуючи на локалізацію джерела проблеми. Знос гальм призводить до різкого та значного температурного піку саме в момент гальмування, тоді як знос підшипників викликає поступове, але невпинне зростання температури редуктора протягом усього режиму «Поворот». Отже, комплексний розгляд обох параметрів доводить, що кожен дефект має унікальну комбіновану сигнатуру: дефект гальм проявляється як короткочасна вібраційно-температурна аномалія в режимі гальмування, а дефект редуктора — як тривала аномалія протягом усього циклу обертання. Це створює надійну основу для їх автоматичної класифікації.

На основі змодельованих експериментальних даних побудовано залежності між технічним станом механізму повороту баштового крану та середніми значеннями температури і вібрації. Таблиця демонструє поступове зростання обох параметрів зі зниженням технічного стану — від нового до передаварійного.

Ці залежності можна використовувати як основу для формалізації логіки роботи нейромережевої діагностичної системи або для встановлення порогових значень у системах моніторингу. Якщо потрібно — можу допомогти з розробкою математичної моделі або формуванням діагностичних правил.

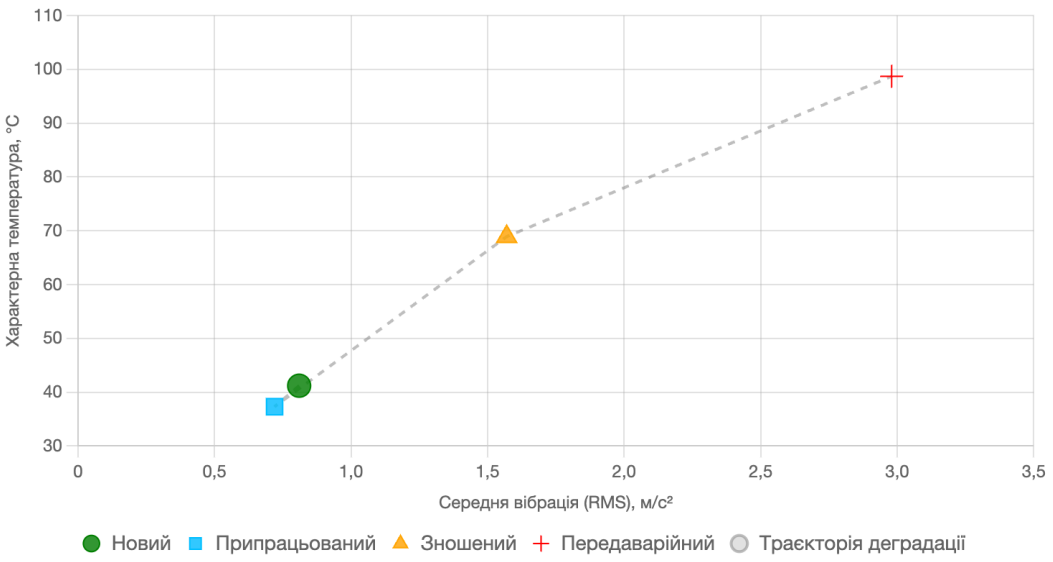


Рис. 2.10. Залежність усереднених значень

По отриманих даних комплексного аналізу можна побудувати систему діагностики в реальному часі для розпізнавання різних технічних станів механізму, включно з нормальною роботою та типовими несправностями (наприклад, знос підшипників редуктора, дефекти зубчастих передач, несправності гальмівної системи тощо).

2.2 Створення підсистеми моніторингу технічного стану та предиктивного обслуговування механізмів крану

Для збору даних була використана експериментальна установка з датчиками вібрації Analog Devices ADXL345 (Рис 2.11), що вироблені за технологією мікроелектромеханічної системи (англ. MEMS), розміщеними на корпусі електродвигуна та редуктора. Збір даних здійснюється по двох каналах із частотою дискретизації 10544 Гц.

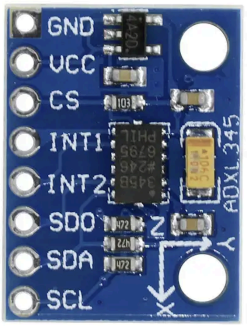


Рис. 2.11. Плата розробки з датчиком вібрації Analog Devices ADXL345

Ключовим викликом у цій роботі є надійна ідентифікація кожної окремої несправності в умовах обмеженого часу на обробку даних, що характерно для систем моніторингу в реальному часі.

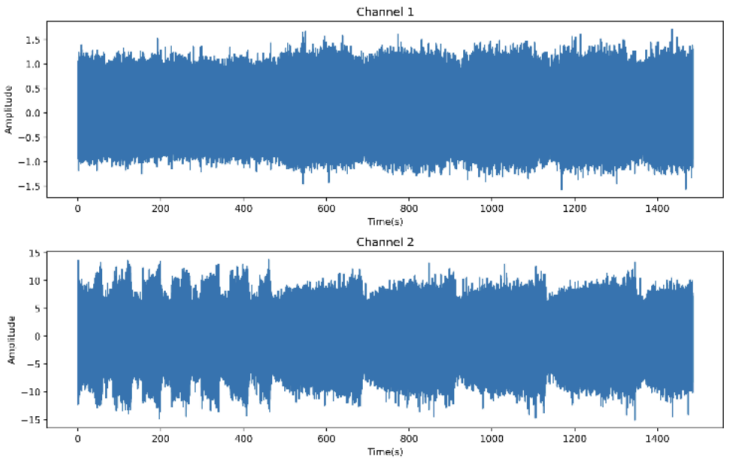


Рис. 2.12. Сигнали двох датчиків вібрації в нормальному режимі роботи

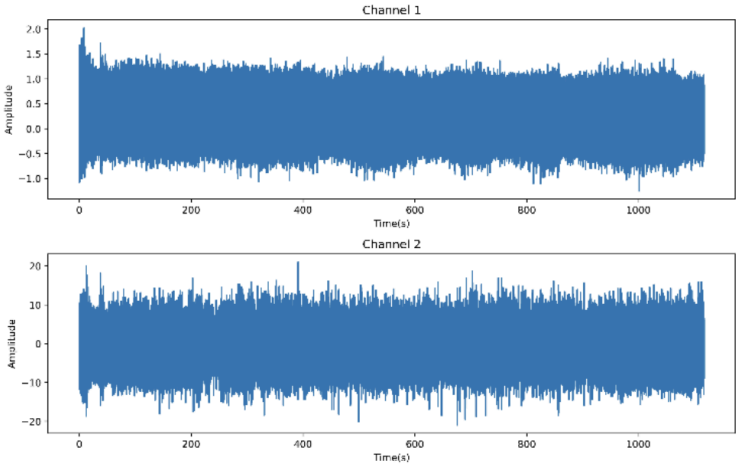


Рис. 2.13. Сигнали двох датчиків вібрації в незбалансованому режимі роботи.

Для обробки безперервних вібраційних сигналів, приклади яких для нормального та незбалансованого режимів роботи показані на рис. 2.12. та рис. 2.13 відповідно, застосовується алгоритм ковзного вікна (англ. sliding window algorithm).

Цей підхід дозволяє сегментувати дані з обох датчиків на окремі часові відрізки (вікна), які можуть частково перекриватися. У рамках даної роботи було також досліджено, як довжина цих вікон та ступінь їхнього перекриття впливають на якість діагностики в режимі реального часу.

Для кожного такого вікна обчислюється набір інформативних ознак. У результаті для кожної ознаки формується власний часовий ряд, де кожна точка відповідає одному проаналізованому вікну даних.

Процес обчислення ознак починається з попередньої обробки виміряних вібраційних сигналів, яка полягає у застосуванні фільтра низьких частот. Після фільтрації для кожного сигналу (позначеного як x_k, де k — номер відліку часу) розраховується розширений набір характеристик у часовій області.

Цей набір включає різноманітні метрики, зокрема:

- Основні статистичні показники: максимум та мінімум сигналу x(t), медіана, середнє значення, середнє абсолютне значення та дисперсія.
- Характеристики розмаху та форми розподілу: амплітудний розмах, міжквартильний та міждецильний діапазони, асиметрія (2.13), ексцес (2.14) та моменти вищих порядків (2.15).
- Енергетичні та інформаційні ознаки: загальна енергія, енергія центрованого сигналу (2.11), енергія похідної (2.12) та ентропія Шеннона (2.16).
- Інші специфічні метрики: швидкість сигналу (2.17), максимальне абсолютне значення та середнє абсолютне значення похідної сигналу.

Формули для розрахунку деяких із ключових часових ознак:

- енергія центрованого сигналу

$$E_c = \sum_{k=1}^{N} (x_k - \overline{x})^2 \tag{2.11}$$

- енергія похідної

$$E_d = \sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{dx_k}{dt}\right)^2 \tag{2.12}$$

- асиметрія

$$S = \frac{E-(x-\overline{x})^3}{Var^{3/2}} \tag{2.413}$$

- ексцес

$$K = \frac{E-(x-\bar{x})^4}{Var^2} \tag{2.14}$$

- моменти вищих порядків

$$m_i = \frac{E(x-\bar{x})^i}{Var^{i/2}} \tag{2.15}$$

- ентропія Шеннона

$$E_s(x) = -\sum_{k=1}^{N} x_k^2 \cdot log_2\left(x_k^2\right) \tag{2.16}$$

- швидкість сигналу

$$\tau = \frac{max\left(x_{k=1:N}\right)-min\left(x_{k=1:N}\right)}{\bar{x}} \tag{2.17}$$

Варто зазначити, що в даній роботі ознаки у частотній області, які можна було б отримати за допомогою Швидкого перетворення Фур'є, не використовувалися. Таке рішення зумовлене наявністю можливих нелінійностей у вібраційних сигналах, які цей метод аналізу може відобразити некоректно.

Усі розраховані ознаки систематизуються у вигляді таблиці, де рядки відповідають номерам експериментів (екземплярам), а стовпці — значенням цих ознак. Після розрахунку всі ознаки піддаються процедурі нормалізації.

Один із можливих методів — нормалізація, що описується наступною формулою:

$$O_{норм} = \frac{O - \overline{O}}{O \cdot \sigma^2} \quad (2.18)$$

У нашому дослідженні для нормалізації було використано підхід, наведений у формулі (2.19). Мета такого вибору полягала в тому, щоб урахувати інформацію про стандартне відхилення в кожен момент часу.

$$O_{норм} = \frac{O - O_{мін}}{O_{макс} - O_{мін}} \quad (2.19)$$

У рамках цієї роботи було створено інноваційну програмно-апаратну платформу, призначену для інтелектуального прогнозного обслуговування в режимі реального часу на основі технологій штучного інтелекту. Кінцевою метою таких систем є не лише діагностика, а й створення адаптивних систем керування. Питанням оптимізації керування механізмом повороту, зокрема із застосуванням принципу максимуму, присвячена робота [146].

Перехід від центральної до розподіленої топології з периферійними вузлами, розширить можливості обробки великих даних у реальному часі з пристроїв Інтернету речей, забезпечуючи низьку затримку та високу пропускну здатність, а також, надасть можливість розподіленого машинного навчання, дозволяючи периферійним пристроям вивчати локальні моделі машинного навчання. Апаратна частина установки складається з кількох ПК, двох або більше комплектів NVIDIA Jetson Nano Developers для обчислень на периферії, смартфона для відображення в реальному часі, див. рис. 2.17.

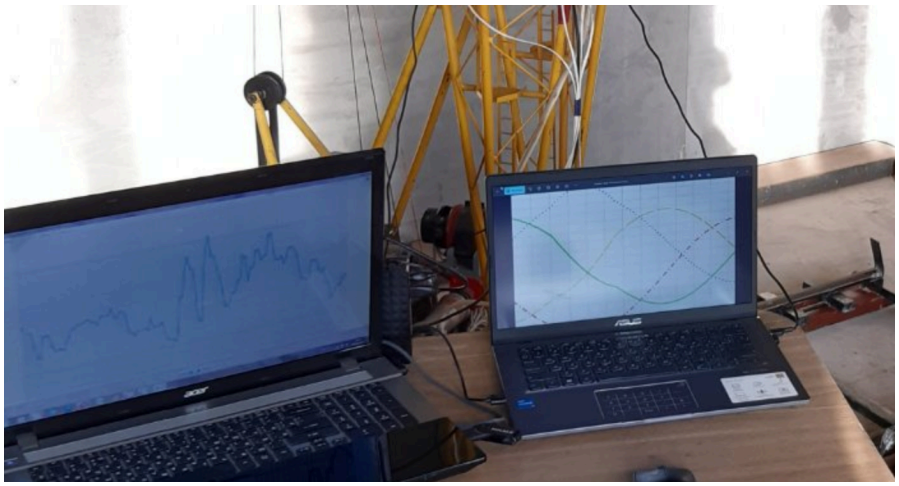


Рис. 2.14. Конфігурація, розроблена в рамках цього дослідження

Розроблена платформа була використана для тестування та оцінки інтелектуальної системи технічного обслуговування. Система здатна працювати з даними (часовими рядами), що надходять із двох джерел: безпосередньо від підключених периферійних датчиків вібрації або з баз даних, розміщених на пристрої в мережі. У даній роботі, наприклад, використовувалися дані з вимірювань, які зберігалися на ПК та передавалися в систему в реальному часі.

Для передачі інформації між компонентами та пристроями (включно з необробленими сигналами, відфільтрованими даними, ознаками, діагностичними повідомленнями та результатами) в мережевій архітектурі використовується протокол зв'язку MQTT.

Центральним елементом цієї архітектури є брокер Mosquitto [28], який реалізований на платі Raspberry Pi 4, підключеній до локальної мережі через маршрутизатор, він забезпечує зв'язок між усіма пристроями інтернету речей. Для об'єднання пристроїв, що знаходяться на різних майданчиках, використовується віртуальна приватна мережа (англ. VPN).

Для створення повноцінної системи діагностики потрібен набір спеціалізованих бібліотек, таких як Pytorch. Важливою вимогою є можливість їх запуску з використанням прискорення на графічному процесорі (англ. GPU), а також їх розгортання на периферійних вузлах. Для вирішення цих завдань було обрано плату NVIDIA Jetson Nano через її низьке енергоспоживання (до 10 Вт),

достатній обсяг оперативної пам'яті та орієнтованість на вбудовані застосування.

Щоб спростити роботу з програмним забезпеченням, було використано готовий набір для машинного навчання, це рішення містить усі необхідні бібліотеки, забезпечує легкий доступ до ресурсів GPU та включає модулі, спеціально оптимізовані для глибокого навчання на периферійних пристроях.

Для зберігання всієї інформації, що циркулює в мережі в реальному часі, та її подальшого офлайн-аналізу, потрібна високошвидкісна база даних, спеціалізована для роботи з часовими рядами. Для цього завдання було обрано InfluxDB — рішення, що добре підходить для роботи з великою кількістю підключених периферійних пристроїв інтернету речей.

InfluxDB має вбудовану панель моніторингу, а також легко інтегрується з іншими людино-машинними інтерфейсами, наприклад, з Grafana, яка також використовується в цій роботі.

Розроблена програмна платформа відзначається наявністю низки високопродуктивних функціональних можливостей, що керуються багатьма параметрами. До ключових параметрів налаштування належать:

- методи очищення даних;
- довжина ковзних вікон та коефіцієнт їхнього перекриття;
- застосування нормалізації до вхідного сигналу та обчислених ознак;
- вибір алгоритму для селекції (та класифікації) ознак;
- вибір моделі керованого машинного навчання;
- вибір метрик для оцінювання продуктивності та стійкості системи.

Загальна архітектура реалізованої системи зображена на рис. 5. Вона ілюструє підтримку кількох джерел даних, таких як збережені дані з експерименту або дані, отримані в реальному часі з датчиків вібрації. Продемонстрована база даних може бути розміщена як на персональному комп'ютері, так і в хмарному середовищі [75].

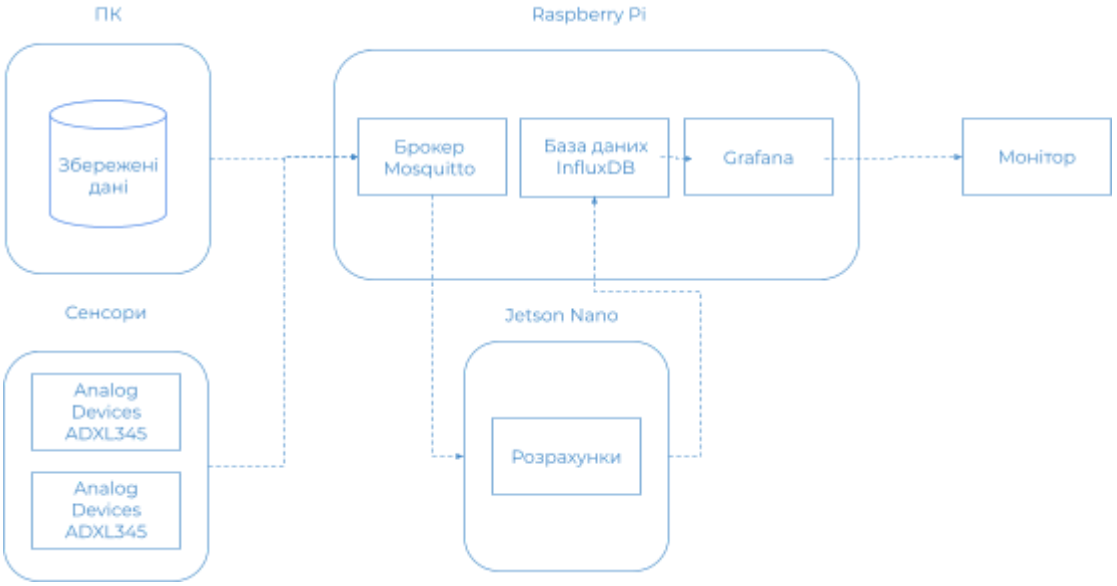


Рис. 2.15. Архітектура реалізованого фреймворку з датчиком вібрації Analog Devices ADXL345

Ця архітектура (рис. 2.15) ілюструє кілька джерел даних: збережені дані або дані зібрані у режимі реального часу за допомогою датчиків.

Було проведено реалізацію та тестування в реальному часі різноманітних моделей машинного навчання. Хоча навчання моделей може виконуватися як в офлайн, так і в онлайн режимі, у даній роботі тестування здійснювалося виключно онлайн.

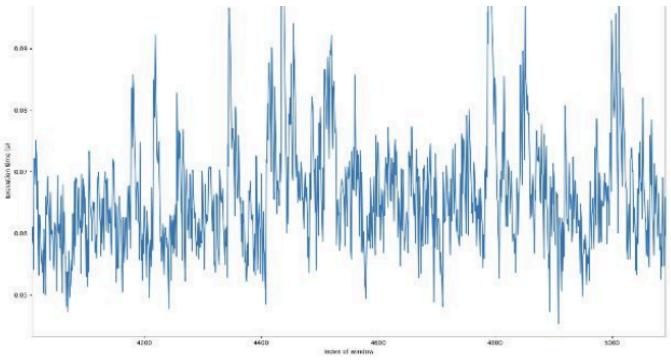


Рис. 2.16. Діагностична модель на основі нейронної мережі, реалізована в Jetson nano без використання графічного процесора: час обчислення для ковзних вікон

На рис. 2.16 показано виміряний час виконання діагностичної моделі на основі нейронної мережі, реалізованої в платі NVIDIA Jetson nano без

використання графічного процесора, для кожного ковзного вікна (у координаті x пронумеровані вікна). Ці результати показують, що час виконання майже постійний і становить 60 мс, що менше, ніж тривалість кожного вікна (кілька сотень мс, залежно від вибору параметрів користувача).

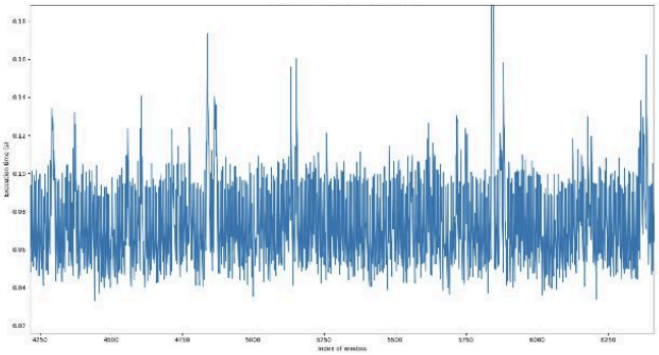


Рис. 2.17. Діагностична модель на основі дерев рішень, реалізована в Jetson nano без графічного процесора: час обчислення для ковзних вікон

Для моделі на основі дерев рішень, за аналогічних умов реалізації, цей показник досягає 75 мс (рис. 2.17.). Очікувано, цей час є дещо вищим, оскільки апаратна платформа NVIDIA Jetson Nano оптимізована для виконання нейромережевих обчислень.

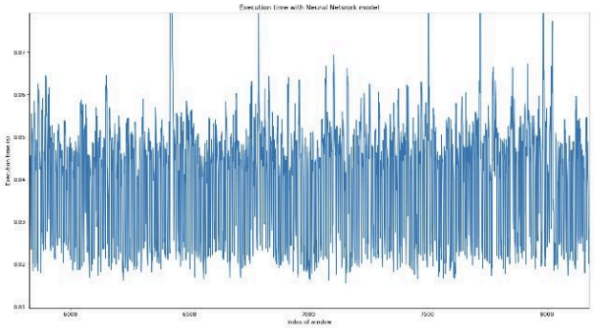


Рис. 2.18. Діагностична модель на основі нейронної мережі, реалізована в процесорі без графічного процесора: час обчислення для ковзних вікон

Для порівняння, при реалізації тієї ж нейромережевої діагностичної моделі на центральному процесорі (CPU) персонального комп'ютера (також без

використання GPU), час виконання скорочується до 40 мс, як показано на рис. 2.18.

Запропонована архітектура забезпечує можливість реалізації розподіленого машинного навчання, дозволяючи периферійним пристроям навчати локальні моделі. Можливе впровадження розподілених завдань у різних конфігураціях. Наприклад, плати Jetson Nano, розташовані поблизу об'єкта та датчиків, можуть бути виділені для попередньої обробки сенсорних даних (очищення, обчислення ознак), у той час як основна діагностична модель виконується на центральному процесорі, що дистанційно з'єднаний з усіма пристроями через потокову передачу даних. Крім того, налаштування параметрів та візуалізація результатів у реальному часі здійснюються локально за допомогою сенсорних екранів та дистанційно через смартфони (рис. 2.14.).

У рамках дослідження було реалізовано та протестовано декілька моделей керованого машинного навчання [30], зокрема: нейронні мережі, дерева рішень, випадковий ліс, метод k-найближчих сусідів (англ. KNN), метод опорних векторів (англ. SVM) та Гаусівський наївний Байєс. Для навчання моделей використовується 70% розмічених даних (в онлайн або офлайн режимі), тоді як решта 30% застосовуються для тестування в реальному часі, що передбачає використання методу ковзних вікон.

На рис. 2.19. представлена матриця невідповідностей для діагностичної моделі на основі нейронної мережі, реалізованої на платі NVIDIA Jetson Nano (результати відповідають тестам, показаним на рис. 2.16.). Аналіз матриці свідчить про високу ефективність моделі.

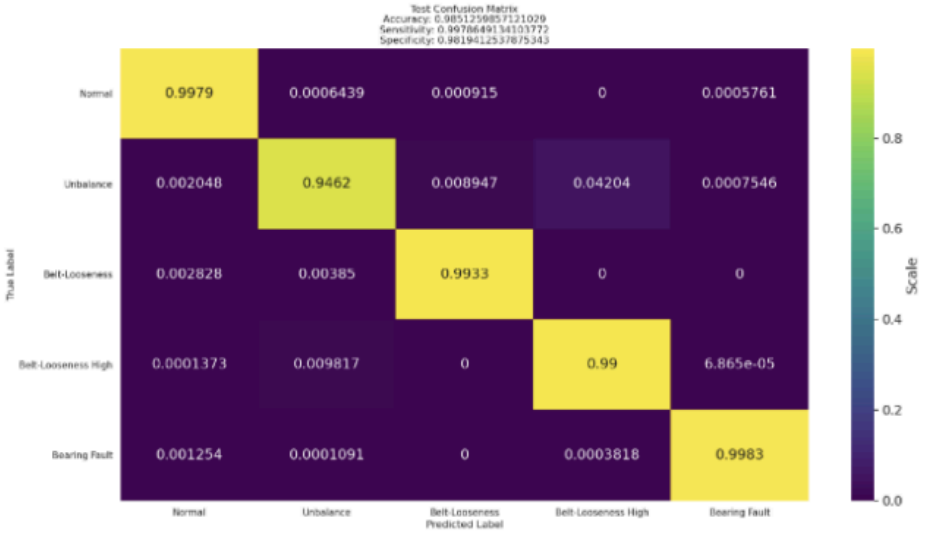


Рис. 2.19. Матриця невідповідностей діагностичної моделі на основі нейронної мережі

Для досліджуваного механізму повороту крана найкращі діагностичні результати були отримані саме за допомогою нейромережевої моделі. Вона продемонструвала високі показники точності, співставні з результатами моделі випадкового лісу, однак при цьому мала найменший час виконання в умовах тестування в реальному часі з використанням ковзних вікон.

Враховуючи всі розраховані ознаки, деякі моделі можуть призвести до перенавчання. Слід використовувати лише найбільш значущі ознаки. Тому ми впровадили та протестували різні алгоритми вибору ознак у фреймворку, такі як: дерева рішень, випадковий ліс та інші.

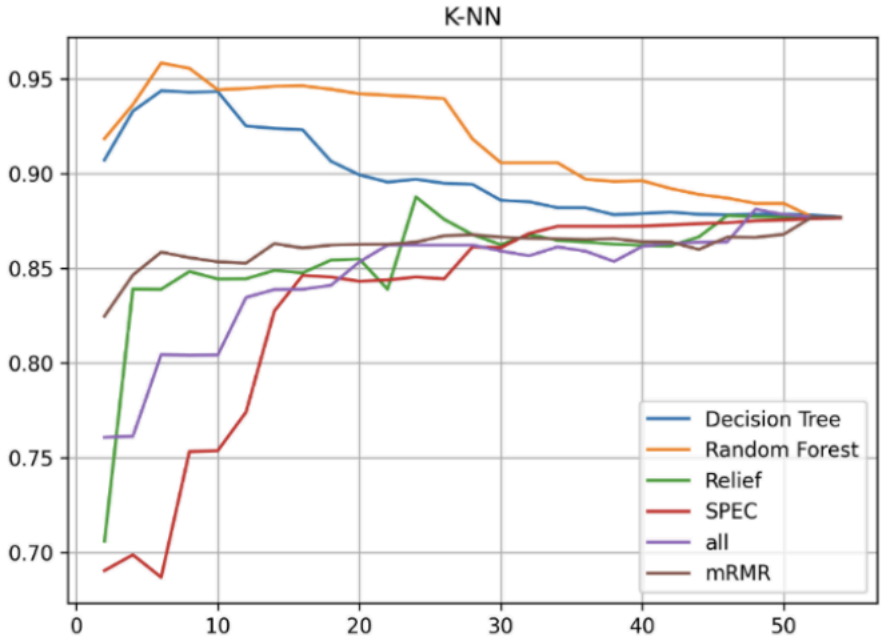


Рис. 2.20. Точність моделі KNN залежно від кількості впорядкованих ознак та методу їх вибору

На рис. 2.20 показано залежність точності діагностичної моделі на основі методу k-найближчих сусідів (англ. KNN) від кількості впорядкованих ознак, відібраних різними методами (у даному експерименті нормалізувалися лише ознаки, а не вхідні сигнали). Результати демонструють, що найкращим алгоритмом селекції для цього методу є випадковий ліс, при цьому оптимальна кількість ознак не повинна перевищувати 26. Слід зазначити, що вибір ознак є багатокритеріальною задачею, де також необхідно враховувати такі показники, як стійкість до зашумлених даних та час виконання.

На рис. 2.21. показано точність, отриману за допомогою діагностичної моделі на основі SVM для кількох методів вибору ознак. Найкращі результати отримані для алгоритму вибору «Дерева рішень». Його отримана продуктивність практично постійна, але трохи менша порівняно з попереднім рисунком (рис. 2.20.). Слід вибрати від 8 до 30 ознак, залежно також від інших показників продуктивності (наприклад, часу виконання).

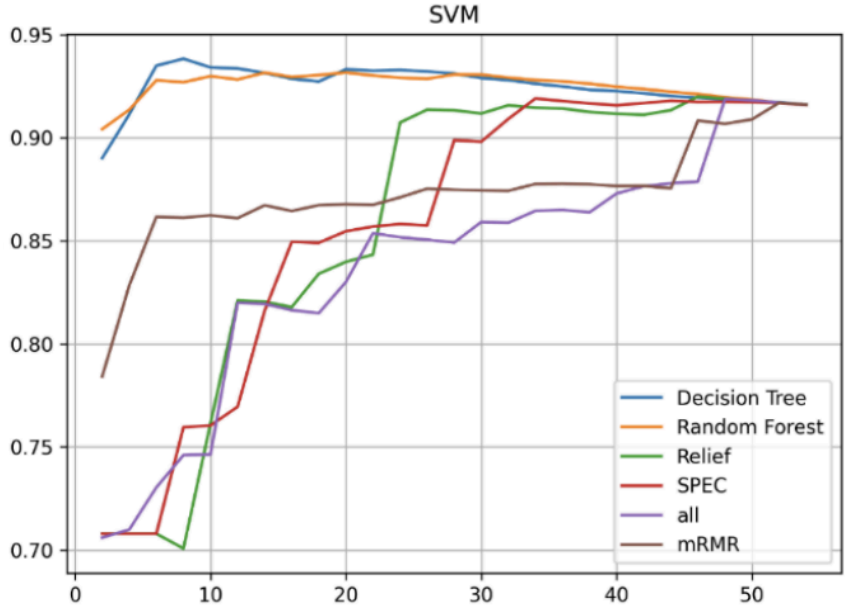


Рис. 2.21. Точність моделі SVM залежно від кількості впорядкованих ознак та методу їх вибору

Таким чином розроблений комплекс на базі нейронної мережі дозволяє з високою точністю ідентифікувати несправності та генерувати прогнози в режимі реального часу. Отримані результати підтверджують перспективність використання нейронних мереж для підвищення ефективності технічного обслуговування баштових кранів та попередження аварій. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення методів обробки даних та розробку більш складних моделей нейронних мереж.

2.3. Висновки до розділу 2

1. На основі аналізу наукових праць та фізичних моделей зношування було досліджено ключові параметри технічного стану механізму повороту баштового крана, що дозволило обґрунтувати вибір вібрації та температури як основних діагностичних індикаторів.

2. Вперше отримано закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану механізму повороту, що кількісно пов'язують рівень вібраційних та температурних показників з різними стадіями зносу (здоровий стан, помірний знос, критичний стан). Ці закономірності лягли в основу розробки підсистеми предиктивного обслуговування з використанням технології глибокого навчання нейронної мережі.

3. Набув подальшого розвитку метод підвищення безпеки експлуатації баштових кранів, який, на відміну від існуючих, не лише пасивно сигналізує про несправність, а й інтегрується в систему керування для проактивного обмеження небезпечних режимів роботи, враховуючи закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану.

4. Розроблено функціональний програмно-апаратний модуль предиктивної діагностики на основі вібродатчиків, датчиків температури та обчислювального блоку (мікроконтролера), що здатний в реальному часі виконувати збір даних, їх аналіз за допомогою навченої нейромережі та видавати діагностичний висновок, реалізуючи таким чином концепцію переходу до обслуговування "за станом".

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ І УПРАВЛІННЯ СТІЙКІСТЮ КРАНА НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ

Експлуатація баштових кранів, як великогабаритних вантажопідіймальних механізмів, що функціонують у відкритому просторі, характеризується потенційним впливом комплексу зовнішніх чинників. Під зовнішніми чинниками в даному контексті розуміється сукупність природних та техногенних факторів навколишнього середовища, що не залежать від конструктивних особливостей крана та дій оператора, але здатні суттєво впливати на його стійкість, міцність, а отже, і на безпеку експлуатації. Аналіз статистичних даних щодо аварійності баштових кранів свідчить про значну частку інцидентів, зумовлених саме впливом зовнішніх чинників, серед яких домінують вітрове навантаження та, в сейсмічно активних регіонах, сейсмічні впливи. Це обумовлює необхідність проведення системного аналізу впливу зовнішніх чинників на роботу баштових кранів, розробки адекватних методів їх урахування на етапах проектування, виготовлення та експлуатації, а також впровадження ефективних превентивних заходів, спрямованих на мінімізацію ризику виникнення аварійних ситуацій.

Зовнішні чинники, що впливають на експлуатацію баштових кранів, доцільно класифікувати на дві основні групи: природні та техногенні. До природних факторів належать: вітрове навантаження, сейсмічні впливи, температурні впливи, опади, грозові розряди, а також зсуви та просадки ґрунту. Вітрове навантаження є одним з найбільш значущих та динамічних факторів, що впливають на стійкість та міцність баштових кранів. Воно характеризується статичною складовою, зумовленою середньою швидкістю вітру, та динамічною складовою, пов'язаною з пульсаціями швидкості та тиску, що виникають внаслідок поривів вітру та турбулентності повітряного потоку. Сейсмічні впливи, характерні для сейсмічно активних регіонів, становлять серйозну

загрозу для баштових кранів, викликаючи коливання ґрунту, що можуть призвести до втрати стійкості та руйнування конструкції. Температурні впливи, зокрема екстремально низькі температури, можуть спричиняти зміну механічних властивостей матеріалів (підвищення крихкості сталі), а високі температури – зниження міцності та повзучість металу. Опади у вигляді дощу, снігу та обледеніння призводять до збільшення маси крана, зміни його аеродинамічних характеристик та можуть сприяти розвитку корозійних процесів. Грозові розряди, при прямому влучанні блискавки в кран, можуть викликати його пошкодження, вихід з ладу електронного обладнання та ураження персоналу електричним струмом. Зсуви та просадки ґрунту, особливо на непідготовлених будівельних майданчиках, можуть призвести до порушення стійкості крана та його перекидання.

До техногенних факторів належать: пошкодження крана внаслідок зіткнення з іншими машинами та механізмами, що працюють на будівельному майданчику; пожежі та вибухи, що можуть виникнути внаслідок порушення правил безпеки або аварій на сусідніх об'єктах; порушення правил експлуатації сусідніх об'єктів, наприклад, проведення вибухових робіт без належного узгодження; електромагнітні перешкоди, що можуть спричинити збої в роботі електронних систем керування та безпеки; а також несанкціоновані дії (вандалізм, терористичні акти), спрямовані на пошкодження або виведення з ладу крана. Варто зазначити, що в науковій літературі досліджуються й інші види екстремальних динамічних впливів, наприклад, від вибухової хвилі, що також дозволяє отримати важливі дані про поведінку конструкції та розробити ефективні системи захисту [147-148].

Вітрове навантаження, як було зазначено вище, є одним з найбільш суттєвих факторів, що впливають на безпеку експлуатації баштових кранів. Розрахунок вітрового навантаження здійснюється відповідно до вимог чинних нормативних документів, зокрема, ДСТУ EN 13001-2 та ДСТУ Б В.1.2-3:2016. При розрахунку враховується швидкісний напір вітру, що залежить від географічного розташування будівельного майданчика та висоти крана,

аеродинамічний коефіцієнт крана, що визначається його формою та орієнтацією відносно напрямку вітру, площа поверхні, на яку діє вітровий тиск, а також коефіцієнт динамічності, що враховує пульсаційний характер вітрового навантаження. Слід особливо наголосити на небезпеці виникнення резонансних коливань конструкції крана, що можуть виникати при збігу частоти власних коливань з частотою пульсацій вітрового навантаження. Резонансні явища можуть призводити до різкого зростання амплітуди коливань та, як наслідок, до руйнування крана.

Для районів з підвищеною сейсмічною активністю обов'язковим є врахування сейсмічних навантажень при проектуванні та встановленні баштових кранів. Розрахунок на сейсмічні впливи виконується відповідно до державних будівельних норм, зокрема, ДСТУ Б В.1.1-28:2010, та передбачає визначення сейсмічних сил, що діють на кран, з урахуванням інтенсивності землетрусу, характеристик ґрунту та динамічних властивостей конструкції.

Мінімізація ризику аварій баштових кранів, спричинених впливом зовнішніх чинників, вимагає реалізації комплексу заходів, що охоплюють всі етапи життєвого циклу крана. На етапі проектування необхідно забезпечити ретельний аналіз та врахування всіх потенційних зовнішніх впливів, характерних для регіону передбачуваної експлуатації крана, застосування сучасних методів розрахунку на міцність та стійкість з урахуванням динамічних навантажень, а також вибір матеріалів, що мають достатній запас міцності та стійкості до впливу зовнішніх факторів. При виборі місця встановлення крана слід враховувати розу вітрів, рельєф місцевості, наявність будівель та споруд, що можуть впливати на аеродинамічну обстановку, а також проводити інженерно-геологічні вишукування для оцінки несучої здатності та стійкості ґрунту.

В процесі експлуатації баштового крана необхідно суворо дотримуватися правил та інструкцій, що регламентують роботу в різних погодних умовах, зокрема, обмежувати або припиняти роботу при досягненні критичних значень швидкості вітру. Важливим елементом системи безпеки є встановлення

приладів контролю за зовнішніми чинниками, таких як анемометри (для вимірювання швидкості вітру) та датчики температури. Впровадження систем автоматичного захисту, що забезпечують автоматичне обмеження робочих параметрів крана (наприклад, обмеження вантажопідйомності або вильоту стріли) або його повну зупинку при досягненні небезпечних значень контрольованих параметрів (швидкості вітру, кута крену), дозволяє суттєво знизити ризик аварійних ситуацій. Також ефективним заходом є автоматичне позиціонування стріли крана за напрямком вітру в неробочому стані, що зменшує аеродинамічний опір та підвищує стійкість.

Окрім технічних заходів, важливе значення має розробка та впровадження планів дій на випадок виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з впливом зовнішніх чинників (ураганний вітер, землетрус, пожежа тощо), а також забезпечення наявності необхідних засобів та ресурсів для ліквідації наслідків можливих аварій.

Зовнішні чинники, насамперед вітрове та сейсмічне навантаження, є суттєвими факторами ризику, що можуть призвести до аварій баштових кранів. Забезпечення безпечної експлуатації цих машин в умовах впливу зовнішніх чинників вимагає комплексного підходу, що охоплює всі етапи життєвого циклу крана – від проектування та виготовлення до монтажу та експлуатації. Ретельний аналіз та врахування потенційних зовнішніх впливів при проектуванні, обґрунтований вибір місця встановлення, суворе дотримання правил експлуатації, впровадження сучасних систем моніторингу та автоматичного захисту, а також розробка планів дій на випадок надзвичайних ситуацій є необхідними умовами для мінімізації ризику аварій, пов'язаних із зовнішніми чинниками, та забезпечення надійної та безпечної роботи баштових кранів.

Сучасне будівництво, особливо висотне, неможливе без використання баштових кранів. Ці складні вантажопідіймальні механізми, що працюють у відкритому просторі, піддаються впливу різноманітних зовнішніх факторів, серед яких вітрове навантаження є одним з найбільш значущих та небезпечних.

Даний розділ є логічним продовженням та розвитком теми, описаної детально у розділі 2.5, де було проведено аналіз аварійності баштових кранів, спричиненої впливом зовнішніх чинників. Особливу увагу було приділено вітровому навантаженню як одному з найбільш значущих та небезпечних факторів, що впливають на стійкість, міцність та безпеку експлуатації цих вантажопідіймальних машин. Було встановлено, що нерівномірність вітрового потоку, наявність поривів та турбулентності, а також складність аеродинамічної взаємодії вітру з конструкцією крана роблять вітрове навантаження складним для точного прогнозування та адекватного врахування. Традиційні методи розрахунку, що базуються на нормативних документах, оперують, як правило, усередненими значеннями швидкості вітру та не враховують локальні особливості мікрометеорології на конкретному будівельному майданчику, а також динамічні ефекти, пов'язані з пульсаціями вітрового потоку. Це може призводити до недооцінки реального вітрового навантаження та, як наслідок, до підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій, включаючи втрату стійкості та перекидання крана. З огляду на вищезазначене, розробка та впровадження систем точного та оперативного прогнозування вітрових навантажень на баштові крани є вкрай актуальним завданням, що має безпосереднє відношення до забезпечення безпеки виконання будівельних робіт та збереження життя і здоров'я людей.

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 цього розділу - це розробка інтелектуальної системи, що інтегрується з системою керування баштового крана для своєчасного виявлення та попередження небезпечних вітрових навантажень.

Традиційно, для прогнозування вітру в метеорології застосовуються два основні підходи: чисельні моделі прогнозу погоди (Numerical Weather Prediction, NWP) та статистичні методи. Чисельні моделі базуються на розв'язанні складної системи диференціальних рівнянь, що описують фізичні процеси, які відбуваються в атмосфері. Вони дозволяють отримувати прогнози погоди, включаючи розподіл швидкості та напрямку вітру, на різних висотах та з певним просторовим і часовим розрізненням. Однак, чисельні моделі мають обмежену точність, особливо при прогнозуванні локальних вітрових умов на конкретному будівельному майданчику, де на формування вітрового потоку можуть суттєво впливати рельєф місцевості, наявність будівель та споруд, а також інші локальні фактори. Статистичні методи, в свою чергу, ґрунтуються на аналізі історичних даних про вітер, отриманих з метеорологічних станцій або датчиків, встановлених безпосередньо на крані. Ці методи дозволяють виявляти певні статистичні закономірності та будувати прогностичні моделі, що екстраполюють виявлені тенденції на майбутнє. Проте, статистичні методи не враховують фізичні механізми формування вітрового потоку і можуть бути неефективними при зміні умов або при виникненні нетипових, екстремальних погодних явищ.

Останніми роками значного розвитку набули методи машинного навчання, зокрема, глибоке навчання (англ. Deep Learning), що продемонстрували високу ефективність у вирішенні широкого спектру завдань, пов'язаних з аналізом даних, розпізнаванням образів, прогнозуванням та прийняттям рішень. Глибоке навчання передбачає використання багатошарових штучних нейронних мереж, здатних виявляти складні, нелінійні залежності в даних та будувати прогностичні моделі, що перевершують за точністю та

узагальнюючою здатністю традиційні методи. Застосування глибокого навчання для прогнозування вітрових навантажень на баштові крани відкриває ряд суттєвих переваг. По-перше, нейронні мережі здатні ефективно обробляти великі обсяги різнорідних даних, що надходять з різних джерел: метеорологічних станцій, датчиків, встановлених на крані, чисельних моделей прогнозу погоди. По-друге, глибокі нейронні мережі мають здатність виявляти приховані, неочевидні залежності між різними параметрами, що впливають на формування вітрового навантаження, які можуть бути невідомі експертам або не враховуватися в традиційних фізичних та статистичних моделях. По-третє, нейронні мережі демонструють високу адаптивність, тобто здатність пристосовуватися до змінних умов та локальних особливостей конкретного будівельного майданчика. По-четверте, навчені нейронні мережі можуть видавати прогнози в режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на зміни вітрової обстановки та вживати необхідних заходів безпеки. Нарешті, глибоке навчання дозволяє прогнозувати не лише середню швидкість вітру, але й такі важливі параметри, як пориви та турбулентність, що мають безпосередній вплив на динамічну поведінку крана.

Адаптивні нейронні мережі є класом нейронних мереж, які здатні змінювати свої параметри (ваги зв'язків) в процесі навчання, підлаштовуючись під змінні умови[77]. Історія розвитку адаптивних нейронних мереж починається з робіт зі створення персептронів 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 багатошарові нейронні мережі. Сьогодні адаптивні нейронні мережі є потужним інструментом, який використовується в багатьох сферах, від розпізнавання образів[78] та обробки сигналів[79] до керування складними системами та прогнозування[80]. 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 MaxiMet GMX600 (Рис. 2.25.), її обробці та прогнозуванні швидкості та напрямку вітру на наступний момент часу.

Рис. 3.1. 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 екстреному повороті стріли.

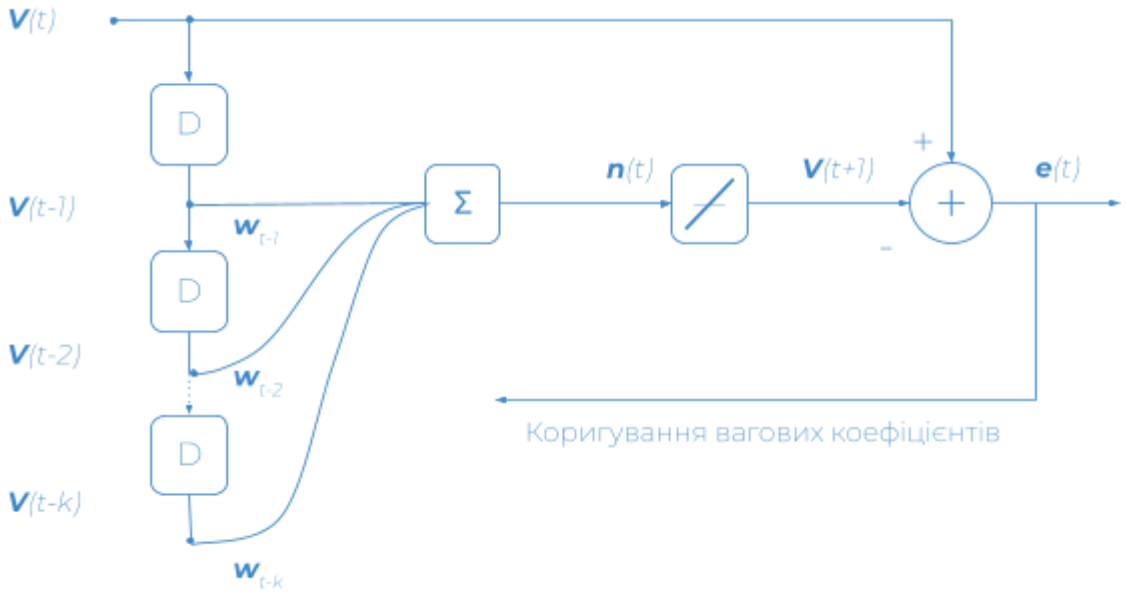


Рис. 3.2. Схема прогнозування

Загальний принцип прогнозування можна зобразити графічно (Рис. 3.2.) та розглянути на прикладі прогнозу швидкості вітрового пориву. На вхідні канали нейромережі поступають дані про швидкість вітру, зафіксовані у попередні моменти часу:

$$V(t-1),\ V(t-2),\ \ldots,\ V(t-k). \tag{3.1}$$

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:

$$e(t) = V(t) - V(t+1). \tag{3.2}$$

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.

де $V(t)$ – бажане значення швидкості вітру; $V(t-1),...,V(t-k)$ – значення швидкостей вітру в попередні моменти часу; $V(t + 1)$ – прогнозоване значення швидкості вітру; w_{t-1}, $w_{t-2},...,w_{t-k}$ – вагові коефіцієнти; D – лінія затримки; $n(t)$ – результат виваженого підсумовування вхідних даних; $e(t)$ – помилка прогнозування.

Точне прогнозування швидкості вітру є складним завданням через нелінійні, нестаціонарні та хаотичні характеристики відповідних часових рядів. У даній роботі для підвищення точності прогнозу застосовано концепцію прогнозування "багато кроків назад - один крок вперед" (англ. multi-lags-one-step, MLOS), щоб дослідити її вплив на точність моделі. Суть підходу полягає у використанні кількох попередніх значень (лагів) для прогнозування одного майбутнього значення. Дослідження показало, що точність моделі зростає до досягнення оптимальної точки запізнення, після чого починає погіршуватися.

Запропонована методологія, проілюстрована на рис. 3.3, складається з чотирьох етапів:

На першому етапі проводився збір даних та їх усереднення за інтервалами від 5 до 30 хвилин та до 1 години. Після цього набори даних були стандартизовані для отримання нульового середнього значення та стандартного відхилення, що дорівнює одиниці.

Другий етап, формування лагів, є надзвичайно важливим, оскільки дані поділяються на різні часові затримки для вивчення ефекту навчання моделі на кількох вхідних елементах для прогнозування єдиної майбутньої події.

На третьому етапі застосовувалася модель прогнозування, при цьому враховувалася необхідність адаптації вхідних даних для адаптивної нейронної мережі.

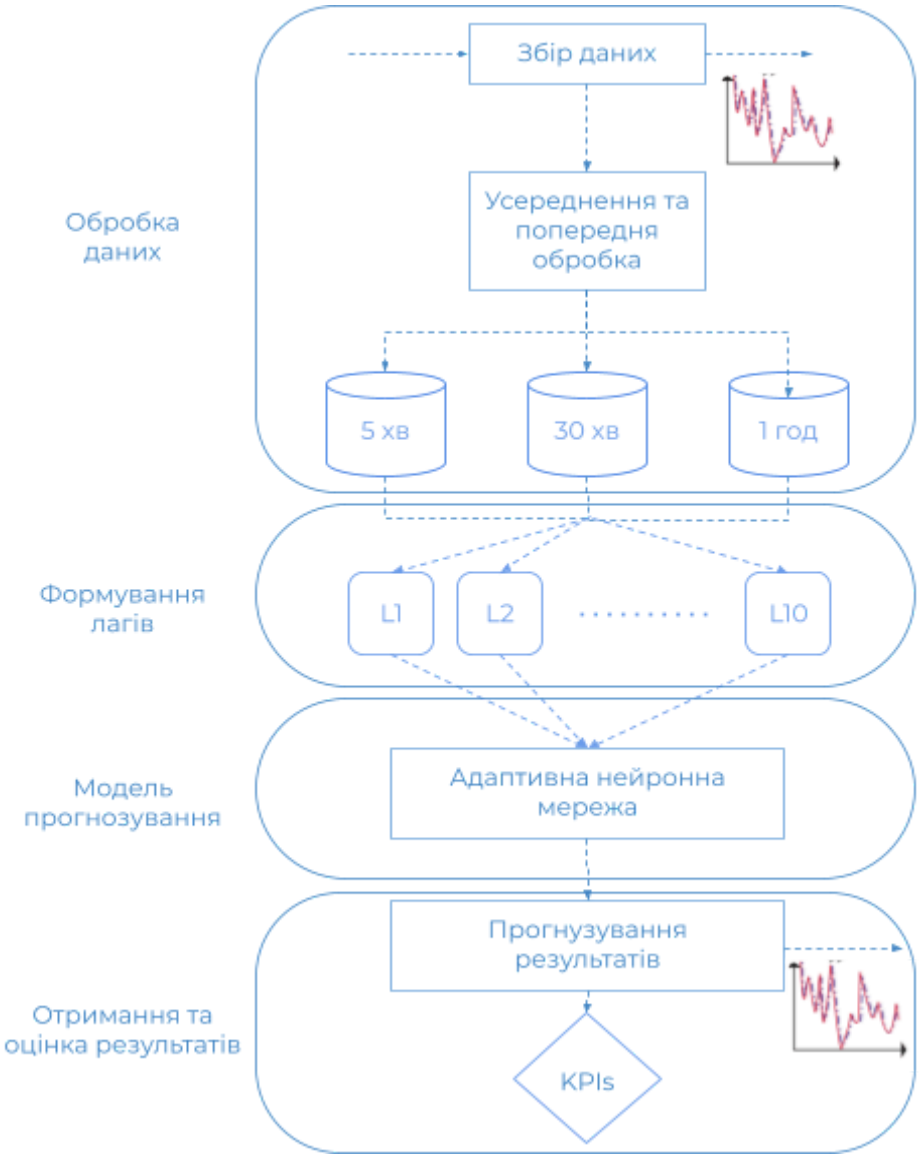


Рис. 3.3. Методологія прогнозування швидкості вітру

На четвертому етапі для перевірки та оцінки запропонованої моделі використовувалися ключові показники ефективності:

– середня абсолютна процентна похибка (англ. MAPE);

$$MAPE = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left|\frac{A_k - P_k}{A_k}\right| \tag{3.3}$$

– середня абсолютна похибка (англ. MAE);

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left|A_k - P_k\right| \tag{3.4}$$

– середньоквадратична похибка (англ. RMSE);

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(A_k - P_k\right)^2} \tag{3.5}$$

– середньоквадратична похибка (англ. MSE).

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(A_k - P_k\right)^2 \tag{3.6}$$

де, *A* – Фактичне значення, P – Прогнозоване значення.

Експериментальні дані для цього дослідження були зібрані безпосередньо з метеостанції баштового крану на будівельному майданчику (див. Додаток Д «Акти впровадження»).

Отримані дані були оброблені шляхом усереднення за різні часові інтервали. Мета такого усереднення полягала у вивченні впливу зменшення розміру набору даних на продуктивність досліджуваних моделей, щоб обрати ту, яка досягає найвищої точності для різних випадків наборів даних.

Аналіз показав, що набори даних є майже ідентичними та зберігають свою сезонність, а процес усереднення не мав значного впливу на їхні характеристики. Вихідні дані часового ряду швидкості вітру показані на рис. 3.4.

Результати прогнозування для навчальних та тестових даних проілюстровано на рис. 3.5 та 3.6 відповідно. Ці графіки свідчать, що запропонований метод демонструє високу продуктивність при прогнозуванні

швидкості вітру. Похибки для навчальних та тестових даних показані на рис. 3.7 та 3.8. Як видно з графіків, похибка на тестових даних є значно меншою порівняно з похибкою на навчальних.

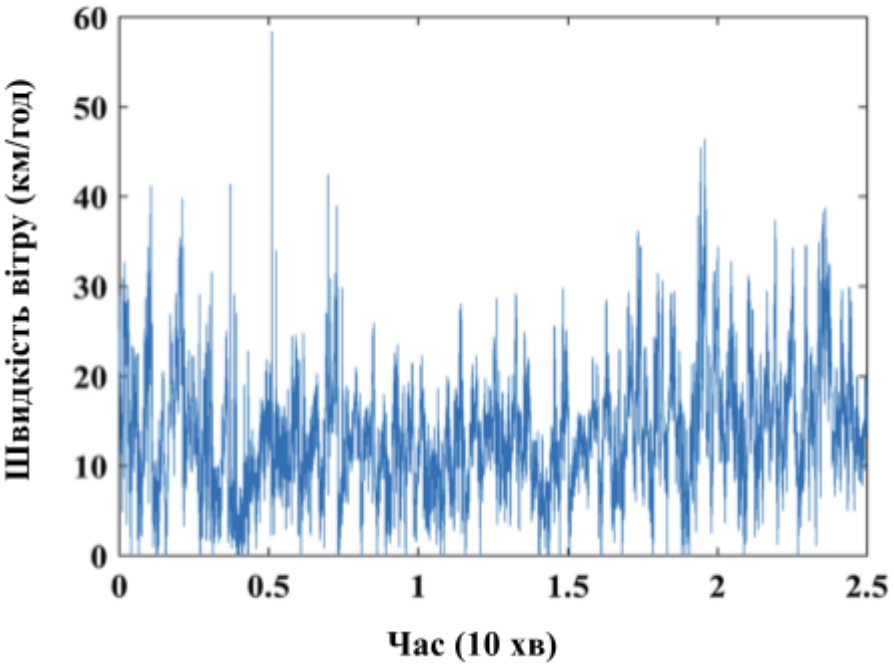


Рис. 3.4. Вихідні дані часового ряду швидкості вітру

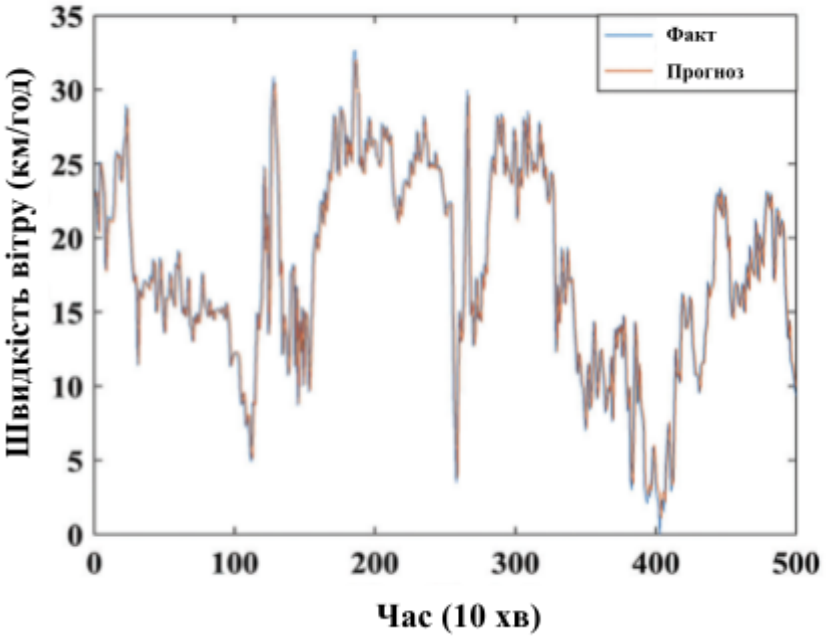


Рис. 3.5. Результати прогнозування на навчальних даних

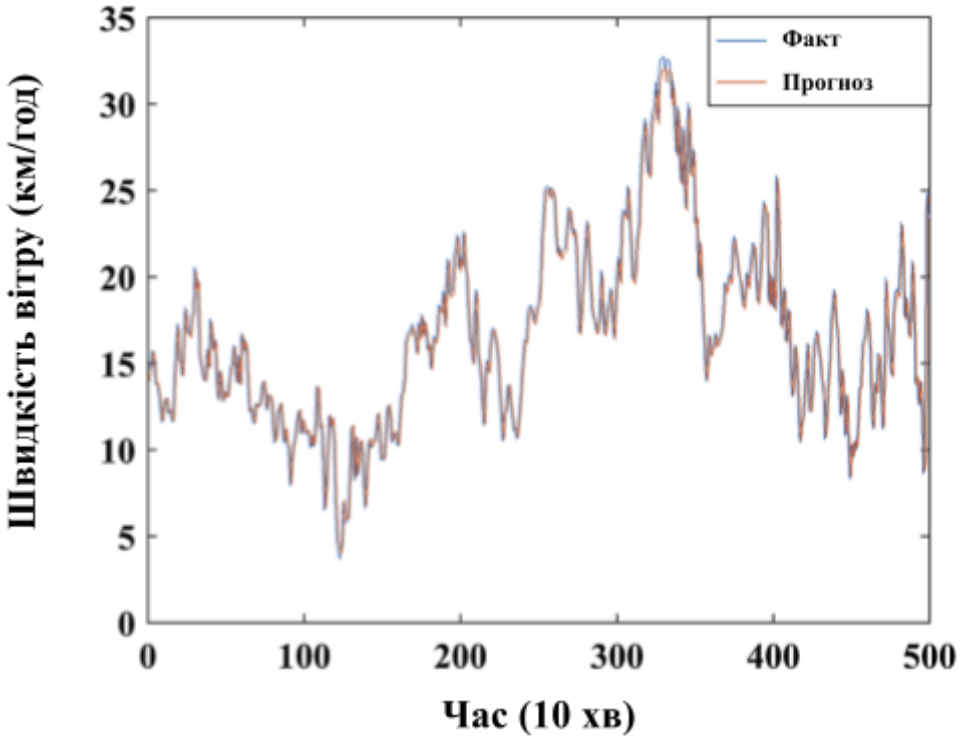


Рис. 3.6. Результати прогнозування на тестових даних

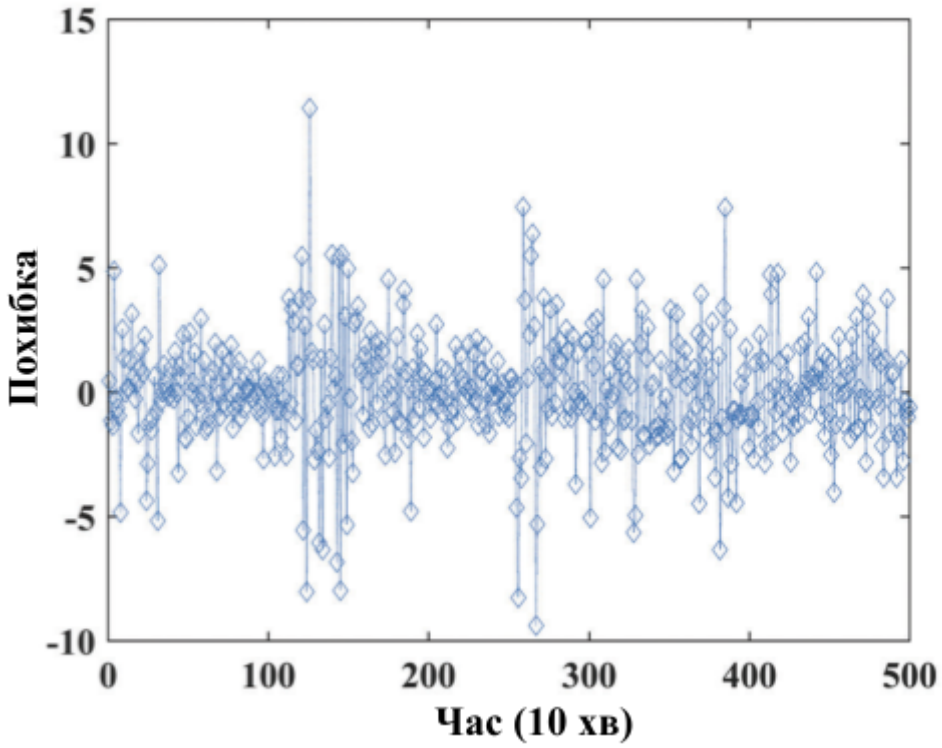


Рис. 3.7. Похибка для навчальних даних

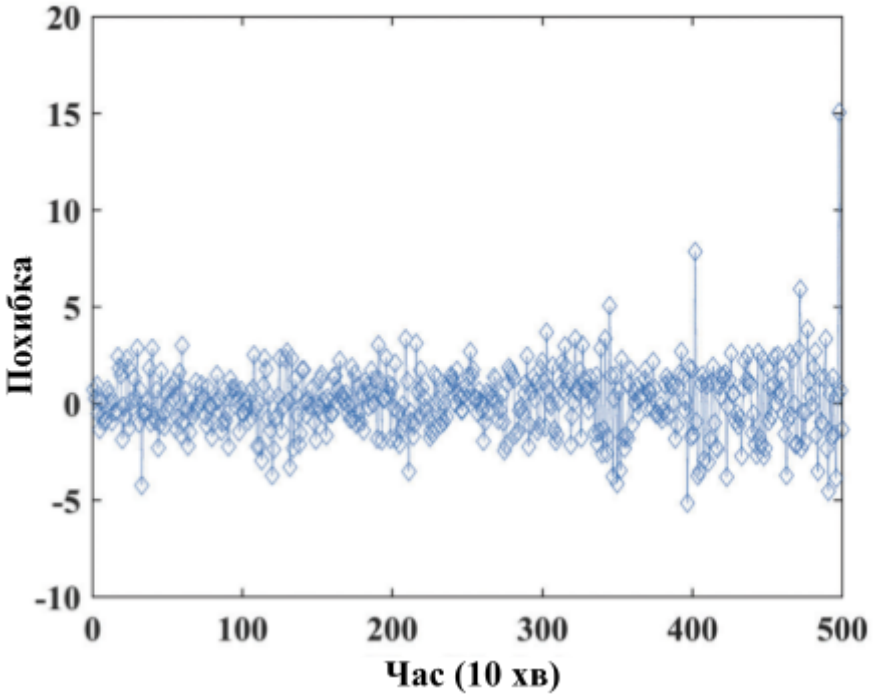


Рис. 3.8. Похибка для тестових даних

Таблиця. 3.1. Ключові показники ефективності моделі прогнозування

Ключові показники ефективності	Значення
MSE	4.83
RMSE	2.34
MAE	1.75
MAPE (%)	16.27

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 [81], що дозволяє обробляти великі обсяги даних та швидко приймати рішення.

Детальна схема роботи системи керування приводом повороту крана при вітрових навантаженнях відображена на структурній схемі (Рис. 3.9.), яка ілюструє взаємодію між різними компонентами системи.

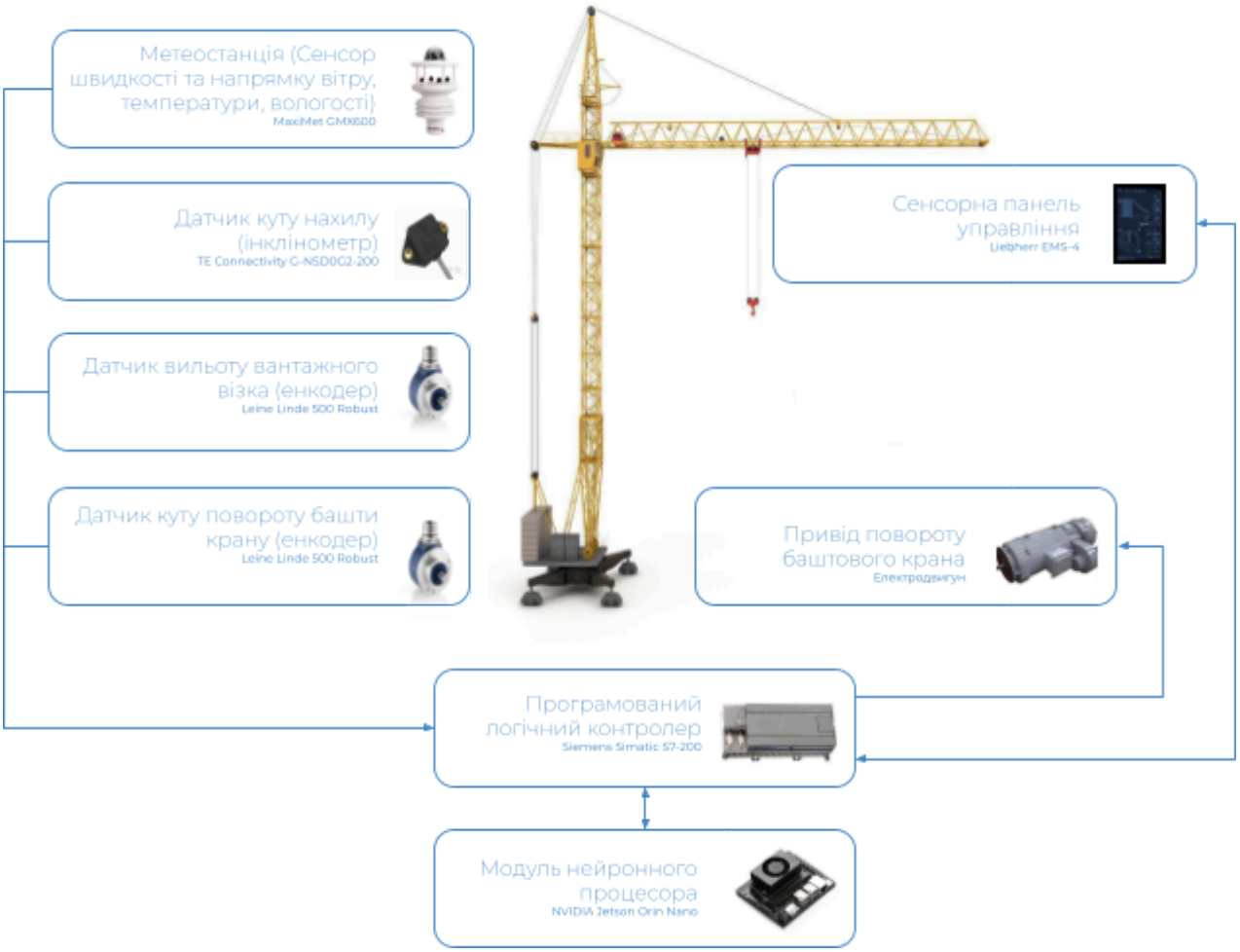


Рис. 3.9. Структурна схема системи керування

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.

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.

3.1 Висновки до розділу 3

У розділі проаналізовано існуючі методи реагування на вітрові навантаження та виявлено суттєві недоліки регламентованих порядків дій, які створюють загрозу для життя кранівника та не забезпечують проактивного захисту крана від раптових поривів вітру. Обґрунтовано, що традиційні підходи є реактивними і не враховують локальні мікрометеорологічні умови, що зумовлює нагальну потребу в розробці інтелектуальних систем превентивного керування.

Для вирішення цієї проблеми розроблено підсистему прогнозування вітрового навантаження та автоматичного управління стійкістю крана. В основі підсистеми лежить удосконалена математична модель прогнозування, реалізована на базі адаптивної нейронної мережі з використанням концепції "багато кроків назад - один крок вперед" . Проведені на реальних даних з будівельного майданчика експерименти показали високу точність прогнозування швидкості вітру, що підтверджується ключовими показниками ефективності, зокрема середньою абсолютною процентною похибкою на рівні 16,27%.

На основі розробленої моделі створено алгоритм превентивного керування, який інтегрується в систему керування краном через модуль нейронного процесора. У разі прогнозування небезпечного пориву вітру, система автоматично ініціює поворот стріли за вітром для мінімізації аеродинамічного опору. При цьому реалізовано логіку безпеки, що запобігає зіткненню гакової підвіски з об'єктом будівництва шляхом попередньої перевірки її положення.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРА ПРИ РОБОТІ КРАНУ

Баштові крани, як складні технічні системи, що функціонують у потенційно небезпечних умовах будівельного майданчика, висувають високі вимоги до надійності всіх компонентів, включаючи людську ланку. Статистичні дані та результати розслідування аварій свідчать про те, що людський фактор залишається однією з домінантних причин виникнення аварійних ситуацій при експлуатації баштових кранів. Частка аварій, прямо чи опосередковано пов'язаних з помилками операторів, порушенням правил експлуатації та іншими аспектами людської діяльності, за різними оцінками, варіює в діапазоні від 30% до 60%, що підкреслює актуальність та практичну значущість проблеми. Це зумовлює необхідність системного дослідження людського фактора, ідентифікації ключових причин помилок та розробки науково обґрунтованих заходів щодо їх запобігання.

Помилки операторів баштових кранів є складним та багатовимірним феноменом, що потребує систематизації для ефективного аналізу та розробки превентивних заходів. З точки зору етапів виконання робочих операцій, помилки можуть бути класифіковані на: перцептивні, когнітивні (пов'язані з прийняттям рішень) та виконавчі. Перцептивні помилки виникають внаслідок некоректної візуальної оцінки параметрів робочого середовища та вантажу: відстаней до об'єктів, маси вантажу, швидкості та напрямку вітру тощо. Обмежений огляд з кабіни, наявність "мертвих зон", недостатня освітленість, а також індивідуальні особливості зорового сприйняття оператора можуть сприяти виникненню таких помилок. Когнітивні помилки пов'язані з неправильним вибором режиму роботи крана, ігноруванням попереджувальних сигналів, прийняттям рішення про виконання операції в умовах, що виходять за межі допустимих (наприклад, при перевищенні вітрового навантаження або

вантажопідйомності), вибором неоптимальної траєкторії переміщення вантажу. Ці помилки можуть бути зумовлені недостатньою кваліфікацією оператора, нерозумінням ним фізичних принципів роботи крана, а також впливом психоемоційних факторів, таких як стрес або втома. Виконавчі помилки проявляються у неточних, несвоєчасних або некоординованих діях при керуванні краном, порушенні встановленої послідовності операцій, різких рухах, що можуть призвести до розгойдування вантажу та інших небажаних наслідків. Окрему категорію становлять свідомі або несвідомі порушення правил експлуатації та техніки безпеки, такі як робота в стані алкогольного або наркотичного сп'яніння, перевищення допустимої вантажопідйомності, експлуатація крана при несправних або відключених приладах безпеки, ігнорування вимог щодо регулярного технічного обслуговування.

Стрес та психоемоційне напруження, зумовлені високою відповідальністю за безпеку людей та збереження матеріальних цінностей, роботою в складних погодних умовах, а також можливими конфліктними ситуаціями, негативно впливають на здатність оператора до адекватної оцінки ситуації та прийняття обґрунтованих рішень. Недостатній рівень кваліфікації та відсутність необхідного досвіду роботи з конкретним типом крана, нерозуміння його конструктивних особливостей та експлуатаційних обмежень можуть призводити до неправильних дій та аварійних ситуацій. Неуважність та відволікання на сторонні подразники (розмови, телефонні дзвінки) знижують здатність оператора до концентрації на виконанні робочих операцій та своєчасного реагування на зміни в робочому середовищі. Стан здоров'я оператора, наявність хронічних захворювань, що впливають на когнітивні функції, зір, слух або координацію рухів, а також прийом лікарських препаратів, що мають побічні ефекти, можуть суттєво знижувати надійність його роботи. Особистісні якості оператора, такі як схильність до ризикованої поведінки, імпульсивність, низький рівень відповідальності, також можуть впливати на стиль роботи та схильність до порушення правил безпеки.

Ергономічні характеристики робочого місця кранівника мають безпосередній вплив на його працездатність, самопочуття та, як наслідок, на безпеку експлуатації крана. Недоліки в ергономічному проектуванні кабіни можуть призводити до швидкої втоми, зниження концентрації уваги та підвищення ймовірності помилкових дій. Ключовими ергономічними факторами є: оглядовість з кабіни (наявність "мертвих зон", обмеження огляду через конструктивні елементи або забруднення скла); раціональність розташування та доступність органів керування (зручність користування важелями, кнопками, їх відповідність антропометричним даним оператора); інформативність та читабельність приладів та індикаторів, що відображають параметри роботи крана та стан навколишнього середовища; параметри мікроклімату в кабіні (температура, вологість, освітленість, рівень шуму та вібрації); ефективність комунікації та взаємодії з іншими учасниками будівельного процесу (сигнальниками, стропальниками).

Впровадження інтелектуальних систем керування та безпеки в сучасних баштових кранах, з одного боку, спрямоване на зниження навантаження на оператора та підвищення безпеки роботи, а з іншого – породжує нові виклики та проблеми. Надмірне інформаційне навантаження, спричинене великою кількістю даних, що виводяться на дисплеї, може ускладнювати процес сприйняття та аналізу інформації, особливо в умовах дефіциту часу або стресових ситуацій. Недостатнє розуміння оператором принципів роботи складних алгоритмів та логіки прийняття рішень інтелектуальною системою може призводити до недовіри до її рекомендацій або, навпаки, до надмірної самовпевненості та ігнорування власних суджень та досвіду. Тривала робота з автоматизованими системами може призводити до деградації навичок ручного керування, що створює потенційну небезпеку у разі виникнення позаштатних ситуацій, що вимагають негайного втручання оператора. Психологічні аспекти взаємодії людини та машини, такі як ступінь довіри до автоматизованих систем, також відіграють важливу роль і потребують ретельного вивчення. Проблеми вдосконалення людино-машинних інтерфейсів та побудови систем керування на

основі принципів самоорганізації для зменшення негативного впливу людського фактора є актуальними і для інших галузей, що підтверджується дослідженням [149].

Мінімізація впливу людського фактора на безпеку експлуатації баштових кранів вимагає реалізації комплексного підходу, що охоплює різні аспекти професійної діяльності оператора. Першочергове значення має професійний відбір кандидатів на посаду кранівника, що передбачає оцінку не лише професійних знань та навичок, але й психофізіологічних якостей, таких як стійкість до стресу, уважність, швидкість реакції, схильність до ризику. Якісне професійне навчання, що включає як теоретичну підготовку, так і практичні заняття на тренажерах, що імітують реальні умови роботи, а також стажування на діючих кранах під керівництвом досвідчених наставників, є обов'язковою умовою допуску до самостійної роботи. Регулярні медичні огляди та психофізіологічний контроль стану операторів дозволяють своєчасно виявляти захворювання або функціональні розлади, що можуть негативно впливати на безпеку роботи. Важливим напрямком є вдосконалення ергономіки робочого місця кранівника, що передбачає оптимізацію конструкції кабіни, забезпечення оптимального огляду робочої зони, раціональне розташування органів керування та приладів, створення комфортного мікроклімату. Розробка та впровадження сучасних систем підтримки прийняття рішень, що надають оператору оперативну інформацію та рекомендації щодо вибору оптимальних режимів роботи та запобігання небезпечним ситуаціям, сприяє зниженню ймовірності помилок. Оптимізація інтерфейсів взаємодії людини з інтелектуальними системами, забезпечення їхньої прозорості та зрозумілості, а також навчання операторів правильній взаємодії з автоматикою є необхідними умовами ефективного використання потенціалу сучасних технологій. Важливу роль відіграють також заходи щодо мотивації та стимулювання персоналу до дотримання правил безпеки, включаючи як матеріальне, так і моральне заохочення за безаварійну роботу.

Комплексний аналіз типології помилок операторів, психофізіологічних та ергономічних аспектів їхньої діяльності, а також особливостей взаємодії з інтелектуальними системами керування дозволяє сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо мінімізації ризиків, пов'язаних з людським фактором. Реалізація запропонованого комплексу заходів, що охоплюють професійний відбір, навчання, контроль стану здоров'я, вдосконалення ергономіки робочого місця, впровадження систем підтримки прийняття рішень та мотивацію персоналу, сприятиме суттєвому підвищенню безпеки експлуатації баштових кранів. Подальші дослідження в цій галузі мають бути спрямовані на розробку нових методів оцінки та прогнозування професійної надійності операторів, створення адаптивних інтерфейсів "людина-машина" та вдосконалення систем автоматизованого керування, що враховують індивідуальні особливості та психофізіологічний стан людини.

Попередній аналіз людського фактора як причини аварій баштових кранів у попередньому підрозділі виявив, що значна частка аварійних ситуацій пов'язана з помилками операторів, зумовленими зниженням рівня пильності, втомою, сонливістю, стресом та іншими психофізіологічними чинниками. Ці чинники негативно впливають на когнітивні функції оператора, швидкість реакції, здатність до адекватної оцінки ситуації та прийняття обґрунтованих рішень, що, в свою чергу, призводить до підвищення ймовірності помилок при керуванні краном. Традиційні методи боротьби з людським фактором, такі як професійний відбір, навчання та контроль за дотриманням режиму праці та відпочинку, є, безумовно, необхідними, але не завжди достатньо ефективними. Тому, вкрай актуальним є впровадження додаткових, технологічних заходів, спрямованих на безперервний моніторинг стану оператора та своєчасне виявлення ознак зниження його працездатності. Одним з найбільш перспективних напрямків у цій галузі є розробка та впровадження систем розпізнавання сонливості оператора.

Сонливість є природним фізіологічним станом, що характеризується зниженням рівня пильності, уповільненням реакцій, погіршенням когнітивних

функцій та схильністю до засинання. Для оператора баштового крана, який керує складним та потенційно небезпечним обладнанням, сонливість є особливо небезпечним фактором, що може призвести до катастрофічних наслідків. Навіть короткочасна втрата уваги або мікросон можуть стати причиною неправильних дій, несвоєчасного реагування на зміну обстановки або ігнорування попереджувальних сигналів.

Статистика аварій, пов'язаних з людським фактором, свідчить про те, що втома та сонливість є одними з найбільш поширених причин помилок операторів. Це зумовлено як об'єктивними факторами (тривалі робочі зміни, монотонність роботи, нічні зміни), так і суб'єктивними (недотримання режиму сну та відпочинку, стрес, стан здоров'я).

На сьогоднішній день автомобільна індустрія активно розвиває технології для підтримки водія, такі як системи розпізнавання сну та втоми, камери для відстеження рухів очей і т.д [33-35]. Такі системи запобігають аваріям на дорогах шляхом сповіщення водія про необхідність зупинки (Рис.4.1) або автоматичної активації системи безпеки в разі неуважності. Для операторів баштових кранів подібних технологій майже немає, що є особливо небезпечним, враховуючи, що вони працюють на великих висотах у складних умовах.

Рис. 4.1. Система розпізнавання втоми на автомобілях Volkswagen

Недостатність таких систем створює серйозну проблему. Враховуючи вищезгадані фактори, є очевидною необхідність розробки спеціалізованих систем для контролю фізичного та психологічного стану операторів кранів.

Зокрема, необхідно створити технології, здатні контролювати наявність у свідомості оператора, виявляти симптоми сонливості чи втрати концентрації та вживати відповідних заходів, таких як автоматична зупинка роботи крана або сповіщення про потребу в паузі для відпочинку.

Таким чином, розробка і впровадження нових методів контролю, орієнтованих на фізіологічний стан оператора, може значно покращити безпеку при експлуатації баштових кранів і знизити кількість аварій, пов'язаних з людським фактором.

Для зменшення ризику аварій, що можуть бути спричинені сонливістю, втомою або недостатньою пильністю водія, вчені досліджують різні підходи до виявлення цих факторів. Існує дві основні групи методів виявлення сонливості. Перша група фокусується на аналізі поведінки водія, спостерігаючи за його діями для виявлення ознак сонливості [36-37]. Для цього використовуються показники, такі як поштовхи керма, що фіксують нестабільні рухи та стандартне відхилення бокового положення, що моніторить положення автомобіля в смузі руху. Друга група методів, відома як моніторинг стану водія, передбачає безпосереднє спостереження за фізичним станом водія. Цей підхід включає в себе методи обробки зображень для аналізу таких ознак, як закриті очі, позіхання або кивання головою. Також використовуються методи на основі фізіологічних сигналів, які відстежують зміни в серцевому ритмі або активності мозку як ознаки сонливості [38-39]. Комбінуючи ці підходи, вчені можуть розробити більш точні та ефективні системи для виявлення сонливості та підвищення безпеки водіїв.

Виявлення облич, особливо тих, де видно очі, є легкою задачею для людей, але стає складним завданням для комп'ютерів. Машинне навчання має ключову роль у виділенні потрібних елементів із складних умов, зокрема враховуючи такі фактори, як масштаб, орієнтація і освітлення. Крім того, технології виявлення облич мають різноманітні застосування, зокрема для моніторингу втоми. У цьому напрямку дослідники, на чолі з Кортлі [40], поділили методи виявлення облич на чотири основні категорії. Перша категорія

— модельні методи, які порівнюють моделі обличчя та його частин з кандидатами за допомогою кореляційних функцій. Альмабді та Ельрефаї [41] підкреслили важливість аналізу очей, хоча також зазначили можливі проблеми з точністю та обчислювальними витратами. Друга категорія — методи, орієнтовані на інваріантні характеристики, що дозволяють виявляти обличчя незважаючи на зміни в позі, освітленні та кутах огляду. Третя категорія — методи, які фокусуються на визначенні п’яти ключових рис обличчя для характеристики типової особи [42-43]. І нарешті, остання категорія — це підхід, що поєднує зовнішні ознаки та машинне навчання, який дозволяє швидко і точно застосовувати моделі, навчені на великій кількості зображень. Популярними методами виявлення об'єктів є алгоритм Віоли і Джонса (каскад Гаара) та гістограма орієнтованих градієнтів, запропонована Далалом і Тріггсом [44].

Зокрема, виявлення облич у реальному часі є однією з тих областей, де алгоритм Віоли-Джонса показує свої найкращі результати [45]. Процес складається з чотирьох етапів: проектування каскаду класифікаторів, навчання за методом AdaBoost, створення зображень та відбір характеристик типу Гаара. Завдяки простоті використання та швидкості обчислень, Віола і Джонс застосовують характеристики Гаара, які інколи називають характеристиками типу Гаара. Для пришвидшення обчислень характеристик вони використовують концепцію, що отримала назву інтегральних зображень. Це нововведення дозволяє значно підвищити ефективність обчислень характеристик, зменшуючи частоту сумування піксельних значень.

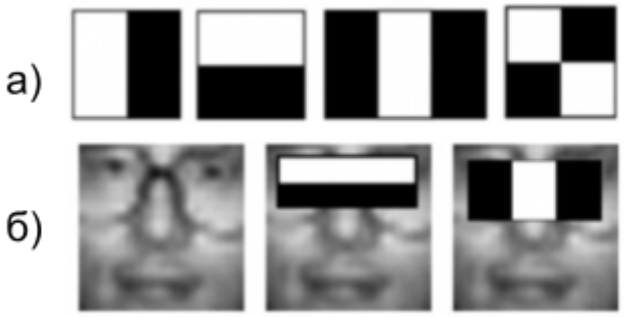


Рис. 4.2. Характеристики Гаара, які використовуються для методу визначення обличчя Віоли-Джонса

Характеристики типу Гаара, які застосовуються в алгоритмі Віоли-Джонса для виявлення облич зображені на Рис.4.2(а) [46]. Це прості прямокутні шаблони, які аналізують контрасти між різними частинами зображення, такими як область очей і щоки. Ці шаблони використовують чорні й білі прямокутники для позначення негативних та позитивних зон, що дозволяє алгоритму виявляти обличчя за рахунок порівняння світлих і темних областей. У свою чергу, типове зображення обличчя як вхід для виявлення характеристик зображено на Рис.4.2(б) [46]. Це зображення допомагає пояснити мету алгоритму: виявлення незмінних рис обличчя навіть при змінах виразу чи орієнтації, що підкреслює значення характеристик типу Гаара для точного розпізнавання облич.

Інтегральне зображення — уявлення запропоноване Віолою та Джонсом (Рис.4.3.). Воно має такий самий розмір, як і початкове зображення, і на кожній точці містить суму пікселів, що розташовані вище і ліворуч від цієї точки, щоб прискорити обчислення характеристик. Ідея полягає в тому, щоб обчислювати суму пікселів лише один раз, що дозволяє зменшити кількість операцій і підвищити ефективність обчислень [44-45].

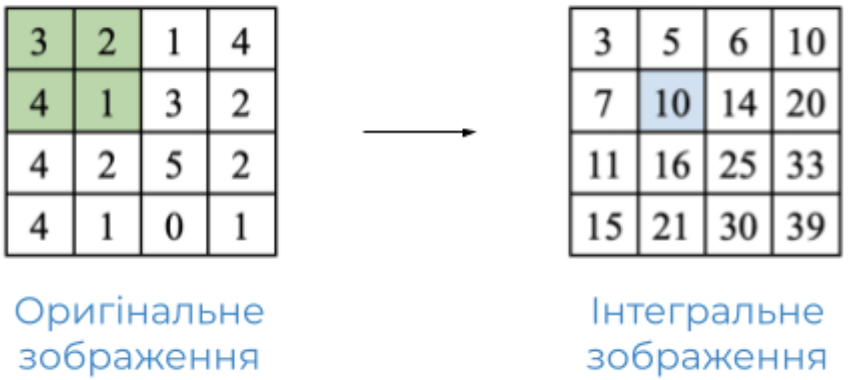


Рис. 4.3. Перетворення оригінального зображення в інтегральне

Піксель у позиції (x, y) у інтегральному зображенні є сумою піксельних значень, що знаходяться вище та зліва від (x, y) в оригінальному зображенню.

Наприклад синій (10) пиксель інтегрального зображення (Рис.3), дорівнює сумі всіх зелених пікселів (3+2+4+1) оригінального зображення, де “$I_{Інтгр}(x, y)$” — це інтегральне зображення в позиції (x, y), яке представляє суму всіх пікселів оригінального зображення, $I_{Оріг}$“(x', y')” до і включно з (x, y). Загальна формула наведена (1):

$$I_{Інтгр}(x, y) = \Sigma_{x'\leq x,\ y'\leq y}\, I_{Оріг}\,(x', y') \qquad (4.1.)$$

Каскадні класифікатори працюють поетапно, приймаючи важливі рішення: якщо підрегіон містить об'єкт, операція вважається завершеною і переходить до наступного етапу, якщо ні – відкидається. Згідно з Віолою та Джонсон, більшість підрегіонів, які дають негативний результат (не обличчя / не очі), можна швидко відхилити на ранніх етапах каскаду, що дозволяє зосередити увагу на позитивних прикладах (обличчя/очі). Однак каскад Гаара має кілька обмежень. По-перше, він може бути неефективним при виявленні облич при поганому освітленні, що призводить до високих рівнів хибних спрацьовувань або низької точності виявлення. Крім того, каскад Гаара може не зуміти виявити обличчя, які частково приховані, наприклад, за окулярами або капелюхами. Останнім обмеженням є труднощі з виявленням облич у зображеннях, де є великі зміни кута або складні вирази обличчя [29].

Метод гістограми орієнтованих градієнтів є потужним інструментом для виявлення об'єктів на зображеннях. Запропонований Далалом і Тріггсом у дослідженні "Гістограми орієнтованих градієнтів для виявлення людей" [30], цей метод передбачає розбиття зображення на клітини та обчислення орієнтації градієнтів для кожного пікселя. Далі будуються гістограми орієнтацій градієнтів для кожного блоку клітин, що дозволяє представити зображення у вигляді вектора дескрипторів гістограми орієнтованих градієнтів. Це подання використовують для навчання класифікаторів, таких як машини опорних векторів.

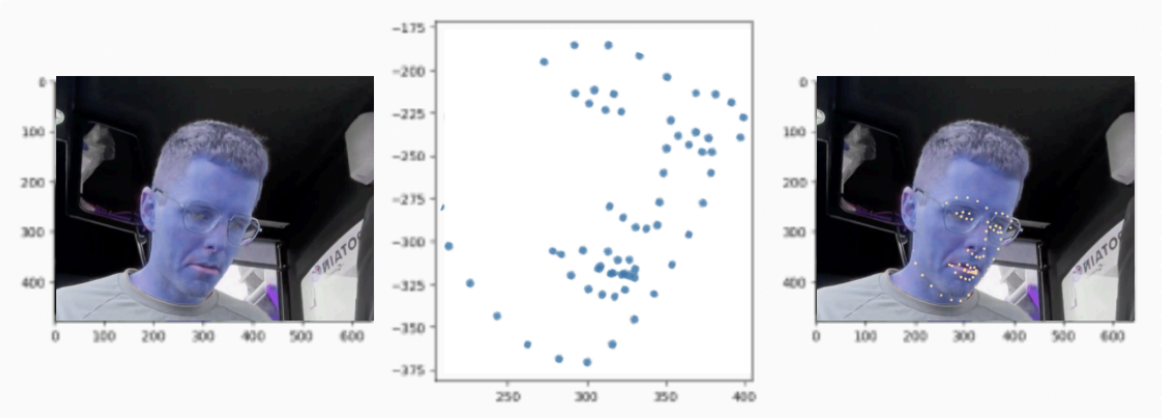
Спочатку, для спрощення процесу, зображення перетворюється в градацію сірого, а далі процес полягає у порівнянні темряви поточного пікселя з навколишніми, що допомагає визначити напрямок до більш темних областей. Аналізуючи зображення в квадратах по 16×16 пікселів, можна виявити основні патерни світла й темряви. Кількість градієнтів, спрямованих у різні напрямки, фіксується, і ці напрямки позначаються на зображенні.

На етапі вилучення ознак ключова увага приділялася двом областям на вхідних фотографіях: очам та роту. Це було необхідно для розпізнавання стану очей (відкриті/закриті) та ідентифікації позіхання. Основними індикаторами втоми слугували тривалість заплющення очей та частота позіхання. Наприклад, система сигналізувала про можливу втому, якщо очі водія залишалися заплющеними понад 5 секунд, або якщо він позіхав більше трьох разів протягом хвилини. Важливо зазначити, що ці порогові значення базуються на поширених проявах сонливості, однак не враховують впливу інших зовнішніх факторів, що можуть спричиняти втому водія.

Для реалізації цього завдання було застосовано каскадні класифікатори Хаара, які виконують детекцію об'єктів шляхом аналізу розподілу інтенсивності пікселів зображення. Для точної локалізації областей рота та очей використовувався інструмент вилучення ключових точок обличчя, що дозволяє ідентифікувати 68 точок-орієнтирів.

Ці точки, представлені у вигляді (x, y) координат, відповідають різним рисам обличчя та допомагають у визначенні конкретних зон. Процес екстракції обличчя та виявлення ключових точок продемонстровано на рис. 4.3а. Для підкреслення важливих для детекції зон було також визначено центроїд області інтересу (англ. Region of Interest, ROI), що охоплює очі та рот (рис. 4.3б).

а)



б)

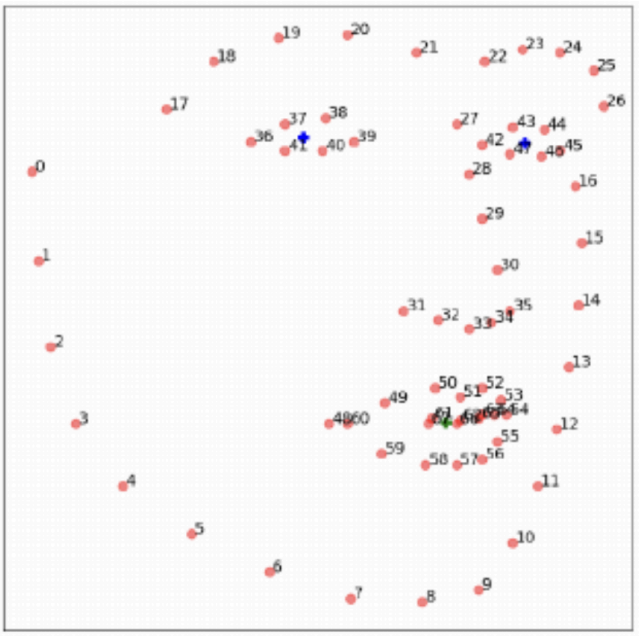


Рис. 4.3. а) Розпізнавання рис обличчя та б) локалізація для вилучення ознак.

Навчання моделі згорткової нейронної мережі (англ. CNN) проводилося протягом 20 епох з використанням навчального та валідаційного наборів даних. Протягом навчання спостерігалася стабільна динаміка покращення продуктивності: зростання точності та зменшення значення функції втрат. У підсумку, модель CNN досягла точності 95,80% на навчальному наборі та 96%

на валідаційному. Графіки залежності функції втрат та точності від кількості епох для обох наборів даних представлені на рис. 4.4 та рис. 4.4 відповідно.

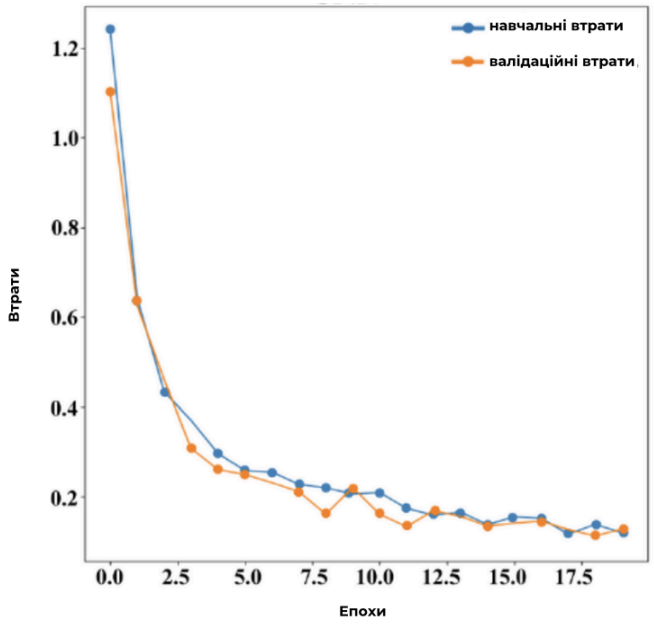


Рис. 4.3. Графік залежності функції втрат від кількості епох

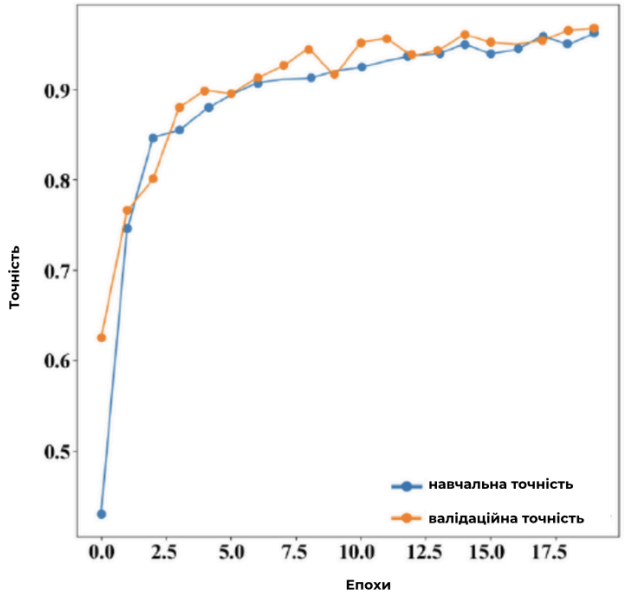


Рис. 4.4. Графік залежності функції точності від кількості епох

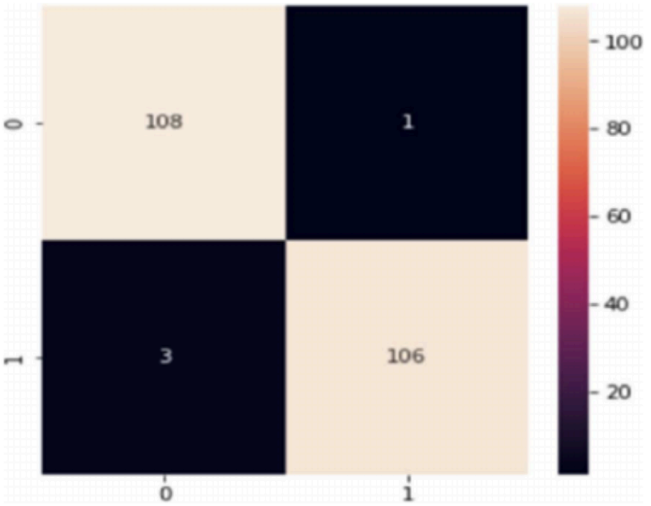


Рис. 4.5. Матриця невідповідностей моделі згорткової нейронної мережі

Кількість епох є ключовим параметром у навчанні глибоких моделей, оскільки вона визначає, скільки разів модель обробляє повний навчальний набір даних. Збільшення кількості епох може підвищувати точність моделі, але лише до певної межі. Тому визначення оптимальної кількості епох було важливим для досягнення найкращої продуктивності. Для цього відстежувалася точність на валідаційному наборі даних під час навчання, і було обрано таку кількість епох, яка забезпечила максимальну валідаційну точність, уникаючи при цьому перенавчання моделі.

Оскільки ефективне виявлення втоми кранівника значною мірою залежить від точності аналізу мімічних характеристик, важливим аспектом є вибір відповідного обладнання для обробки відеопотоку в реальному часі. Системи, що застосовують методи розпізнавання обличчя та аналізу стану очей, потребують високої обчислювальної потужності та швидкодії, особливо в умовах змінного освітлення та різних положень голови. Саме тому у цьому дослідженні було обрано апаратну платформу, здатну забезпечити швидку та стабільну роботу алгоритмів виявлення втоми.

Функціональна схема системи для моніторингу стану оператора баштового крану, наведена на Рисунку 4.6. та ілюструє принцип її роботи. Центральним елементом виступає плата Raspberry Pi 4 Model B, до якої підключені основні компоненти, зокрема камера для спостереження за

кранівником і модуль оповіщення, що сигналізує про виявлену втому. За допомогою промислових інтерфейсів таких як RS-232 або RS-485 плата підключається до програмованого логічного контролера (ПЛК) який управляє приводами баштового крану і у разі небезпеки зупиняє його роботу. Ця система поєднує технології обробки зображень і комунікації, створюючи ефективний механізм підвищення безпеки кранівника.

Пристрій у реальному часі розпізнає обличчя кранівника за допомогою камери. Алгоритм, розроблений на мові Python із використанням бібліотеки OpenCV, аналізує ознаки втоми або сонливості. У разі виявлення ознак перевтоми активується візуальне сповіщення, а за необхідності – звуковий сигнал.

Рис. 4.6. Функціональна схема системи для моніторингу стану оператора баштового крану

Для додаткової безпеки можуть бути застосовані розширені функції, зокрема автоматичне вмикання аварійних вогнів для привернення уваги інших працівників або надсилання екстреного SMS керівництву чи медичній службі.

Після встановлення операційної системи Raspbian, бібліотеки OpenCV та іншого необхідного програмного забезпечення, система на базі Raspberry Pi 4

була інтегрована в кабіну баштового крану для проведення експериментальних випробувань. До плати були підключені камера для моніторингу оператора, модуль звукової сигналізації. Головною метою тестування було оцінити ефективність розпізнавання стану оператора за допомогою аналізу його обличчя та поведінкових факторів.

На першому етапі система аналізувала відеопотік з камери для ідентифікації оператора крана та відокремлення його обличчя від навколишнього середовища. Далі, застосовуючи методи машинного зору та алгоритми аналізу орієнтації голови, проводилося визначення напрямку погляду оператора. Якщо виявлялося, що оператор має ознаки сонливості або втрати свідомості, система активувала попередження. На Рисунку 4.7. представлена загальна структура такої системи.

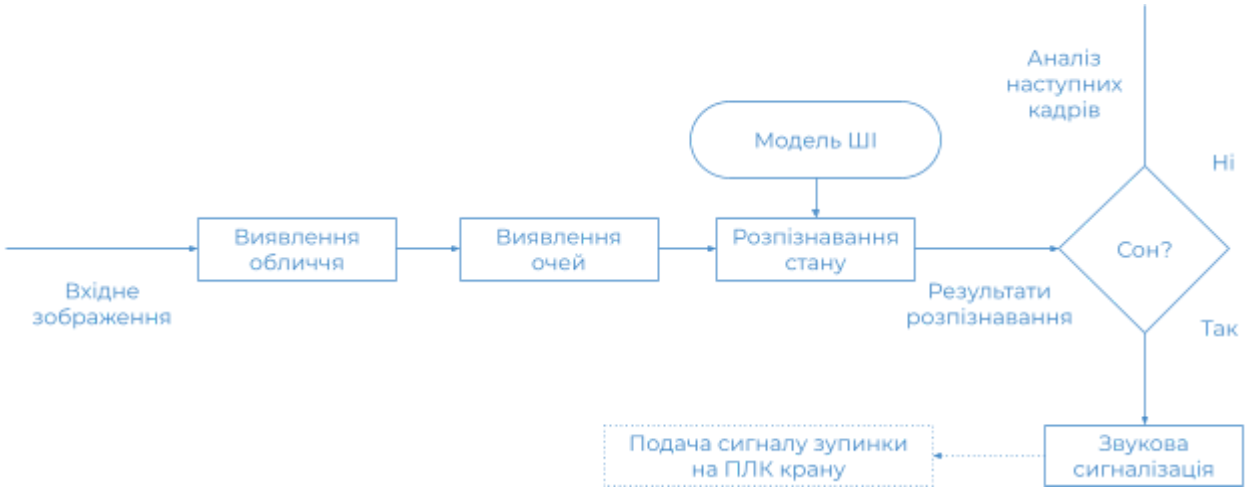


Рис. 4.7. Процес моніторингу стану оператора баштового крану

На рисунку 4.8. показана початкова конфігурація системи в кабіні баштового крану, де систему було закріплено у зручному місці для забезпечення належного огляду камери. Оператор працює в звичайному режимі, і система відстежує його рухи за допомогою методів розпізнавання обличчя та ключових

точок. Якщо оператор відволікається, наприклад, довго не відкриває очі, система активує візуальне попередження.

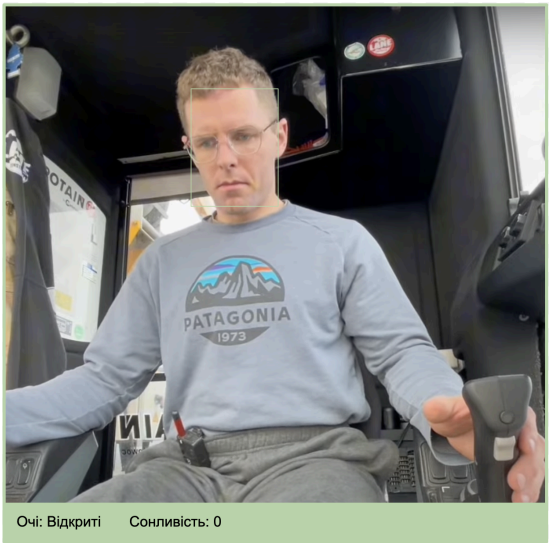


Рис. 4.8. Оператор працює в звичайному режимі

На рисунку 4.9. показано ситуацію, коли оператор починає відчувати сонливість. Система фіксує, що очі оператора не розпізнаються або розпізнаються зачиненими впродовж більш 5 секунд. У таких випадках автоматично вмикається звукова сигналізація.

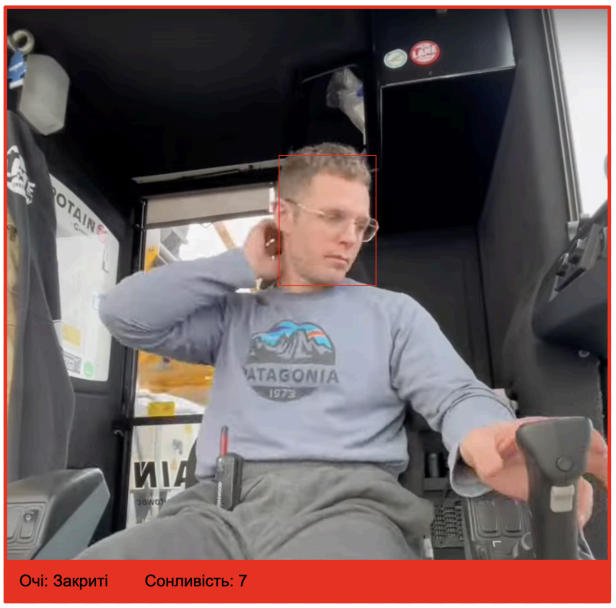


Рис. 4.9 Система розпізнала сонливість оператора

Система також була протестована в умовах недостатнього освітлення, що є критичним для роботи в нічний час або у приміщеннях з обмеженим доступом до світла. Випробування показали, що алгоритми ефективно розпізнавали ознаки втоми навіть у складних умовах освітлення, що значно підвищує безпеку операторів під час тривалих змін.

На завершальному етапі було протестовано ситуації, коли обличчя оператора не виявлялося камерою. Якщо система не розпізнавала обличчя під час роботи крана, вона активувала аварійне попередження, що могло свідчити про можливу втрату свідомості або вихід оператора з кабіни під час роботи механізму. У разі, якщо кран перебував у стані спокою, система залишалася в режимі очікування, продовжуючи відстежувати наявність оператора в кабіні.

Ці експерименти підтвердили ефективність системи моніторингу стану оператора баштового крана, що дозволяє значно знизити ризики, пов’язані з втомою або неуважністю, та підвищити загальний рівень безпеки на будівельних майданчиках.

Проведене дослідження підкреслює критичну важливість питання безпеки при експлуатації баштових кранів, особливо з огляду на значний вплив людського фактора.

Робота оператора баштового крана пов'язана з високою відповідальністю та потребує максимальної концентрації уваги, що є особливо складним завданням для працівників старшого віку, які складають значну частину професії кранівника. Враховуючи умови роботи на значній висоті та потенційні наслідки помилок, розробка та впровадження систем, спрямованих на контроль стану оператора, є нагальною необхідністю.

Представлене дослідження пропонує шляхи вирішення цієї проблеми шляхом розробки та впровадження системи машинного зору, здатної в реальному часі аналізувати стан оператора та ідентифікувати ознаки втоми, сонливості або втрати свідомості. Запропонована система, інтегрована з системами керування краном, здатна не тільки попереджати оператора про

небезпеку, але й автоматично вживати заходів для запобігання аварійним ситуаціям, аж до зупинки роботи крана та сповіщення відповідних служб.

У процесі дослідження було встановлено, що людський фактор є однією з провідних причин виникнення аварій на будівельних майданчиках за участю баштових кранів, на нього припадає до 60% усіх інцидентів. Значну частину серед них становлять аварії, пов’язані із втомою, сонливістю та втратою пильності операторів. З огляду на це, у роботі було запропоновано та реалізовано інтелектуальну підсистему моніторингу стану оператора в режимі реального часу, що дозволяє проактивно виявляти ознаки втоми та вживати запобіжних заходів, включаючи автоматичну зупинку обладнання в разі виявлення критичного стану.

На основі статистичних оцінок та результатів експериментального моделювання встановлено, що впровадження такої підсистеми дозволяє знизити ризик аварій, зумовлених втомою оператора, щонайменше на 80%. З урахуванням того, що на втому та зниження уваги припадає близько 50% усіх інцидентів, пов’язаних з людським фактором, загальне підвищення рівня безпеки експлуатації баштового крану оцінюється на рівні 18%. Це свідчить про доцільність інтеграції системи розпізнавання втоми до складу сучасних автоматизованих систем безпеки вантажопідіймальних машин.

4.1 Висновки до розділу 4

У розділі на основі аналізу статистичних даних підтверджено, що людський фактор, зокрема втома та сонливість оператора, є причиною до 60% аварій баштових кранів. Виявлено, що на відміну від автомобільної індустрії, у крановій галузі практично відсутні технологічні рішення для моніторингу психофізіологічного стану оператора, що створює значні ризики для безпеки.

Для мінімізації цих ризиків розроблено інтелектуальну підсистему моніторингу стану оператора в режимі реального часу. В основі підсистеми лежить удосконалена математична модель, що поєднує методи машинного зору (каскади Гаара) для локалізації рис обличчя та згорткову нейронну мережу для класифікації стану оператора. Розроблена модель продемонструвала високу ефективність, досягнувши точності класифікації 96% на валідаційному наборі даних.

Підсистема, реалізована на апаратній платформі Raspberry Pi, в режимі реального часу ідентифікує ознаки втоми (тривале заплющення очей, позіхання), активує систему візуального та звукового сповіщення, а також надсилає сигнал на програмований логічний контролер для автоматичної зупинки роботи крана у разі виявлення критичного стану.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОБУДОВИ АРХІТЕКТУРИ БЕЗПЕКИ КРАНУ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1. Обґрунтування експлуатації інтелектуальних систем безпеки

Попередні розділи даної дисертаційної роботи були присвячені всебічному аналізу проблем безпеки експлуатації баштових кранів, де було виявлено ключові фактори ризику, включаючи людський фактор, вплив конструктивних дефектів та зовнішніх умов, а також розробці концептуальних засад та окремих інтелектуальних підсистем на основі технологій штучного інтелекту, спрямованих на мінімізацію цих ризиків. Кожна з цих розробок продемонструвала високий потенціал у вирішенні вузькоспеціалізованих завдань моніторингу, діагностики та попередження небезпечних станів.

Проте, для досягнення якісно нового, комплексного рівня безпеки та оптимізації експлуатації баштових кранів, а також для реалізації синергетичного ефекту від взаємодії розроблених інтелектуальних модулів, необхідним та логічним кроком є їх об'єднання в єдиний, інтегрований комплекс – інтелектуальну систему безпеки (ІІСБ), що функціонує на базі спільної цифрової платформи. Такий підхід дозволяє перейти від локального контролю окремих параметрів до цілісного управління безпекою, враховуючи складні взаємозв'язки між різними факторами ризику.

Стратегія експлуатації ІІСБ передбачає відхід від реактивного реагування на інциденти до проактивного управління безпекою. Завдяки використанню алгоритмів машинного навчання та прогностичного моделювання, система здатна передбачати розвиток небезпечних ситуацій на ранніх стадіях їх виникнення. Це стосується як прогнозування ймовірності зниження пильності

оператора, так і завчасного попередження про наближення критичних вітрових умов або про потенційну відмову технічних компонентів крана. Така прогностична функція дозволяє вживати превентивних заходів, мінімізуючи ймовірність аварій та їхніх катастрофічних наслідків.

Важливою перевагою запропонованої стратегії є адаптивність та здатність до самонавчання системи. Алгоритми штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, що використовуються в ІІСБ, мають здатність навчатися на основі накопичених даних про реальні умови експлуатації, різні режими роботи, реакції системи та оператора. Це дозволяє системі з часом покращувати точність своїх діагностичних та прогностичних моделей, адаптуватися до специфіки конкретної моделі крана, умов будівельного майданчика та навіть, у певних межах, до індивідуального стилю роботи оператора, постійно підвищуючи ефективність своїх захисних функцій та надійність.

Ефективне функціонування інтегрованої інтелектуальної системи безпеки (ІІСБ) та досягнення поставлених цілей щодо кардинального підвищення рівня безпеки експлуатації баштових кранів значною мірою залежать від чіткого визначення ролей користувачів, їхніх обов'язків, прав доступу до інформації та функцій системи, а також від розробки та неухильного дотримання протоколів взаємодії з системою. Структурований підхід до розподілу відповідальності та інформаційних потоків є запорукою злагодженої роботи системи "людина-машина-середовище" в контексті ІІСБ. Основні ролі користувачів, їхні обов'язки, характер інформаційної взаємодії з ІІСБ та ключовий внесок у забезпечення інтегрованої безпеки представлено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Ролі користувачів та протоколи взаємодії з інтегрованою інтелектуальною системою безпеки

Роль користувача	Основні обов'язки та відповідальність у контексті ІІСБ	Типова інформаційна взаємодія з ІІСБ
Оператор баштового крана (Кранівник)	Здійснення керування краном під безперервним контролем ІІСБ; негайне та адекватне реагування на всі візуальні, звукові та інші попереджувальні сигнали системи; суворе дотримання рекомендацій ІІСБ щодо безпечних режимів роботи, обмежень швидкості та робочої зони; виконання процедур передзмінної перевірки працездатності ІІСБ; оперативне інформування відповідальних осіб про будь-які збої або нештатну роботу ІІСБ.	Через спеціалізований інтерфейс (сенсорний дисплей, світлозвукові індикатори) отримує в режимі реального часу: інформацію про поточний рівень власної пильності та ознаки втоми; актуальний прогноз вітрових навантажень та рекомендовані обмеження; дані про технічний стан критичних вузлів крана; узагальнену оцінку поточного рівня безпеки та комбінованих ризиків.
Інженер з охорони праці / Менеджер з безпеки на будівельному майданчику	Здійснення загального моніторингу стану безпеки на об'єкті; аналіз ефективності функціонування ІІСБ та її впливу на рівень безпеки; контроль за дотриманням персоналом правил експлуатації системи; участь у розслідуванні інцидентів, де була задіяна ІІСБ; розробка та періодична актуалізація локальних інструкцій з безпеки та протоколів реагування на	Має розширений доступ до аналітичних модулів та баз даних ІІСБ через веб-інтерфейс або спеціалізоване ПЗ. Отримує узагальнені звіти про інциденти, частоту та типи спрацювань попереджувальних систем, агреговану статистику небезпечних станів операторів (з

	сигнали ІІСБ; контроль за своєчасним проходженням операторами навчання.	дотриманням конфіденційності), дані про ефективність предиктивного обслуговування.
Інженерно-технічний персонал служби технічного обслуговування та ремонту (Головний механік, механіки, електрики, наладчики)	Забезпечення підтримки належного технічного стану як самого баштового крана, так і всіх компонентів ІІСБ. Здійснення планового, предиктивного та, за необхідності, позапланового технічного обслуговування крана на основі даних та рекомендацій ІІСБ; проведення діагностики та оперативного усунення несправностей кранового обладнання; виконання робіт з технічного обслуговування, калібрування, діагностики та заміни сенсорів, обчислювальних модулів ІІСБ.	Отримує від ІІСБ деталізовані діагностичні звіти про стан вузлів та механізмів крана, прогнози залишкового ресурсу окремих компонентів, конкретні рекомендації щодо термінів, обсягів та пріоритетності необхідних сервісних та ремонтних робіт, доступ до повної історії технічного стану обладнання та проведених обслуговувань через спеціалізований інтерфейс.
Керівництво будівельного підприємства / Керівники будівельних проектів та дільниць	Прийняття стратегічних рішень щодо впровадження, фінансування, модернізації та розвитку систем безпеки на підприємстві; здійснення загального контролю за показниками безпеки, ефективності та дотримання нормативних вимог; забезпечення необхідними ресурсами для повноцінного функціонування ІІСБ.	Отримує узагальнені аналітичні звіти та дашборди (через веб-інтерфейс або мобільні додатки) про ключові показники безпеки на підприємстві/об'єкті, агреговану статистику попереджених інцидентів та аварій, дані про економічний ефект від функціонування ІІСБ (зниження витрат,

		зменшення простоїв, відсутність штрафів).
Представники сервісної служби / Розробники системи	Забезпечення технічної підтримки ІІСБ; проведення планових оновлень програмного забезпечення та алгоритмів ШІ; діагностика та усунення складних несправностей самої інтегрованої системи; надання консультацій та навчання для інших категорій користувачів; аналіз даних для подальшого вдосконалення системи.	Мають повний адміністративний доступ до системних логів, конфігураційних файлів, баз даних та діагностичних інструментів ІІСБ для глибокого аналізу її роботи, виявлення аномалій та проведення робіт з її оптимізації та розвитку.

Чітко визначені ролі та відповідальність кожного користувача, у поєднанні з регламентованими протоколами взаємодії, є запорукою не лише ефективного використання функціональних можливостей інтегрованої інтелектуальної системи безпеки, але й формування культури безпеки на всіх рівнях управління будівельним процесом. Такий підхід дозволяє перетворити ІІСБ з набору технологічних рішень на дієвий інструмент системного запобігання аварійності. При цьому ключовими етапами впровадження будь-якої інформаційно-керуючої системи є її всебічне моделювання та вирішення проблем комплексних випробувань для підтвердження функціональної безпеки та надійності [150-151].

5.2. Вимоги до функціоналу та архітектури систем забезпечення безпеки експлуатації баштових кранів

Даний розділ є логічним розвитком досліджень, представлених у попередніх розділах дисертаційної роботи, де було розроблено окремі інтелектуальні системи, орієнтовані на вирішення конкретних завдань забезпечення безпеки експлуатації баштових кранів. Зокрема, йдеться про систему розпізнавання сонливості оператора, систему прогнозування вітрових навантажень та систему предиктивного обслуговування. Кожна з цих систем, що базується на застосуванні сучасних методів штучного інтелекту, продемонструвала свою ефективність у відповідній предметній області. Проте, для досягнення максимального рівня безпеки та ефективності експлуатації баштових кранів, а також для реалізації синергетичного ефекту, доцільно об'єднати розрізнені системи в єдиний, інтегрований комплекс, що функціонує як єдине ціле.

Необхідність інтеграції розроблених систем в єдиний комплекс зумовлена, насамперед, комплексним характером загроз безпеці баштових кранів. Аварійні ситуації, як правило, є наслідком комбінованого впливу декількох факторів ризику, що належать до різних категорій: людський фактор (помилки оператора, зумовлені втомою, сонливістю, неуважністю), технічні фактори (конструктивні дефекти, знос обладнання) та зовнішні чинники (несприятливі погодні умови, сейсмічні впливи). Більше того, різні фактори ризику не є незалежними, а перебувають у складному взаємозв'язку. Наприклад, стан втоми оператора може посилюватися несприятливими погодними умовами (сильним вітром, низькою температурою), а наявність прихованого конструктивного дефекту може значно підвищувати ризик перекидання крана при сильних поривах вітру. Інтеграція окремих систем в єдиний комплекс дозволяє створити централізовану систему управління безпекою, що забезпечує комплексну оцінку ризиків з урахуванням взаємозв'язку між різними

факторами, координоване реагування на виникаючі загрози, оптимізацію робочих процесів з урахуванням усіх факторів ризику, а також централізований збір та аналіз даних для виявлення системних проблем та подальшого вдосконалення системи безпеки. Об'єднання окремих систем в єдиний комплекс дозволяє отримати синергетичний ефект, коли загальна ефективність системи перевищує суму ефективностей її окремих компонентів. Наприклад, дані, отримані від системи прогнозування вітрових навантажень, можуть бути використані системою предиктивного обслуговування для коригування графіка технічного обслуговування з урахуванням очікуваних навантажень на конструкцію крана.

Пропонована інтегрована система безпеки баштового крана має ієрархічну, модульну архітектуру. На нижньому рівні знаходяться три підсистеми, розроблені в попередніх розділах: підсистема розпізнавання сонливості оператора, що отримує та аналізує дані з відеокамери, встановленої в кабіні крана; підсистема прогнозування вітрових навантажень, що обробляє дані з метеостанції, датчиків вітру, встановлених на крані, а також, потенційно, інформацію з чисельних моделей прогнозу погоди; та підсистема предиктивного обслуговування, що аналізує дані від датчиків, встановлених на критичних елементах конструкції крана (датчики вібрації, температури, деформації, навантаження), а також дані про напрацювання та режими експлуатації. Кожна з підсистем оснащена власним обчислювальним модулем на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi та спеціалізованим програмним забезпеченням, що реалізує відповідні алгоритми машинного зору, глибокого навчання та обробки даних. Підсистеми функціонують як автономно, вирішуючи свої локальні завдання, так і взаємодіють між собою та з центральним центром управління та моніторингу, обмінюючись даними та керуючими сигналами.

Центр управління та моніторингу є верхнім рівнем ієрархії системи і виконує функції збору та консолідації даних від усіх підсистем, комплексної оцінки ризиків на основі інтегрованого аналізу отриманої інформації,

прийняття рішень щодо необхідності втручання в роботу крана (видача попереджувальних сигналів оператору, автоматичне обмеження режимів роботи, ініціація аварійної зупинки), візуалізації даних про стан крана, параметри навколишнього середовища, прогнози та рекомендації для оператора та диспетчера, а також ведення журналу подій та накопичення статистичної інформації.

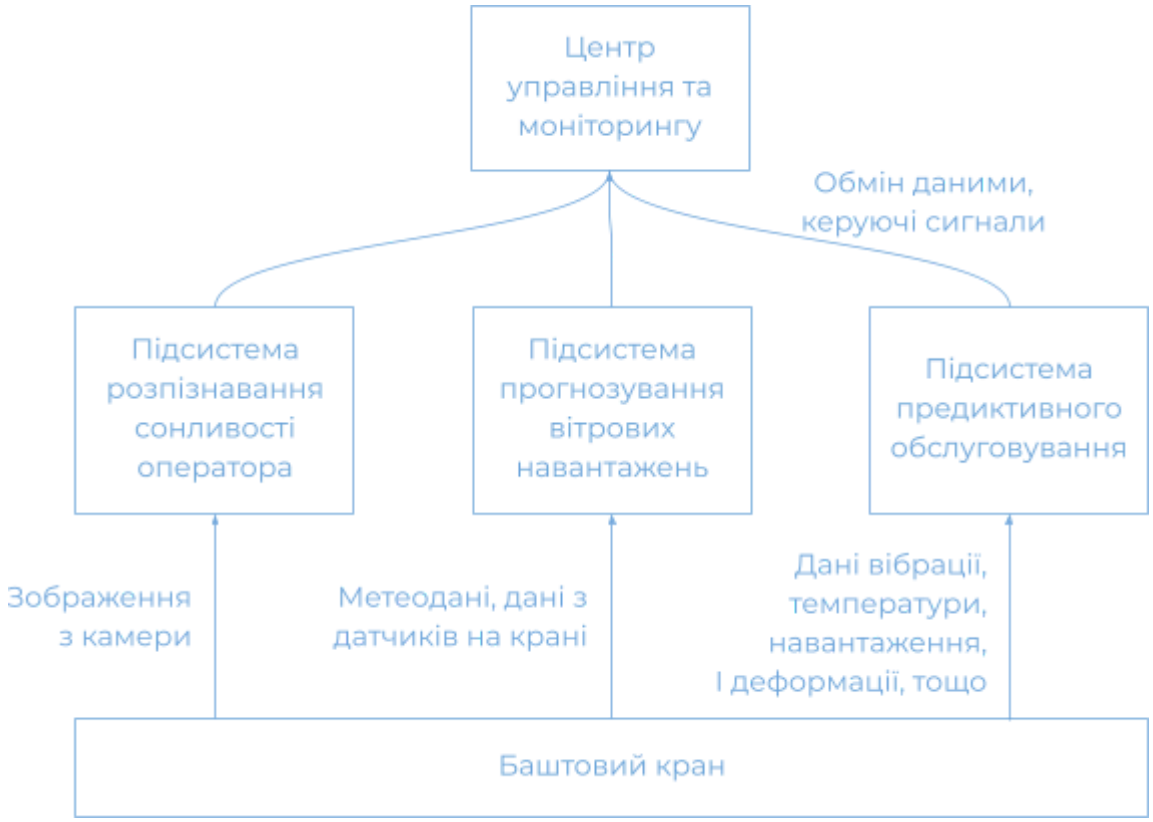


Рис. 5.1. Архітектура об’єднаної системи безпеки

Програмно-апаратна реалізація інтегрованої системи передбачає використання мережі одноплатних комп'ютерів як обчислювальної основи, що забезпечують необхідну продуктивність для роботи алгоритмів машинного зору, глибокого навчання та обробки даних в режимі реального часу. Окрім обчислювальних модулів, критично важливою є надійність всієї апаратної

платформи, включаючи забезпечення безперебійного електроживлення контролерів, питання вдосконалення якого розглянуто в [152].

Програмне забезпечення розробляється з використанням мови програмування Python та спеціалізованих бібліотек машинного навчання (таких як TensorFlow, PyTorch, Keras), комп'ютерного зору (OpenCV) та обробки даних (NumPy, Pandas). Інтерфейс користувача, що забезпечує візуалізацію даних, відображення попереджень та надання рекомендацій, може бути реалізований у вигляді веб-додатку або мобільного додатку, що забезпечує доступ до інформації як для оператора крана, так і для диспетчерського персоналу. Інтеграція з існуючими системами керування краном здійснюється за допомогою стандартних промислових протоколів передачі даних (наприклад, Modbus, CAN bus). При цьому архітектура ІІСБ має бути достатньо гнучкою, щоб взаємодіяти з різними типами приводів, включаючи сучасні гідравлічні системи, принципи проектування та оптимізації яких досліджено у роботах [153-154].

Ефективна взаємодія підсистем є ключовим аспектом функціонування інтегрованої системи безпеки. Алгоритми взаємодії базуються на принципах пріоритезації сигналів небезпеки (наприклад, сигнал про критичне вітрове навантаження має вищий пріоритет, ніж сигнал про необхідність планового технічного обслуговування), реалізації заздалегідь визначених сценаріїв реагування на різні комбінації загроз (наприклад, при одночасному виявленні ознак сонливості оператора та прогнозуванні сильного вітру система може автоматично обмежити швидкість роботи крана або ініціювати його зупинку), а також адаптації до змінних умов експлуатації (наприклад, автоматичне коригування параметрів прогнозування вітрового навантаження залежно від зміни конфігурації будівельного майданчика або автоматичне коригування графіка технічного обслуговування з урахуванням фактичного напрацювання та умов експлуатації). Підсистеми обмінюються даними для підвищення загальної точності та надійності системи.

Інтеграція розроблених інтелектуальних систем безпеки в єдиний комплекс дозволяє створити багаторівневу систему захисту баштового крана, що комплексно враховує як людський фактор, так і вплив зовнішніх чинників, а також технічний стан обладнання. Запропонована модульна, ієрархічна архітектура системи забезпечує її гнучкість, масштабованість та можливість адаптації до різних типів баштових кранів та специфічних умов експлуатації. Використання доступних обчислювальних платформ та сучасних бібліотек машинного навчання робить систему економічно доцільною для практичного впровадження. Подальший розвиток інтегрованої системи може бути спрямований на вдосконалення алгоритмів машинного навчання, розширення функціональності підсистем, а також на інтеграцію з зовнішніми системами управління будівельним майданчиком та іншими інформаційними системами.

5.3. Техніко-економічне обгрунтування ефективності інноваційних систем безпеки

Після детального обґрунтування стратегії експлуатації інтелектуальних систем безпеки баштових кранів, що базуються на технологіях штучного інтелекту, та формулювання комплексних вимог до їх функціоналу, архітектури та взаємодії компонентів, наступним логічним та необхідним етапом дослідження є проведення всебічного техніко-економічного обґрунтування (ТЕО). Дане ТЕО спрямоване на визначення економічної доцільності, інвестиційної привабливості та практичної значущості запропонованих інженерних рішень. Впровадження інтегрованої системи безпеки, що об'єднує підсистеми розпізнавання сонливості оператора, прогнозування вітрових навантажень та предиктивного обслуговування, розглядається як інноваційний проект, здатний не лише кардинально підвищити рівень безпеки експлуатації,

але й забезпечити суттєвий економічний ефект для будівельних підприємств. Успішне ТЕО є критично важливим для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо імплементації розробленої системи.

Метою даного техніко-економічного обґрунтування є комплексне аргументування економічної доцільності та господарської необхідності впровадження інтегрованої системи безпеки, засноване на порівняльному аналізі витрат і результатів, а також оцінці ефективності використання інвестиційних ресурсів.

Основні завдання ТЕО в рамках даного дослідження:

- Детальний розрахунок сукупних капітальних вкладень (IC), необхідних для проектування, придбання компонентів, монтажу, інтеграції, налагодження та навчання персоналу для повноцінного функціонування розробленої інтегрованої системи безпеки.
- Визначення щорічних експлуатаційних витрат ($OC_{рік}$), пов'язаних з безперебійною підтримкою працездатності, технічним обслуговуванням та оновленням нової системи протягом її життєвого циклу.
- Всебічна кількісна оцінка щорічного економічного ефекту ($E_{рік}$), що генерується системою за рахунок радикального зниження прямих і непрямих збитків від аварійних ситуацій та оптимізації процесів технічного обслуговування і ремонтів кранового обладнання.

Ефективність запропонованого інженерного рішення оцінюється шляхом детального порівняння двох ключових сценаріїв експлуатації баштових кранів:

1. Базовий варіант (поточний стан експлуатації) який характеризується використанням баштових кранів зі стандартними, традиційними системами безпеки, які не забезпечують комплексного проактивного захисту. Для цього варіанту використовуються статистичні дані щодо частоти та середньої вартості аварій, проаналізовані у Розділі 1 та 2, а також поточні витрати на переважно планово-попереджувальні ремонти та ліквідацію наслідків відмов обладнання.

2. Пропонований варіант (інноваційне рішення), що передбачає експлуатацію баштових кранів, оснащених розробленою інтегрованою

системою безпеки на основі штучного інтелекту. Ефективність цього варіанту оцінюється на основі прогнозованого радикального зниження аварійності (що підтверджується результатами експериментальних досліджень ефективності окремих підсистем, представлених у попередньому розділі), переходу до економічно вигіднішого предиктивного технічного обслуговування, а також необхідних капітальних та поточних експлуатаційних витрат на саму інтегровану систему.

Капітальні вкладення охоплюють усі необхідні одноразові витрати для повномасштабного впровадження інтегрованої системи безпеки на одному баштовому крані. Структура цих витрат формується на основі детального аналізу ринкових цін на необхідні компоненти, вартості розробницьких, монтажних та пусконалагоджувальних робіт, і оцінюється наступним чином:

- Апаратне забезпечення ($K_{обл}$): 165 000 грн (включаючи високоякісні відеокамери для системи розпізнавання сонливості, сучасний ультразвуковий анемометр для системи прогнозування вітрових навантажень, комплект спеціалізованих вібродатчиків та термодатчиків для предиктивного обслуговування критичних вузлів, обчислювальні модулі типу Raspberry Pi 4 для кожної підсистеми, потужний центральний моніторинговий та керуючий модуль (ЦМКМ) на базі промислового ПК, мережеве обладнання, сенсорну панель оператора).
- Програмне забезпечення ($K_{ПЗ}$): 215 000 грн (включаючи витрати на розробку та адаптацію унікальних алгоритмів штучного інтелекту для кожної підсистеми, розробку інтеграційного ПЗ для ЦМКМ, створення користувацьких інтерфейсів, а також вартість ліцензій на необхідні програмні продукти).
- Монтажні та пусконалагоджувальні роботи ($K_{мр}$): 50 000 грн (включаючи встановлення обладнання, прокладання комунікацій, інтеграцію з бортовими системами крана, калібрування датчиків та комплексне тестування системи).
- Навчання персоналу ($K_{навч}$): 30 000 грн (включаючи підготовку операторів кранів до роботи з новим інтерфейсом та функціоналом системи, а

також навчання інженерно-технічного персоналу основам обслуговування та діагностики).

- Інші капітальні витрати ($K_{інш}$): 40 000 грн (включаючи витрати на детальне проектування системи для конкретних моделей кранів, розробку експлуатаційної документації та можливі витрати на сертифікацію).

Загальні капітальні вкладення (ІС) розраховуються за формулою:

$$IC=K_{обл}+K_{ПЗ}+K_{мр}+K_{навч}+K_{інш} \quad (5.1)$$

Підставивши значення, отримуємо:

$$IC=165000+215000+50000+30000+40000=500\ 000\ грн. \quad (5.2)$$

Річні експлуатаційні витрати на підтримку безперебійної та ефективної роботи інтегрованої системи безпеки включають:

- Технічне обслуговування апаратних компонентів системи, періодична діагностика та повірка датчиків, заміна витратних матеріалів: 15 000 грн.
- Витрати на електроенергію для живлення додаткового обчислювального та сенсорного обладнання: 5 000 грн.
- Витрати на оновлення програмного забезпечення, підтримку баз даних, можливі витрати на канали зв'язку для віддаленого моніторингу та оновлень: 10 000 грн.

Разом $OC_{сис}$ (щорічні експлуатаційні витрати на систему) = 30 000 грн/рік.

Річний економічний ефект від впровадження інтегрованої системи безпеки є комплексним показником, що відображає сукупну вигоду від її функціонування. Він формується, головним чином, за рахунок значного зменшення збитків від аварій та інцидентів, а також оптимізації витрат на технічне обслуговування. Для розрахунку використовуються обґрунтовані

припущення щодо високої ефективності системи, підтвердженої результатами попередніх досліджень.

Економія від зниження аварійності ($E_{авар\_екон}$):

1. Людський фактор (ЛФ). Середня частота великих аварій, спричинених людським фактором (без впровадження системи): 1 аварія на 15 крано-років, що призводить до тяжких, часто катастрофічних наслідків. Середні прямі та непрямі збитки від однієї такої аварії ($C_{ЛФ}$): 10 000 000 грн. Ця сума враховує потенційні людські жертви та тяжкі травми (з відповідними компенсаціями та соціальними виплатами), вартість повного або часткового руйнування крана, значні пошкодження споруджуваного об'єкта та прилеглої інфраструктури, тривалі зупинки будівельних робіт (з відповідними штрафними санкціями та втраченою вигодою), судові витрати, страхові виплати та значні репутаційні втрати для будівельної компанії. Ефективність системи у запобіганні аваріям через ЛФ (на основі високої точності розпізнавання сонливості, підтвердженої експериментально у Розділі 2.2, та можливості проактивного втручання): 85%.

Зменшення кількості аварій на рік на 1 кран ($\Delta N_{ЛФ}$) розраховується як:

$$\Delta N_{ЛФ}=(\text{Частота аварій})\cdot(\text{Ефективність системи}) \quad (5.3)$$

$$\Delta N_{ЛФ}=(1/15)\cdot 0.85=0.0567 \text{ аварій/рік.} \quad (5.4)$$

Річна економія ($E_{ЛФ}$) визначається як:

$$E_{ЛФ}=\Delta N_{ЛФ}\cdot C_{ЛФ} \quad (5.5)$$

$$E_{ЛФ}=0.0567\cdot 10000000=567000 \text{ грн.} \quad (5.6)$$

2. Вітрові навантаження (ВН). Середня частота аварій через ВН (без системи): 1 аварія на 30 крано-років. Середні збитки ($C_{вітр}$): 7 000 000 грн (включаючи перекидання крана, значні руйнування металоконструкцій та обладнання). Ефективність системи у запобіганні аваріям через ВН (завдяки

точному прогнозуванню, підтвердженому у Розділі 2.6, та можливості автоматичного переведення стріли у флюгерне положення): 75%.

Зменшення кількості аварій (ΔNвітр):

$$\Delta N_{вітр}=(1/30)\cdot 0.75=0.025 \text{ аварій/рік на кран.} \quad (5.7)$$

Річна економія ($E_{вітр}$):

$$E_{вітр}=\Delta N_{вітр}\cdot C_{вітр}=0.025\cdot 7000000=175000 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

Конструктивні дефекти (КД). Середня частота великих відмов через КД (без системи): 1 відмова на 20 крано-років. Середні збитки (Сконстр): 3 000 000 грн (включаючи вартість складного ремонту або заміни критичних вузлів, тривалий простій). Ефективність системи предиктивного обслуговування у запобіганні відмов (завдяки ранньому виявленню дефектів, як показано у Розділі 2.4): 80%.

Зменшення кількості відмов ($\Delta N_{констр}$):

$$\Delta N_{констр}=(1/20)\cdot 0.80=0.04 \text{ відмов/рік на кран.} \quad (5.9)$$

Річна економія ($E_{констр}$):

$$E_{констр}=\Delta N_{констр}\cdot C_{констр}=0.04\cdot 3000000=120000 \text{ грн.} \quad (5.10)$$

Сумарна економія від зниження аварійності ($E_{авар\_екон}$):

$$E_{авар\_екон}=E_{ЛФ}+E_{вітр}+E_{констр} \quad (5.11)$$

$$E_{авар\_екон}=567000+175000+120000=862\ 000 \text{ грн/рік.} \quad (5.12)$$

Економія на технічному обслуговуванні та ремонтах ($E_{ТО\_екон}$):

Середні річні витрати на ТОіР (ППР та позапланові ремонти) без системи ($C_{ТОіР\_баз}$): 250 000 грн/кран.

Зниження витрат на ТОіР завдяки переходу на предиктивне обслуговування, оптимізації графіків та обсягів робіт, запобіганню каскадним відмовам: 60%.

Річна економія ($E_{ТО\_екон}$) розраховується як:

$$E_{ТО\_екон}=C_{ТОіР\_баз}\cdot(\%\ \text{зниження}) \quad (5.13)$$

$$E_{ТО\_екон}=250000\cdot 0.60=150\ 000\ \text{грн/рік}. \quad (5.14)$$

Економія від скорочення простоїв ($E_{прост}$). Середні річні збитки від простоїв через аварії та непланові ремонти ($Збитки_{прост\_баз}$): 200 000 грн/кран (втрачена вигода, штрафи за зрив термінів). Зниження простоїв завдяки проактивному запобіганню відмов та аварій: 70%.

Річна економія ($E_{прост}$) розраховується як:

$$E_{прост}=Збитки_{прост\_баз}\cdot(\%\ \text{зниження}) \quad (5.15)$$

$$E_{прост}=200000\cdot 0.70=140\ 000\ \text{грн/рік}. \quad (5.16)$$

Чистий щорічний економічний ефект ($E_{рік}$): Цей ефект розраховується як загальна сума економії за вирахуванням експлуатаційних витрат на саму систему.

$$E_{рік}=E_{авар\_екон}+E_{ТО\_екон}+E_{прост}-ОС_{сис} \quad (5.17)$$

$$E_{рік}=862000+150000+140000-30000=1\ 122\ 000\ \text{грн/рік}. \quad (5.18)$$

Окрім беззаперечних та виняткових економічних переваг, впровадження інтегрованої системи безпеки баштових кранів на основі штучного інтелекту

генерує неоціненний за своєю важливістю та масштабом соціальний ефект. Пряме збереження життя та здоров'я операторів баштових кранів, а також інших працівників, що перебувають на будівельному майданчику, та сторонніх осіб, що можуть опинитися в зоні можливого впливу аварії, є найвищим пріоритетом та фундаментальною цінністю будь-якого цивілізованого суспільства та відповідального бізнесу. Запобігання навіть одній серйозній аварії, що може призвести до людських жертв, має абсолютну цінність, яка не може бути адекватно виміряна жодними економічними показниками.

Проведене всебічне техніко-економічне обґрунтування, що базується на загальновизнаних методиках економічного аналізу інвестиційних проектів та враховує специфіку інноваційного характеру розробленої системи, однозначно демонструє надзвичайно високу економічну ефективність та виняткову соціальну значущість проекту впровадження інтегрованої системи безпеки баштових кранів на основі штучного інтелекту. Розрахунковий чистий щорічний економічний ефект у розмірі 1 122 000 грн на один модернізований баштовий кран, свідчить про те, що даний проект є не просто рентабельним, а швидкоокупним та стратегічно необхідним для будь-якого будівельного підприємства, що прагне до підвищення рівня безпеки, оптимізації операційної ефективності та зміцнення своїх конкурентних позицій на ринку.

Ключовим фактором, що зумовлює таку економічну ефективність, є здатність розробленої інтелектуальної системи комплексно та проактивно запобігати масштабним аваріям, фінансові наслідки яких можуть сягати десятків мільйонів гривень і, що найважливіше, нести пряму загрозу людським життям та здоров'ю. Інвестиції в запропоновану систему безпеки є прямими інвестиціями в стабільність та безперервність виробничих процесів, захист найціннішого активу – людського капіталу, та довгострокову фінансову стійкість і позитивну ділову репутацію будівельного підприємства. З огляду на отримані результати, впровадження даної інтегрованої системи безпеки є не тільки економічно виправданим та стратегічно доцільним, але й морально та

соціально відповідальним кроком, що рекомендований для широкого застосування у будівельній галузі України.

5.4. Висновки до розділу 5

1. Обґрунтовано стратегію експлуатації, що передбачає інтеграцію розроблених у попередніх розділах окремих інтелектуальних модулів (розпізнавання сонливості, прогнозування вітру, предиктивне обслуговування) в єдину інтелектуальну систему безпеки (ІІСБ). Дана стратегія забезпечує перехід від реактивного реагування на інциденти до проактивного управління безпекою та реалізує синергетичний ефект завдяки комплексному аналізу ризиків. Для забезпечення ефективного функціонування системи розроблено протоколи взаємодії та чітко визначено ролі й обов'язки ключових користувачів: оператора крана, інженера з охорони праці, інженерно-технічного персоналу, керівництва підприємства та представників сервісної служби, що створює основу для формування культури безпеки на всіх рівнях.
2. Розроблено вимоги до функціоналу та архітектури інтегрованої системи безпеки, яка має ієрархічну, модульну структуру. Нижній рівень складається з трьох автономних підсистем, що відповідають за моніторинг стану оператора, зовнішніх умов та технічного стану крана. Верхній рівень представлений центральним центром управління та моніторингу, який виконує функції збору та консолідації даних, комплексної оцінки ризиків та прийняття рішень. Програмно-апаратна реалізація базується на мережі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi), промислового ПК та використовує мову програмування Python зі спеціалізованими бібліотеками машинного навчання, що забезпечує гнучкість, масштабованість та економічну доцільність впровадження.

3. Проведено детальне техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) ефективності впровадження інтегрованої системи безпеки. Розраховано, що сукупні капітальні вкладення (ІС) на оснащення одного баштового крана становлять 500 000 грн, а щорічні експлуатаційні витрати (ОС) на підтримку системи – 30 000 грн. Водночас розрахунковий чистий щорічний економічний ефект (Е_рік) від функціонування системи складає 1 122 000 грн. Цей ефект досягається за рахунок суттєвого зниження прямих і непрямих збитків від попереджених аварій, спричинених людським фактором, вітровими навантаженнями та конструктивними дефектами, а також завдяки оптимізації витрат на технічне обслуговування (економія 150 000 грн/рік) та скорочення простоїв (економія 140 000 грн/рік).

4. Окрім високої економічної ефективності, обґрунтовано винятковий соціальний ефект від впровадження системи, який полягає у прямому збереженні життя та здоров'я операторів кранів, інших працівників будівельного майданчика та сторонніх осіб. Запобігання аваріям має абсолютну цінність, що не вимірюється економічними показниками. Враховуючи значний економічний ефект, швидку окупність інвестицій та найвищу соціальну значущість, впровадження розробленої інтегрованої інтелектуальної системи безпеки є не лише економічно виправданим, а й морально та соціально відповідальним кроком, що рекомендований для широкого застосування у будівельній галузі України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено системний аналіз науково-технічної літератури, стандартів безпеки та статистичних даних, що дозволив виявити та класифікувати ключові фактори ризику при експлуатації баштових кранів. Встановлено, що основними причинами аварійності є конструктивні дефекти, людський фактор та зовнішні впливи, зокрема вітрове навантаження. Визначено, що існуючі системи безпеки переважно функціонують у реактивному режимі, реагуючи на небезпечні ситуації вже після їх виникнення. Виявлено науково-технічний розрив, який полягає в тому, що інтелектуальні підходи для діагностики, моніторингу втоми та прогнозування вітру розвиваються ізольовано і не об'єднані в єдину систему. Це обґрунтувало необхідність створення інтегрованої інтелектуальної системи безпеки (ІІСБ) для проактивного управління ризиками.

2. Досліджено діагностичні параметри технічного стану механізмів крана, що дозволило обґрунтувати вибір вібрації та температури як ключових індикаторів для предиктивного обслуговування. Вперше отримано закономірності зміни цих параметрів, що пов’язують їх рівні з різними стадіями зносу. На основі цих закономірностей розроблено підсистему предиктивного обслуговування на базі глибокого навчання нейронної мережі. Розроблений програмно-апаратний модуль, що складається з вібродатчиків, датчиків температури та обчислювального блоку, продемонстрував здатність виявляти дефекти на ранніх стадіях з точністю прогнозування понад 90%, що дозволяє перейти від планово-попереджувальної системи до предиктивного обслуговування.

3. Розроблено математичну модель підсистеми моніторингу психофізіологічного стану оператора на основі методів машинного зору для розпізнавання втоми та сонливості в режимі реального часу. Створена система, реалізована на базі одноплатного комп’ютера Raspberry Pi та камери,

використовує згорткову нейронну мережу для ідентифікації втоми. Експериментально підтверджено високу ефективність розробленої підсистеми: середня точність розпізнавання стану оператора перевищила 96% при часі реакції менше однієї секунди. Система здатна інтегруватися з програмованим логічним контролером крана для автоматичної зупинки в разі виявлення небезпечного стану оператора.

4. Розроблено математичну модель прогнозування небезпечних вітрових навантажень на основі глибокого навчання нейронної мережі. Запропонована інтелектуальна система використовує дані з метеостанції та датчиків крана для короткострокового прогнозування швидкості та напрямку вітру. Експериментально підтверджено, що модель забезпечує високу точність прогнозування з середньою абсолютною процентною похибкою 16.27%. Розроблено алгоритми роботи підсистеми автоматичного превентивного керування стійкістю крана, яка в разі прогнозування небезпечного пориву вітру здатна автоматично повертати стрілу у флюгерне положення для мінімізації аеродинамічного опору, що суттєво підвищує безпеку.

5. Розроблено архітектуру інтегрованої інтелектуальної системи безпеки крана (ІІСБ), яка об'єднує підсистеми предиктивного обслуговування, моніторингу стану оператора та прогнозування вітрових навантажень. Запропонована система має ієрархічну модульну структуру, де нижній рівень складається з трьох автономних підсистем на базі одноплатних комп'ютерів, а верхній представлений центральним центром управління та моніторингу. Розроблено протоколи взаємодії для ключових користувачів, що забезпечує комплексний підхід до управління ризиками та створює синергетичний ефект.

6. Проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованої ІІСБ на прикладі баштового крану КБ-403. Розраховано, що при сукупних капітальних вкладеннях у 500 тис. грн, щорічний економічний ефект від впровадження системи на одному крані становить 1,122 млн. грн. Цей ефект досягається за рахунок суттєвого зниження збитків від попереджених аварій, оптимізації витрат на технічне обслуговування та

скорочення простоїв. Окрім високої економічної ефективності, обґрунтовано винятковий соціальний ефект, який полягає у прямому збереженні життя та здоров'я людей. Таким чином, впровадження розробленої системи є економічно виправданим та соціально відповідальним кроком.

Подальші напрямки наукових досліджень можуть бути спрямовані на подальше вдосконалення та оптимізацію алгоритмів машинного навчання, розширення функціональних можливостей окремих підсистем та платформи в цілому, а також на дослідження та розробку повністю автономних систем керування баштовими кранами, що функціонують на основі технологій штучного інтелекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kim J., Kim G. Importance Ranking of Accident Factors of Construction Tower Crane by AHP Technique. Journal of Building Construction and Planning Research. 2020. Vol. 8. P. 237–244. DOI: 10.4236/jbcpr.2020.84015.
2. Yang Y., Shao B., Jin L., Zheng X. Collaborative Governance of Tower Crane Safety in the Chinese Construction Industry: A Social Network Perspective. Buildings. 2022. Vol. 12, No. 6. Article 836. https://doi.org/10.3390/buildings12060836.
3. 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.
4. Іваненко О. І., Щербак О. В., Любімов Ю. Ю. Комп'ютерне моделювання стійкості на моделі баштового крана на основі визначення опорних реакцій. Наукові вісті Далівського університету. 2020. № 18. ISSN 2222-3428. URL: http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/2020-18-6.pdf
5. Herrera-Pérez V., Salguero-Caparrós F., Pardo-Ferreira M. del C., Rubio-Romero J. C. Key Factors in Crane-Related Occupational Accidents in the Spanish Construction Industry (2012– 2021). International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. № 22. P. 7080. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph20227080.
6. Zhang X., Zhang W., Jiang L., Zhao T. Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. Journal of Construction Engineering and Management. 2020. Vol. 146, No. 7. Article 4020071. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001860 .
7. Chen Y., Zeng Q., Zheng X., Shao B., Jin L. Safety supervision of tower crane operation on construction sites: An evolutionary game analysis. Safety Science. 2022. Vol. 152. Article 105578. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105578.

8. Горбатюк Є., Міщук Д., Булавка О., Волянюк В. Аналіз досліджень стаціонарних баштових кранів при вітрових навантаженнях. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2023. № 102. С. 17–23. DOI: https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0201.

9. Krupko I., Ivanenko O., Yermakova S. Substantive provisions of improvement of methods of calculation of loads on carrying and propelling devices of lifting and transport machines. Norwegian Journal of Development of the International Science. 2021. Vol. 1, № 57. P. 54–59. ISSN 3453-9875. DOI: https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-57-1-54-59.

10. Горбатюк Є., Булавка О. Огляд і аналіз пошкоджень та існуючих систем захисту баштових кранів під впливом вибухової хвилі. Автомобільний транспорт. 2024. № 53. С. 13–22. DOI: https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.02.

11. Dhalmahapatra K., Shingade R., Mahajan H., Verma A., Maiti J. Decision support system for safety improvement: An approach using multiple correspondence analysis, t-SNE algorithm and K-means clustering. Computers & Industrial Engineering. 2019. Vol. 128. P. 277–289. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.044 .

12. Kim J. Y., Lee D. S., Kim J. D., Kim G. H. Priority of Accident Cause Based on Tower Crane Type for the Realization of Sustainable Management at Korean Construction Sites. Sustainability. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su13010242 .

13. Khodabandelu A., Park J., Arteaga C. Crane operation planning in overlapping areas through dynamic supply selection. Automation in Construction. 2020. Vol. 117. Article 103253. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103253 .

14. Li X., Chi H., Wu P., Shen G.Q. Smart work packaging-enabled constraint-free path replanning for tower crane in prefabricated products assembly process. Advanced Engineering Informatics. 2020. Vol. 43. Article 101008. https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101008 .

15. Sadeghi S., Soltanmohammadlou N., Rahnamayiezekavat P. A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements. Safety Science. 2021. Vol. 133. Article 105002. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105002 .

16. Zhang X., Zhang W., Jiang L., Zhao T. Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. Journal of Construction Engineering and Management. 2020. Vol. 146. No. 7. Article 4020071. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001860 .

17. Zhou W., Zhao T., Liu W., Tang J. Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective. Safety Science. 2018. Vol. 109. P. 95-108. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.001 .

18. Мойсеєнко В.І. Оперативна ідентифікація та локалізація небезпек у процесітехнічної експлуатації цифрових систем керування рухом поїздівна основі концепції ризик-менеджменту / В.І.Мойсеєнко, В.В.Гаєвський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2020. – № 4. – С. 28-35. https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i4.219535

19. Бабенко А. О. До питання забезпечення безпеки руху у пасажирському господарстві: /І.Е. Мартинов, В.М. Петухов, А.В. Труфанова, А.О. Бабенко, В.О. Шовкун // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Вип. 190. – С. 50-60. https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.214169

20. Бабенко А. О. Модернізація навісного пристрою для перевантаження вантажів у кіпах / Л.М. Козар, Є.В. Романович, А.М. Кравець, Бабенко А.О. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДУЗТ, 2024. – Вип. 208. – С. 23–35. https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308117

21. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Надзвичайні події [Електроннийресурс]. URL: https://dsns.gov.ua/news/nadzvicaini-podiyi/20926 (дата звернення: 04.09.2024).

22. Кабінет Міністрів України. Постанова № 62 від 30.01.2013 "Про затвердження Технічного регламенту безпеки машин". Офіційний сайт КМУ.

URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/62-2013-%D0%BF#Text (дата звернення: 04.09.2024).

23. Кабінет Міністрів України. Постанова від 17.04.2019 № 337 "Про затвердження Порядку розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві" Офіційний сайт КМУ. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/337-2019-%D0%BF#Text (дата звернення: 04.09.2024).

24. Міністерство соціальної політики України. Наказ № 62 від 19.01.2018 "Про затвердження Правил охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання" Офіційний сайт МСПУ. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0244-18#Text (дата звернення: 04.09.2024).

25. Кабінет Міністрів України. Постанова № 687 від 26.05.2004 "Порядок проведення технічного огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки" Офіційний сайт КМУ. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-2004-%D0%BF#Text (дата звернення: 04.09.2024).

26. Міністерство праці та соціальної політики України. Наказ № 336 від 29.12.2004 Про затвердження Випуску 1 "Професії працівників, що є загальними для всіх видів економічної діяльності" Довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-2004-%D0%BF#Text (дата звернення: 04.09.2024).

27. Chew, M. Y. L.. Construction Technology for Tall Buildings. Singapore , World Scientific, 2009. 397 p. ISBN 9789812818614.

28. Shapiro H. I., Shapiro J. P., Shapiro L. K. Cranes and Derricks. 4th ed. New York : McGraw-Hill Professional, 2010. 688 p. ISBN 978-0-07-162557-9.

29. MacCollum D. V. Construction Safety Engineering Principles. New York : McGraw-Hill, 2007. 512 p. ISBN 978-0071482448.

30. MacCollum D. V. Crane Hazards and Their Prevention. Des Plaines, IL : American Society of Safety Engineers, 1993. 171 p. ISBN 978-0939874958.

31. Dickie D. E. Crane Handbook. London : Architectural Press, 1981. 320 p. ISBN 978-0408004459.

32. Kogan J. Crane Design: Theory and Calculations of Reliability. New York : Wiley, 1976. 365 p. ISBN 978-0470152249.

33. Neitzel R., Seixas N., Ren K. A Review of Crane Safety in the Construction Industry // Applied Occupational and Environmental Hygiene. 2001. Vol. 16, No. 12. P. 1106–1117. DOI: 10.1080/10473220127411.

34. Гудков Ю. І., Полосін М. Д. Пристрій і експлуатація вантажопідіймальних кранів.: Академія, 2013. 400 с. ISBN: 978-5-7695-5694-4.

35. Neitzel R. L., Seixas N. S., Ren K. K. A review of crane safety in the construction industry. Applied Occupational and Environmental Hygiene. 2001. Vol. 16, iss. 12. pp. 1106–1117. DOI: 10.1080/10473220127411.

36. Hamilton M. W. Electronic Load and Angle Measuring System for Tower Cranes // SAE Technical Paper. 1971. No. 710706. DOI: 10.4271/710706.

37. Brauer R. L. Safety and Health for Engineers. New York : Van Nostrand Reinhold, 1990. 651 p. ISBN 978-0442211257.

38. Барч І. З., Кутовий Е. Н., Мармер А. М. Будівельні крани: довідковий посібник. Київ : Будівельник, 1974. 336 с.

39. Чернега В. І., Мазуренко І. Я. Короткий довідник з вантажопідйомних машин. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Техніка, 1988. 303 с. ISBN 5-335-00137-2.

40. Wallscheid O. Thermal Monitoring of Electric Motors: State-of-the-Art Review and Future Challenges // IEEE Open Journal of Industry Applications. 2021. P. 1–19. DOI: 10.1109/OJIA.2021.3091870.

41. Дедков В. Л. Техніка безпеки під час експлуатації вантажопідіймальних кранів у будівництві. 1974. 111 с.

42. Loveikin V. S., Romasevych Yu. O., Loveikin A. V., Liashko A. P., Pochka K. I. Dynamic analysis of the simultaneous starting of the boom and load

lifting mechanisms hoisting for the jib and the cargo of the jib crane with a hydraulic drive // Strength of Materials and Theory of Structure : Scientific and technical collected articles. Kyiv : KNUCA, 2024. Issue 113. P. 149–160. DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.149-160.

43. Ali A. H., Zayed T., Wang R. D., Kit M. Y. S. Tower crane safety technologies: A synthesis of academic research and industry insights // Automation in Construction. 2024. Vol. 163. Art. no. 105429. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105429. ISSN 0926-5805.

44. Kim Y. J., Seo M. K. Technological Trends in Safety Solutions for Construction Equipment // Journal of Drive and Control. 2023. Vol. 20, No. 2. P. 7–14. DOI: 10.7839/KSFC.2023.20.2.007.

45. Zhang Y., Chen K. Digital technologies for enhancing crane safety in construction: a combined quantitative and qualitative analysis // Journal of Civil Engineering and Management. 2023. Vol. 29, No. 7. P. 604–620. DOI: 10.3846/jcem.2023.19574.

46. Narayan R. K. Microprocessors in Industrial Control // IETE Journal of Research. 1983. Vol. 29, No. 12. P. 591–593. DOI: 10.1080/03772063.1983.11453194.

47. Isermann R. Digital control systems. 2nd ed. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 1989. Vol. 1 : Fundamentals, deterministic control. 336 p. DOI: 10.1007/978-3-642-86417-9.

48. Gupta A., Toong H. Microcomputers in Industrial Control Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1984. Vol. IE-31, No. 2. P. 109–119. DOI: 10.1109/TIE.1984.350054.

49. Potirniche M. A., Capatana G. F. Considerations Regarding the Dynamic Stability in Case of a Damage for Tower Cranes // Acoustics and Vibration of Mechanical Structures. Springer, 2024 Vol. 302. DOI: 10.1007/978-3-031-48087-4_7.

50. Rosenfeld Y., Shapira A. Automation of existing tower cranes: economic and technological feasibility // Automation in Construction. 1998. Vol. 7, No. 4. P. 285–298. DOI: 10.1016/S0926-5805(97)00078-2.

51. Backhouse C. J., Price R. A., Moore P. R. Crane automation // Industrial Robot. 1994. Vol. 21, No. 4. P. 22–25. DOI: 10.1108/01439919410068168.

52. Schock-Schmidtke A., Bernhard T., Fottner J. Concept of a Highly Automated Tower Crane // Proceedings of the 2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Bari, Italy, 2024. P. 4062–4067. DOI: 10.1109/CASE59546.2024.10711731.

53. Chang C.-Y., Lie H. W. Real-Time Visual Tracking and Measurement to Control Fast Dynamics of Overhead Cranes // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. Vol. 59, No. 3. P. 1640–1649. DOI: 10.1109/TIE.2011.2163916.

54. Xu Y., Zhang J., Wang X., Shabaz M., Ahmad M. W., Ray S. Research on optimization of crane fault predictive control system based on data mining // Nonlinear Engineering. 2023. Vol. 12, No. 1. Art. no. 20220202. DOI: 10.1515/nleng-2022-0202.

55. Wang M., Zhang G., Yan Q., Shen B., Yuan L., Liu L. Development of a Novel Black Box for Tower Crane Based on an ARM-based Embedded System // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL). Jinan, China, 2007. P. 82–87. DOI: 10.1109/ICAL.2007.4338535.

56. Dutta S., Cai Y., Huang L., Zheng J. Automatic re-planning of lifting paths for robotized tower cranes in dynamic BIM environments // Automation in Construction. 2020. Vol. 110. Art. no. 102998. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102998. ISSN 0926-5805.

57. Bolton W. Programmable Logic Controllers. 6th ed. Oxford : Newnes, 2015. 424 p. ISBN 978-0128029299.

58. Erickson K. T. Programmable Logic Controllers // IEEE Potentials. 1996. Vol. 15, No. 1. P. 14–17. DOI: 10.1109/45.481370.

59. Hudedmani M. G., Umayal R. M., Kabberalli S. K., Hittalamani R. Programmable Logic Controller (PLC) in Automation // Advanced Journal of Graduate Research. 2017. Vol. 2, No. 1. P. 37–45. DOI: 10.21467/ajgr.2.1.37-45.

60. Bedi H. S., Arora K. Monitoring and Controlling of Industrial Crane using Programmable Logic Controllers // Indonesian Journal of Electrical

Engineering and Informatics (IJEEI). 2015. Vol. 3, No. 2. P. 115–118. DOI: 10.11591/ijeei.v3i2.145.

61. Pouw J. M. J. Exploring the idea of automating tower cranes : Master Thesis / Eindhoven University of Technology. Eindhoven, 2018.

62. Irizarry J., Karan E. P. Optimizing location of tower cranes on construction sites through GIS and BIM integration // Journal of Information Technology in Construction. 2012. Vol. 17. P. 351–366., https://www.itcon.org/2012/23.

63. Zhang M., Ge S. Vision and Trajectory–Based Dynamic Collision Prewarning Mechanism for Tower Cranes // Journal of Construction Engineering and Management. 2022. Vol. 148, No. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000230.

64. Wang J., Zhang Q., Yang B., Zhang B. Vision-Based Automated Recognition and 3D Localization Framework for Tower Cranes Using Far-Field Cameras // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 10. Art. no. 4851. DOI: 10.3390/s23104851.

65. Karslı E., Oktem H. Advanced Crane Systems: The Impact of Modern Technologies on Performance and Safety // Current Studies in Basic Sciences, Engineering and Technology 2024 / ed. by F. Z. Saltan, H. Arıkan, Y. Uzun. Konya : ISRES Publishing, 2024. P. 113–129.

66. Lee U., Kang K., Kim G., Cho H.-H. Improving Tower Crane Productivity Using Wireless Technology // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2006. Vol. 21, No. 8. P. 594–604. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2006.00459.x.

67. Shapira A., Elbaz A. Tower Crane Cycle Times: Case Study of Remote-Control versus Cab-Control Operation // Journal of Construction Engineering and Management. 2014. Vol. 140, No. 12. Art. no. 04014063. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000090.

68. Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group.

69. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, 6(4), 239–242.

70. Ran, Y., Zhou, X., Lin, P., Wen, Y., & Deng, R. (2019). A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches. IEEE Access, 7, 164914–164928.

71. Tiddens, W. W., Braaksma, A. J. J., & Tinga, T. (2020). Towards informed maintenance decision making: Guiding the application of prognostic maintenance. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 26(3), 463–486.

72. Kaczmarek, J., & Gola, A. (2019). Industry 4.0 and predictive maintenance: A review. Procedia Manufacturing, 39, 1500–1509.

73. Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2015). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. Mechanical Systems and Signal Processing, 42(1–2), 314–334.

74. Predictive Maintenance Market Size Worldwide. (2022). Statista.

75. Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering, 150, 106889.

76. Lambán, M. P., Morella, P., Royo, J., & Sanchez, M. (2022). Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic review of methods and techniques. Applied Sciences, 12(5), 2418.

77. Vogl, G. W., Weiss, B. A., & Helu, M. (2019). A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing, 30(1), 79–95.

78. de Faria, M. T., de Almeida, M. M., & de Souza, G. F. M. (2015). Vibration-based condition monitoring of rotating machinery. Procedia CIRP, 38, 228–232.

79. Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning

methods applied to predictive maintenance. Computers & Industrial Engineering, 137, 106024.

80. Jimenez-Cortadi, A., Irigoien, I., Boto, F., & Galar, D. (2019). Predictive maintenance for tower cranes based on vibration analysis. Procedia Manufacturing, 39, 1597–1604.

81. Pech, M., Vrchota, J., & Bednář, J. (2021). Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic review. Sensors, 21(7), 2378.

82. Lee, G. Y., Kim, M., & Quan, Y. J. (2020). Machine health management in smart factory: A review. Journal of Mechanical Science and Technology, 34(9), 3465–3477.

83. Omri, N., Al Masry, Z., & Mairot, N. (2021). Data quality challenges in predictive maintenance. Computers in Industry, 131, 103487.

84. Achouch, M., Dimitrova, M., & Ziane, K. (2022). Predictive maintenance for energy systems: A review. Applied Sciences, 12(16), 8081.

85. Zhang, Y., & Wang, X. (2022). Vibration-based fault diagnosis for aerospace systems. Chinese Journal of Aeronautics, 35(3), 45–56.

86. Adik, R., & Wang, J. (2021). Risk analysis of tower crane failures. Open Journal of Safety Science and Technology, 11(4), 123–135.

87. Ucar, A., & Karakose, M. (2023). AI-driven predictive maintenance: A review. Applied Sciences, 13(5), 2987.

88. Gorbatyuk Ye. Analysis of studies of stationary tower cranes under wind loads / Ye. Gorbatyuk, D. Mishchuk, O. Bulavka, V. Voliyanuk // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2023. – № 102. С. 17-23. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0201

89. Chen W. Wind-induced tower crane vibration and safety evaluation / W. Chen, X. Qin, Z. Yang, P. Zhan // J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control. – 2020. – Vol. 39, № 2. – P. 297–312. – DOI: 10.1177/1461348419847306.

90. Lu Y. Wind-induced vibration assessment of tower cranes attached to high-rise buildings under construction / Y. Lu, M. Gao, T. Liang, Z. He, F. Feng, F.

Pan // Autom. Constr. – 2022. – Vol. 135. – Art. 104132. – DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104132.

91. Swuste P. A ‘normal accident’ with a tower crane? An accident analysis conducted by the Dutch Safety Board / P. Swuste // Saf. Sci. – 2013. – Vol. 57. – P. 276–282. – DOI: 10.1016/j.ssci.2013.03.002.

92. Wiosło M. The Gale Overturned a Crane in Krakow. Two People Are Dead / M. Wiosło, A. Grochot // RMF24. – 2022. – Available online: https://www.rmf24.pl/regiony/krakow/news-wichura-przewrocila-dzwig-w-krakowie-dwie-osoby-nie-zyja-fil,nId,5838306#crp_state=1 (accessed on 13 January 2025). (In Polish).

93. Ciryt B. Fatal Accident at the Construction Site of the Court in Wieliczka. The Crane Fell Onto an Employee’s Container, and One Person Died / B. Ciryt // Wieliczka Nasze Miasto. – 2023. – Available online: https://wieliczka.naszemiasto.pl/smiertelny-wypadek-na-budowie-sadu-w-wieliczce-dzwig/ar/c1-9511255 (accessed on 13 January 2025). (In Polish).

94. Chen W. Effects of installation location on the in-service wind load of a tower crane / W. Chen, X. Qin, Z. Yang // Struct. Build. – 2020. – Vol. 173, № 2. – P. 141–156. – DOI: 10.1680/jstbu.18.00015.

95. Augustyn M. Experimental and Numerical Estimation of the Aerodynamic Forces Induced by the Wind Acting on a Fast-Erecting Crane / M. Augustyn, M. Barski, M. Chwał, A. Stawiarski // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13, № 18. – Art. 10826. – DOI: 10.3390/app131810826.

96. Zhang X. Wind speed forecasting for tower cranes using deep learning / X. Zhang, Y. Li, Z. Wang // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 19. – Art. 6439. – DOI: 10.3390/s21196439.

97. El Ouni M. H. A smart tower crane to mitigate turbulent wind loads / M. H. El Ouni, N. Ben Kahla, S. Islam, M. Jameel // Struct. Eng. Int. – 2021. – Vol. 31, № 1. – P. 18–29. – DOI: 10.1080/10168664.2019.1668334.

98. Abdelmegid M. A. GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites / M. A. Abdelmegid, K. M. Shawki, H.

Abdel-Khalek // Alexandria Eng. J. – 2015. – Vol. 54, № 3. – P. 519–526. – DOI: 10.1016/j.aej.2015.05.011.

99. Marzouk M. Decision support for tower crane selection with building information models and genetic algorithms / M. Marzouk, A. Abubakr // Autom. Constr. – 2016. – Vol. 61. – P. 1–15. – DOI: 10.1016/j.autcon.2015.09.008.

100. Mara T. G. Effects of a construction tower crane on the wind loading of a high-rise building / T. G. Mara // J. Struct. Eng. – 2010. – Vol. 136, № 11. – P. 1453–1460. – DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000243.

101. Klinger C. Failures of cranes due to wind induced vibrations / C. Klinger // Eng. Fail. Anal. – 2014. – Vol. 43. – P. 198–220. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.12.007.

102. Voisin D. Wind tunnel test method to study out-of-service tower crane behaviour in storm winds / D. Voisin, G. Grillaud, C. Solliec, A. Beley-Sayettat, J. L. Berlaud, A. Miton // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2004. – Vol. 92, № 7–8. – P. 687–697. – DOI: 10.1016/j.jweia.2004.03.005.

103. Augustyn M. Numerical and Analytical Estimation of the Wind Speed Causing Overturning of the Fast-Erecting Crane—Part II / M. Augustyn, M. Barski // Appl. Sci. – 2024. – Vol. 14, № 10. – Art. 4694. – DOI: 10.3390/app14104694.

104. Jiang H. Dynamic reliability analysis of tower crane with wind loading / H. Jiang, Y. Li // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 677, № 5. – Art. 052031. – DOI: 10.1088/1757-899X/677/5/052031.

105. Jin M. Analysis of wind-induced vibration and fatigue effects of a typical tower crane / M. Jin, Z. Wang, D. Zhou // J. Shanghai Jiaotong Univ. (Chin. Ed.). – 2014. – Vol. 48, № 6. – P. 804–808.

106. ISO 4302:2016. Cranes – Wind Load Assessment. – Geneva: ISO Copyright Office, 2016.

107. ISO 8686-1:2012. Cranes – Design principles for loads and load combinations. Part 1: General. – Geneva: ISO Copyright Office, 2012.

108. Wang H. Wind-induced buffeting comfort assessment of tower cranes considering the wake effect of super-high towers / H. Wang, Y. Liu, Z. Xu, J. Mao, B.

Li // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2023. – Vol. 240. – Art. 105469. – DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105469.

109. Anti-collision and safety systems for tower cranes // Autom. Constr. – 2023. – Vol. 149. – Art. 104623. – DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104623.

110. Hebiba A. M. Wind-Wise Automated Stability Analysis for Selection of Tower Crane and Location / A. M. Hebiba, A. Bouferguene, S. Moon, S. Han // J. Constr. Eng. Manage. – 2022. – Vol. 148, № 11. – Art. 04022127. – DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.00022127.

111. Huang C. Optimization of crane setup location and servicing schedule for urgent material requests with non-homogeneous and non-fixed material supply / C. Huang, C. K. Wong // Autom. Constr. – 2018. – Vol. 89. – P. 183–198. – DOI: 10.1016/j.autcon.2018.01.015.

112. Wang F. Interference effect of a neighboring building on wind loads on scaffolding / F. Wang, Y. Tamura, A. Yoshida // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2014. – Vol. 125. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.jweia.2014.11.008.

113. Neitzel, R. L., Seixas, N. S., & Ren, K. K. (2001). A review of crane safety in the construction industry. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 16(12), 1106–1117. https://doi.org/10.1080/10473220127411

114. Beavers, J. E., Moore, J., Rinehart, R., & Schriver, W. (2006). Crane-related fatalities in the construction industry. Journal of Construction Engineering and Management, 132(9), 901–910. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2006)132:9(901)

115. Shapira, A., & Lyachin, B. (2009). Identification and analysis of factors affecting safety on construction sites with tower cranes. Journal of Construction Engineering and Management, 135(1), 24–33. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:1(24)

116. Abtahi, S., Omidyeganeh, M., Shirmohammadi, S., & Hariri, B. (2014). YawDD: A yawning detection dataset. Proceedings of the 5th ACM Multimedia Systems Conference, 24–28. https://doi.org/10.1145/2557642.2563678

117. Tam, V. W., & Fung, I. W. (2011). Tower crane safety in the construction industry: A Hong Kong study. Safety Science, 49(2), 208–215. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.08.001

118. Swaen, G., Van Amelsvoort, L., Bültmann, U., & Kant, I. (2003). Fatigue as a risk factor for being injured in an occupational accident: results from the Maastricht Cohort Study. Occupational and Environmental Medicine, 60(suppl 1), i88–i92. https://doi.org/10.1136/oem.60.suppl_1.i88

119. Chi, H.-L., Chen, Y.-C., Kang, S.-C., & Hsieh, S.-H. (2012). Development of user interface for tele-operated cranes. Advanced Engineering Informatics, 26(3), 641–652. https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.05.001

120. Liu, P., Chi, H.-L., Li, X., & Guo, J. (2021). Effects of dataset characteristics on the performance of fatigue detection for crane operators using hybrid deep neural networks. Automation in Construction, 132, 103901. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103901

121. Yang, J. H., Mao, Z. H., Tijerina, L., Pilutti, T., Coughlin, J. F., & Feron, E. (2009). Detection of driver fatigue caused by sleep deprivation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 39, 694–705. https://doi.org/10.1109/TSMCA.2009.2013040

122. Sommer, D., & Golz, M. (2010). Evaluation of PERCLOS based current fatigue monitoring technologies. 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 4456–4459. https://doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5626789

123. Gao, Y., & Wang, C. (2017). Fatigue state detection from multi-feature of eyes. 2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), 177–181. https://doi.org/10.1109/ICSAI.2017.8248290

124. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 1097–1105. https://doi.org/10.1145/3065386

125. Pouyanfar, S., Sadiq, S., Yan, Y., Tian, H., Tao, Y., Reyes, M. P., Shyu, M. L., Chen, S. C., & Iyengar, S. S. (2018). A survey on deep learning: Algorithms,

techniques, and applications. ACM Computing Surveys, 51, 1–36. https://doi.org/10.1145/3234150

126. Najafabadi, M., Villanustre, F., Khoshgoftaar, T., Seliya, N., Wald, R., & Muharemagic, E. (2015). Deep learning applications and challenges in big data analytics. Journal of Big Data, 2, 1–21. https://doi.org/10.1186/s40537-014-0007-7

127. Ghoddoosian, R., Galib, M., & Athitsos, V. (2019). A realistic dataset and baseline temporal model for early drowsiness detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 178–187. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2019.00027

128. Sahayadhas, A., Sundaraj, K., & Murugappan, M. (2012). Detecting driver drowsiness based on sensors: a review. Sensors, 12(12), 16937–16953. https://doi.org/10.3390/s121216937

129. Ngxande, M., Tapamo, J.-R., & Burke, M. (2017). Driver drowsiness detection using behavioral measures and machine learning techniques: A review of state-of-art techniques. 2017 Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics (PRASA-RobMech), 156–161. https://doi.org/10.1109/RoboMech.2017.8261140

130. Guo, J.-M., & Markoni, H. (2019). Driver drowsiness detection using hybrid convolutional neural network and long short-term memory. Multimedia Tools and Applications, 78(20), 29059–29087. https://doi.org/10.1007/s11042-018-6378-6

131. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. Neural Computation, 9(8), 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735

132. Akopyan, M., & Khashba, E. (2017). Large-Scale YouTube-8M Video Understanding with Deep Neural Networks. arXiv preprint arXiv:1706.04488. https://arxiv.org/abs/1706.04488

133. Ma, C.-Y., Chen, M.-H., Kira, Z., & AlRegib, G. (2019). Ts-lstm and temporal-inception: Exploiting spatiotemporal dynamics for activity recognition. Signal Processing: Image Communication, 71, 76–87. https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.003

134. Бабенко А.О. Інноваційні технології моніторингу технічного стану буксових вузлів вагонів вбудованими системами контролю / І.Е. Мартинов, В.М. Петухов, А.В. Труфанова, А.О. Бабенко, В.О. Шовкун // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - 2020. - № 3(5). – С. 22-27. https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.01.03

135. Коваленко В. О. Динамічні характеристики роботи механізму повороту крану на колоні / В. О. Коваленко, В. В. Стрижак, С. П. Іглін, О. О. Коваленко, М. Г. Стрижак // Підйомно-транспортна техніка. – 2021 – №2 (66). – С. 80–100. DOI: 10.15276/pidtt.2.66.2021.08

136. Коваленко В. О.. Синтез багатомасової моделі баштового крану / В. О. Коваленко, О. О. Коваленко, В. В. Стрижак, С. П. Іглін, М. Г. Стрижак // Підйомно-транспортна техніка. – 2023 – №1 (68). – С. 95–103. https://doi.org/10.15276/pidtt.1.68.2023.08

137. Коваленко В. О.. Чисельний експеримент з динаміки роботи баштового крану / В. О. Коваленко, О. О. Коваленко, В. В. Стрижак, О. М. Вудвуд, А. Ю. Васильєв, М. Г. Стрижак // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Автомобіле- та тракторобудування: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2023. – № 1. – С. 12-26. https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.02

138. Valentyn Kovalenko. Determination of Dynamic Forces in the Metal Structure of a Tower Crane based on the Multi-mass Model / Valentyn Kovalenko, Oleg Kovalenko, Vsevolod Stryzhak, Mariana Stryzhak, Andrew Ruzmetov // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. – 2023. – Issue 14. – P. 248-256 https:// dx.doi.org/10.17683/ijomam/issue14.29

139. Babenko A. Detecting the influence of uneven loading of the brake shoe in a freight car bogie on its strength / S. Panchenko, A. Lovska, V. Ravlyuk, A. Babenko, O. Derevyanchuk, O. Zharova, Ya. Derevianchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - Vol. 5 No. 7 (125) (2023): Applied mechanics. – p. 6-13. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287791

140. Горбатюк Є.Визначення динамічних навантажень в механізмі підіймання кранів / В. Волянюк, Є. Горбатюк, Д. Міщук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2022. – № 100. – С. 12-22. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2022.100.0201

141. Gorbatyuk Ye. Determination of dynamic loads in the crane suspension when lifting a load from a rigid base / V. Volianiuk, D. Mishchuk, Ye. Gorbatyuk // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2024. – № 103. – С. 15-24. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0201

142. Воронін С.В. Вплив напрацювання та електричної обробки мастильного матеріалу на зносостійкість підшипників ковзання / С.В. Воронін, О.С. Харківський, О.О. Губін // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: Укр-ДУЗТ, 2023. – Вип. 205. – С.6-13. https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288790

143. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя. зношування та мащення. Терміни та визначення.

144. Воронін С.В. Методика та приклад розрахунку раціонального ресурсу аксіально-плунжерних гідромашин мобільної техніки / С.В. Воронін, В.О. Стефанов, Р.С. Васянович, Т.В. Трифонов, С.О. Півоваров // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: Укр-ДУЗТ, 2024. – Вип. 208. – С. 36-43. https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308140

145. Воронін С.В. Експлуатаційні випробування пристрою для електростатичної обробки моторної оливи / С.В. Воронін, В.О. Стефанов, О.С. Харківський // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: Укр-ДУЗТ, 2022. – Вип. 200. – С.11-24. https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262678

146. Коваленко В. О.. Оптимізація керування механізмом повороту баштового крана / В. О. Коваленко, О. О. Коваленко, В. В. Стрижак, В. П. Свіргун, М. Г. Стрижак // Вісник Національного технічного університету "ХПІ".

Сер.: Автомобіле- та тракторобудування: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2022. – № 1. – С. 84-95. https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.1.10

147. Gorbatyuk Ye. Review and analysis of damage and existing systems of protecting tower cranes under the influence of a blast wave / Ye. Gorbatyuk, O. Bulavka // Автомобільний транспорт. – 2023. – № 53 – С. 13-22. https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.02

148. Gorbatyuk Ye. Estimation of simulation of high-speed pressure of blast wave of tower crane / Ye. Gorbatyuk, D. Mishchuk, O. Bulavka, S. Komotska // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2025. – № 105. – С. 12-19. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2025.105.0201

149. Мойсеєнко В.І. Удосконалення системи електроживлення об’єктних контролерів мікропроцесорної централізації / В.І.Мойсеєнко, М.О Гаврилов//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2024. – №2(157) – С. 68 – 74. https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307752

150. Мойсеєнко В.І. Проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів / В.І.Мойсеєнко, В.М.Бутенко, О.В.Головко, С.Г.Чуб // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2020. – № 3 – С. 31-38. https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i3.214078

151. Moiseenko V. Modeling of vehicle movement in computer information-control systems / V.Moiseenko, O.Golovko, V.Butenko,K.Trubchaninova // RadioelectronicandComputerSystems, 2022. –№. 1(101). – P.36-49. https://doi.org/10.32620/reks.2022.1.03

152. Мойсеєнко В.І. Удосконалення системи електроживлення об’єктних контролерів мікропроцесорної централізації / В.І.Мойсеєнко, М.О Гаврилов//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2024. – №2(157) – С. 68 – 74. https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307752

153. Voronin, S. Design of hydraulic motors with rotary shaft movement for driving working equipment in modern machines / N. Remarchuk, S. Voronin, Y. Chmuzh, A. Yevtushenko & O. Halytskyi // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/1 (130), pp. 79–86. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309759

154. Voronin S. Energy consumption optimization control of hydraulic transmission systems / Xu MingWei, Wang XueFeng, S. Voronin, O. Ovchynnikov, T. Tryfonov, Y. Orliuk // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: Укр-ДУЗТ, 2025. – Вип. 211. – С.41-49. https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327126

Додаток А
Акт впровадження в навчальному процесі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної роботи УкрДУЗТ,
к.т.н., доцент
_____ А.О. Каграманян
"___" _____2025р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Дзержинського Ігоря Віталійовича на тему «**Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах**» в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту.

До основних результатів дисертаційної роботи Дзержинського І.В., які використовуються у навчальному процесі УкрДУЗТ належать:

– закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану механізму повороту баштового крану, які дозволили розробити підсистему предиктивного обслуговування з використанням технології глибокого навчання нейронної мережі;

– математичні моделі підсистем моніторингу психофізіологічного стану оператора баштового крану на основі методів машинного зору та прогнозування небезпечних вітрових навантажень на основі глибокого навчання нейронної мережі;

– метод підвищення безпеки експлуатації баштових кранів в частині удосконалення системи керування, яка враховує закономірності зміни діагностичних параметрів технічного стану, психофізіологічного стану оператора крану та прогнозування небезпечних вітрових навантажень та використовує технології штучного інтелекту;

– архітектура та алгоритми інтегрованої інтелектуальної системи безпеки (ІСБ), які можуть бути використані як технічне завдання для промислового виробництва та впровадження в системах керування баштових кранів;

– функціональні програмно-апаратні модулі, що можуть бути імплементовані як окремо, так і в складі інтегрованої системи: модуль розпізнавання сонливості оператора на базі Raspberry Pi та камери; модуль прогнозування вітрових навантажень на базі обчислювального NPU-модуля та метеостанції; модуль предиктивної діагностики на основі вібродатчиків та обчислювального блоку.

Перелічені розробки з 2024 року по теперішній час використовуються в навчальному процесі, а саме:

1. При підготовці бакалаврів та магістрів спеціальності 133 - галузеве машинобудування з дисциплін «Експлуатація машин», «Основи автоматизації машин», «Надійність машин», «Ремонт машин»;

2. При виконанні кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів спеціальності 133 - галузеве машинобудування.

3. При підготовці слухачів Навчально-наукового центру освіти дорослих за курсом «Підвищення рівня механізації колійних та навантажувально-розвантажувальних робіт».

Завідувач кафедри машинобудування
та технічного сервісу машин,
д.т.н., професор — Сергій ВОРОНІН

Декан будівельного факультету,
к.т.н., доцент — Олексій ДУДІН

В.о. директора Навчально-наукового
центру освіти дорослих
к.т.н., доцент — Вячеслав ЗАХАРЧЕНКО

Додаток Б
Акт впровадження в діяльність

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«БУДІВЕЛЬНА КОМПАНІЯ «ПРЕСТИЖ»
ЄДРПОУ 42681973

03186, м. Київ, вулиця Антонова 5-А
ІПН 426819726589
Тел. +380504709987

IBAN UA 893003460000026003094521901 в
АТ «АЛЬФА БАНК» м. Київ
e-mail: sbudarh2019@gmail.com

Вих. № 31/10-1 від 31.10.2024р.

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
«Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах», на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування
ДЗЕРЖИНСЬКОГО ІГОРЯ ВІТАЛІЙОВИЧА

Цим документом засвідчується, що ТОВ «Будівельна компанія «Престиж» впровадило у свою діяльність результати науково-дослідної роботи Дзержинського Ігоря Віталійовича, представлені в його дисертації "Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах" на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Компанія впровадила у свою практику елементи системи предиктивного технічного обслуговування, розробленої в рамках вищезгаданого дисертаційного дослідження. Зокрема, при плануванні та проведенні технічного обслуговування баштового крана КБ-405, використовуються методики аналізу даних вібраційного моніторингу, запропоновані Дзержинським І.В.. Ці методики, що базуються на технологіях штучного інтелекту, а саме нейромережевих моделях аналізу, дозволяють з високою точністю і на ранніх стадіях виявляти ознаки зношування та наближення до критичного стану підшипникових вузлів крана. Завдяки цьому, заміна підшипників здійснюється не за регламентом, а за фактичною потребою, що попереджує виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з їх раптовою відмовою.

Застосування зазначених методик предиктивного обслуговування, що використовують штучний інтелект, дозволило суттєво підвищити надійність роботи баштового крана, знизити ризик незапланованих зупинок через технічні несправності, а також оптимізувати витрати на технічне обслуговування за рахунок переходу від планово-попереджувального ремонту до ремонту за фактичним станом, визначеним інтелектуальною системою. Економічна доцільність підтверджується зменшенням витрат на запасні частини і скороченням часу простою техніки.

З повагою,
Директор ТОВ «БУДІВЕЛЬНА КОМПАНІЯ «ПРЕСТИЖ» Форостяний П.М.

УКРАЇНА ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ БУДІВЕЛЬНА КОМПАНІЯ «ПРЕСТИЖ» Ідентифікаційний код 42681973 м. КИЇВ

Додаток В
Акт впровадження в діяльність

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ТЕХПІДРЯД»

29013, Хмельницька область,
м. Хмельницький, вул. Гагаріна,
буд. 5, офіс № 330

код в ЄДРПОУ 43087027
ІПН 430870222250

UA253052990000026007016013634
в АТ КБ «ПриватБанк»

Вих. № 11/10-24 від 11 жовтня 2024 року

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
«Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах», на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування
ДЗЕРЖИНСЬКОГО ІГОРЯ ВІТАЛІЙОВИЧА

Ця довідка видана Дзержинському Ігорю Віталійовичу про те, що результати його дисертаційного дослідження на тему «Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах», представленого на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності «133 Галузеве машинобудування», впроваджені у діяльність ТОВ "Техпідряд".

Впроваджено прототип підсистеми розпізнавання сонливості оператора баштового крана. Прототип, розроблений на основі технологій комп'ютерного зору та машинного навчання, інтегровано з системою відеоспостереження в кабіні крана КБ-405, що експлуатується на будівельному майданчику: село Бобрик Броварського району Київської області по вулиці Вербній. Це дозволило здійснювати моніторинг стану оператора в режимі реального часу та виявляти ознаки втоми та втрати уваги. За період тестової експлуатації (з 01.06.24 по 10.09.24) зафіксовано 25 випадків, коли система попереджала оператора про зниження рівня уваги, що дозволило запобігти потенційно небезпечним ситуаціям.

ТОВ "Техпідряд" планує продовжити співпрацю з Дзержинським І.В. щодо подальшого розвитку та вдосконалення інтелектуальної системи безпеки баштових кранів, зокрема, розширення функціоналу системи, інтеграцію з іншими системами управління будівельним майданчиком та впровадження на інших об'єктах компанії.

Директор ТОВ «Техпідряд» **Гурик Олексій Андрійович**

Додаток Г
Акт впровадження в діяльність

ТОВ «ВОЛИНЬЕКОБУД»
комплексні рішення по будівництву, ремонту та інженерії
Юр. адреса: 44453, Волинська обл., Ковельський р-н, с. Смідин, вул. Незалежності, 31
Поштова адреса: 43020, Волинська обл., м. Луцьк, вул. Рівненська, 76А, тел./факс (0332) 780152
ЄДРПОУ 41255327, e-mail: volecobud@gmail.com

№18-28/02 від 28.02.2025р.

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
«Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах», на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування
ДЗЕРЖИНСЬКОГО ІГОРЯ ВІТАЛІЙОВИЧА

Цим документом підтверджується, що ТОВ «ВОЛИНЬЕКОБУД» впровадило у свою діяльність результати наукового дослідження Дзержинського Ігоря Віталійовича, викладені в його дисертаційній роботі "Підвищення безпеки експлуатації баштового крану за допомогою використання штучного інтелекту у керуючих системах", представленого на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності «133 Галузеве машинобудування».

У практичну роботу підприємства впроваджено розробки, що стосуються прогнозування впливу вітрових навантажень на баштові крани. Зокрема, диспетчерська служба ТОВ «ВОЛИНЬЕКОБУД» використовує запропоновану в дисертації модель, побудовану на основі нейронної мережі. Ця модель враховує місцеві метеоумови і технічні параметри крана, що дозволяє з високою точністю передбачати небезпечні вітрові навантаження. Такий підхід дав можливість покращити безпеку експлуатації кранового обладнання та мінімізувати час його вимушеного простою через несприятливі погодні умови.

ТОВ «ВОЛИНЬЕКОБУД» планує продовжити співпрацю з Дзержинським І.В. щодо подальшого розвитку та вдосконалення інтелектуальної системи безпеки баштових кранів, зокрема, розширення функціоналу системи, інтеграцію з іншими системами управління будівельним майданчиком та впровадження на інших об'єктах компанії.

ТОВ «ВОЛИНЬЕКОБУД» висловлює зацікавленість у подальшій співпраці з І.В. Дзержинським у напрямку вдосконалення існуючої системи прогнозування, а також розглядає можливість застосування інших його наукових розробок, спрямованих на створення інтелектуальних систем забезпечення безпеки для баштових кранів.

Директор ТОВ «ВОЛИНЬЕКОБУД» _____ **Михайло ШИПЕЛИК**

— ЛУЦЬК 2025 —