

УДК 621.873.3

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3\(44\)-1468-1484](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-1468-1484)

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

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

## ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРУ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ БАШТОВОГО КРАНУ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗОРУ

**Анотація.** У цій роботі розглянуто проблему впливу людського фактора на працездатність баштових кранів та можливості його зменшення шляхом впровадження систем машинного зору. Проаналізовано основні ризики, пов'язані з людськими помилками під час керування крановими механізмами, та їхній вплив на безпеку і продуктивність будівельних робіт. Окреслено принципи роботи систем машинного зору, їхні технічні можливості та переваги в автоматизації процесів керування краном.

Окрему увагу приділено аналізу практичного застосування машинного зору в будівельній галузі, зокрема, впровадженню інтелектуальних систем для моніторингу робочої зони, визначення безпечних траєкторій руху вантажів та мінімізації ризику зіткнень. Також розглянуто можливості інтеграції цих технологій із сучасними кранами та системами управління, що дозволяє підвищити точність операцій і знизити залежність від людського фактора.

Розглянуто методи технічної реалізації систем машинного зору, включаючи використання камер високої роздільної здатності, сенсорів руху, алгоритмів глибокого навчання та нейромережових моделей для аналізу зображень. Здійснено порівняльний аналіз ефективності різних типів алгоритмів, таких як згорткові нейронні мережі (CNN), що забезпечують швидке й точне розпізнавання об'єктів. Висвітлено основні технічні виклики впровадження цих технологій, зокрема, затримки в обробці даних, потребу в потужних обчислювальних ресурсах і складність інтеграції з існуючими механізмами управління баштовими кранами.

Результати дослідження підтверджують, що впровадження систем машинного зору сприяє підвищенню безпеки, зниженню навантаження на

оператора та покращенню загальної ефективності експлуатації баштових кранів.

**Ключові слова:** баштовий кран, аварії, людський фактор, моніторинг, машинне бачення, сонливість, штучний інтелект, система безпеки.

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

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

## REDUCING THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR ON THE WORKABILITY OF A TOWER CRANE THROUGH THE IMPLEMENTATION OF MACHINE VISION SYSTEMS

**Abstract.** This paper examines the problem of the influence of the human factor on the performance of tower cranes and the possibilities of its reduction by implementing machine vision systems. The main risks associated with human errors when controlling crane mechanisms and their impact on the safety and productivity of construction work are analyzed. The principles of operation of machine vision systems, their technical capabilities and advantages in automating crane control processes are outlined.

Special attention is paid to the analysis of the practical application of machine vision in the construction industry, in particular, the implementation of intelligent systems for monitoring the work area, determining safe trajectories of cargo movement and minimizing the risk of collisions. The possibilities of integrating these technologies with modern cranes and control systems are also considered, which allows increasing the accuracy of operations and reducing dependence on the human factor.

The methods of technical implementation of machine vision systems are considered, including the use of high-resolution cameras, motion sensors, deep learning algorithms and neural network models for image analysis. A comparative analysis of the effectiveness of different types of algorithms, such as convolutional neural networks (CNN), which provide fast and accurate object recognition, is carried out. The main technical challenges of implementing these technologies are highlighted, in particular, delays in data processing, the need for powerful computing resources and the complexity of integration with existing tower crane control mechanisms. The results of the study confirm that the implementation of machine

vision systems contributes to increased safety, reduced operator workload and improved overall efficiency of tower crane operation.

**Keywords:** tower crane, accidents, human factor, monitoring, machine vision, drowsiness, artificial intelligence, security system.

**Постановка проблеми.** Баштові крани є життєво важливим обладнанням на будівельних майданчиках, відіграючи ключову роль у підйомі та переміщенні матеріалів і будівельних компонентів [1]. Ефективність та безпека роботи цих кранів значною мірою залежить від досвіду та навичок операторів, зокрема від їх здатності точно планувати траєкторію руху. Помилки в оцінці відстаней та обмежений огляд можуть призвести до серйозних аварій, таких як зіткнення вантажу з елементами будівлі або його падіння на робітників.

На жаль, подібні інциденти трапляються досить часто. Наприклад, у серпні 2023 року обвал крана в індійському місті Тхане призвів до численних жертв [2]. Аналогічний випадок стався в Італії у 2021 році, також з трагічними наслідками [3]. Статистика свідчить про те, що аварії з будівельними кранами є серйозною проблемою в багатьох країнах світу, зокрема в США та Австралії [4, 5]. В Китаї ця проблема також є актуальною, адже такі аварії часто мають важкі наслідки [6].

На жаль, статистика аварій за участю баштових кранів свідчить про значний вплив людського фактора. Помилки операторів, зумовлені втому, втратою концентрації, неправильною оцінкою ситуації або порушенням правил безпеки, часто призводять до трагічних наслідків. Через значну висоту, на якій працюють крани, навіть незначні помилки можуть мати серйозні наслідки для робітників на землі та навколишньої інфраструктури. Тому питання мінімізації людського фактора та розробка ефективних систем захисту, які враховують можливі помилки операторів, є критично важливими для забезпечення безпеки на будівельних майданчиках.

Окремою проблемою є те, що професія кранівника не користується великою популярністю серед молоді, оскільки потребує тривалої підготовки, високої відповідальності та психологічної витривалості для роботи на значних висотах. Як наслідок, середній вік операторів баштових кранів є значно вищим, ніж у багатьох інших технічних професіях, таких як водії чи машиністи будівельної техніки.

В багатьох країнах середній вік кранівника перевищує 45-50 років, що створює додаткові ризики, пов'язані з людським фактором. Втома, зниження реакції, можливість засинання під час роботи, а також раптові погіршення стану здоров'я (наприклад, гіпертонічний криз або серцевий напад) є серйозними загрозами безпеці на будівельному майданчику. Оскільки кранівник працює у кабіні на великій висоті, надання йому невідкладної медичної

допомоги в разі надзвичайної ситуації може бути ускладненим, що ще більше підвищує ризики.

Тому питання мінімізації людського фактора та розробка ефективних систем захисту, які враховують можливі помилки операторів, зумовлені віком та фізичним станом, є критично важливими для забезпечення безпеки на будівельних майданчиках.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних умовах будівництва, де баштові крани є незамінними елементами, технології безпеки та моніторингу роботи відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки на майданчику. Завдяки інтеграції штучного інтелекту та цифрових технологій, сьогодні існують різноманітні системи, що дозволяють значно знизити ризики аварій та полегшити контроль за роботою кранів.

Один з прикладів таких систем — це використання технологій комп'ютерного зору для виявлення потенційних перешкод у радіусі дії крана[7]. Вони здатні в реальному часі аналізувати навколишнє середовище та автоматично коригувати рухи вантажу[8] або попереджати оператора про можливу небезпеку[9]. Такі системи, як правило, оснащені камерами (Рис.1), які фіксують навколишнє середовище, а алгоритми штучного інтелекту здатні розпізнавати статичні та динамічні об'єкти[10], що наближаються до крана. Інші системи використовують датчики для моніторингу стабільності конструкції та виявлення можливих змін у положенні крана[11], які можуть привести до його перевантаження або навіть падіння.



**Рис. 1** Панель управління Liebherr EMS-4

Існують також технології прогностичного технічного обслуговування [12-13] для моніторингу стану крана в режимі реального часу. Ці технології передбачають використання датчиків для збору даних про стан механізмів крана, таких як двигуни, підйомні системи, троси та гідравлічні системи. Зібрані дані аналізуються за допомогою алгоритмів штучного інтелекту, що дозволяють виявити аномалії в роботі обладнання, які можуть вказувати на майбутні поломки. Це дає змогу здійснити своєчасне технічне обслуговування або заміну частин, перш ніж вони вийдуть з ладу, що значно знижує ризики аварій та підвищує ефективність роботи.

Незважаючи на те, що сучасні технології безпеки значно знизили кількість аварій, пов'язаних з технічними несправностями або зовнішніми обставинами, існуючі системи контролю не завжди адекватно враховують вплив людського фактора. Відомо, що значна частина аварій на будівельних майданчиках відбувається через помилки оператора, які можуть бути спричинені фізичною втомою, недосипом або неухважністю[14].

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.[15-17]. Такі системи запобігають аваріям на дорогах шляхом сповіщення водія про необхідність зупинки (Рис.2) або автоматичної активації системи безпеки в разі неухважності. Для операторів баштових кранів подібних технологій майже немає, що є особливо небезпечним, враховуючи, що вони працюють на великих висотах у складних умовах.



Рис. 2 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.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою даного дослідження є розробка системи, що дозволяє автоматично відстежувати фізіологічний стан оператора баштового крана, зокрема виявляти сонливість або втрату

свідомості, та запобігати аваріям, пов'язаним із людським фактором. Запропонована система повинна використовувати технології машинного бачення для відслідковування рухів очей оператора, аналізуючи їх стан і вживати заходів для забезпечення безпеки, таких як автоматична зупинка крана у разі відсутності реакції оператора.

Новизна дослідження полягає у впровадженні технологій машинного зору та штучного інтелекту для моніторингу фізіологічного стану оператора баштового крана в реальному часі. Це одне з перших досліджень, яке орієнтується на застосування таких технологій безпеки безпосередньо для баштових кранів. Використання цих інноваційних методів дозволяє значно підвищити рівень безпеки, вчасно реагуючи на зміни в стані оператора та запобігаючи аваріям, що можуть бути спричинені сонливістю чи втратою свідомості.

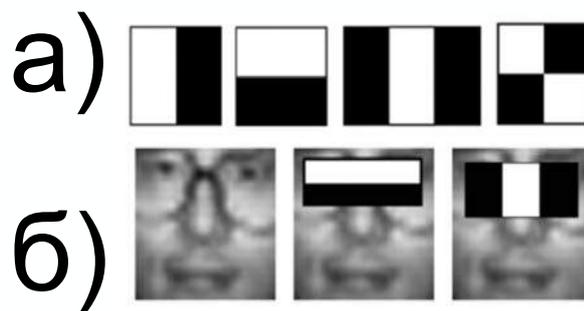
Основним завданням дослідження є створення та тестування системи, яка забезпечить постійний моніторинг стану оператора за допомогою технологій машинного бачення та штучного інтелекту. Це включає розробку алгоритмів для виявлення ознак сонливості або втрати свідомості, створення механізмів автоматичного реагування у разі відсутності реакції оператора, а також впровадження системи сповіщень для керівництва та медичних служб у разі критичних ситуацій.

**Основна частина дослідження.** 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 [18-19]. 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 [20-21]. 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 втомі. У цьому напрямку дослідники, на чолі з Кортлі [22], поділили методи виявлення обличчя на чотири основні категорії. Перша категорія — модельні методи, які порівнюють моделі обличчя та його частин з кандидатами за допомогою кореляційних функцій. Альмабді та Ельрефаї [23] 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 [24-25]. 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 [26].

Зокрема, виявлення обличчя у реальному часі є однією з тих областей, де алгоритм Віоли-Джонса показує свої найкращі результати [27]. 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. 3** Характеристики Гаара, які використовуються для методу визначення обличчя Віоли-Джонса

Характеристики типу Гаара, які застосовуються в алгоритмі Віоли-Джонса для виявлення обличчя зображені на Рис.3(а) [28]. 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.3(б) [28]. 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). 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 [26-27].

3	2	1	4
4	1	3	2
4	2	5	2
4	1	0	1

→

3	5	6	10
7	10	14	20
11	16	25	33
15	21	30	39

Оригінальне зображення

Інтегральне зображення

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

$$I_{\text{Інтр}}(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} I_{\text{Ориг}}(x', y') \quad (1)$$

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 Джонсом, 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 обличчя 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 обличчя 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  $16 \times 16$  пікселів, можна виявити основні патерни світла й темряви. Кількість градієнтів, спрямованих у різні напрямки, фіксується, і ці напрямки позначаються на зображенні.

Для виявлення обличчя у цьому методі достатньо знайти частини зображення, які відповідають відомій моделі. Проте система може не помітити обличчя, орієнтовані під різними кутами, тому кожне зображення коригується так, щоб очі та губи були у протилежних напрямках. Це здійснюється за допомогою алгоритму "оцінка орієнтирів обличчя", що визначає 68 точок на обличчі, таких як верх підборіддя та краї очей. Нейронна мережа навчається виявляти ці точки, покращуючи точність системи.

Оскільки ефективне виявлення втомі 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 втомі.

Серед різних варіантів електронних плат для роботи із зображеннями було вирішено використовувати Raspberry Pi 4 Model B через його високу продуктивність. Ця плата оснащена 64-бітним чотириядерним процесором із частотою 1,5 ГГц та має 2 ГБ оперативної пам'яті, а також підтримує Wi-Fi,

Bluetooth, порти USB 3.0 та 40-контактний роз'єм GPIO. Завдяки компактним розмірам (85×56×16 мм) і доступній вартості вона стала оптимальним вибором. Живлення пристрою здійснюється від бортової мережі баштового крану через блок живлення.

Функціональна схема системи для моніторингу стану оператора баштового крану, наведена на Рисунку 5 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 прослових 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 (Рис.5). 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. 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.



**Рис. 5** Функціональна схема системи для моніторингу стану оператора баштового крану

Після встановлення операційної системи Raspbian, бібліотеки OpenCV та іншого необхідного програмного забезпечення, система на базі Raspberry Pi 4 була інтегрована в кабінку 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 6 представлена загальна структура такої системи.

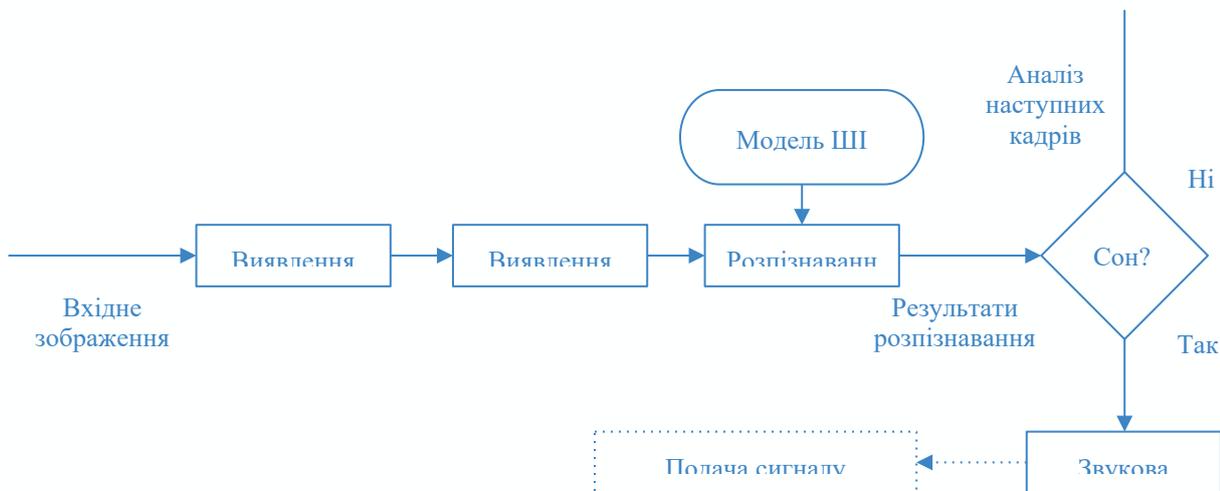


Рис. 6 Процес моніторингу стану оператора баштового крану

На рисунку 7 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.

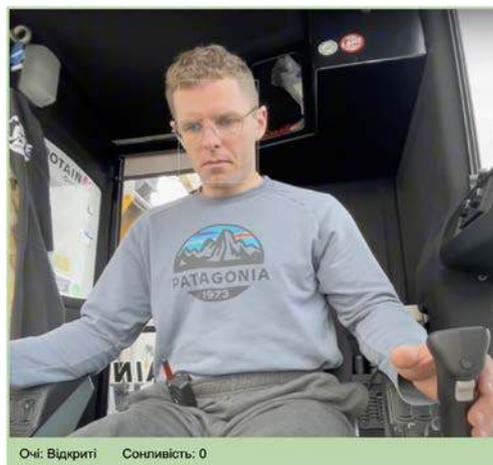


Рис. 7 Оператор працює в звичайному режимі

На рисунку 8 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. 8** 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 неухважністю, та підвищити загальний рівень безпеки на будівельних майданчиках.

**Висновки.** Проведене дослідження підкреслює критичну важливість питання безпеки при експлуатації баштових кранів, особливо з огляду на значний вплив людського фактора. Аналіз літератури та існуючих систем безпеки виявив, що, незважаючи на розвиток технологій, існуючі системи недостатньо мірою враховують фізіологічний стан операторів, зокрема можливість втоми, сонливості та раптового погіршення здоров'я.

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.

Результати дослідження свідчать про значний потенціал використання технологій машинного зору та штучного інтелекту для підвищення безпеки праці операторів баштових кранів. Запропонована система, завдяки своїй здатності розпізнавати та прогнозувати небезпечні стани оператора, може стати ефективним інструментом для запобігання аваріям, пов'язаним з людським фактором, та сприяти створенню більш безпечних умов праці на будівельних майданчиках.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціональності системи, зокрема на врахування інших факторів, що впливають на стан оператора (наприклад, температура чи рівень кисню в кабіні), а також на інтеграцію з іншими системами безпеки на будівельному майданчику для створення комплексної системи захисту.

#### *Література:*

1. Hussein M., Zayed T. Crane operations and planning in modular integrated construction: Mixed review of literature // Automation in Construction. 2021. Vol. 122. Article 103466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103466>.
2. China News. Crane Collapse in Western India Kills 20 and Injures 3 [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://www.chinanews.com.cn/gj/2023/08-02/10054165.shtml> (дата звернення: 02.11.2024).
3. China News. A Crane Collapse Accident Occurred in Turin, Italy, Resulting in 3 Deaths and 3 Injuries [Електронний ресурс]. 2021. URL: <https://www.chinanews.com.cn/gj/2021/12-20/9633902.shtml> (дата звернення: 02.11.2024).
4. Chen J., Chi H.-L., Du Q., Wu P. Investigation of Operational Concerns of Construction Crane Operators: An Approach Integrating Factor Clustering and Prioritization // Journal of Management in Engineering. 2022. Vol. 38. Article 04022020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0001044](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001044).
5. Hu S., Fang Y., Moehler R. Estimating and visualizing the exposure to tower crane operation hazards on construction sites // Safety Science. 2023. Vol. 160. Article 106044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106044>.
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. Article 04020071. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001861).

7. Johns B., Abdi E., Arashpour M. Crane payload localisation for curtain wall installation: A markerless computer vision approach // *Measurement*. 2023. Vol. 221. P. 113459.
8. Lee J., Lee S. Construction site safety management: a computer vision and deep learning approach // *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2. P. 944.
9. Yong Y. P., Lee S. J., Chang Y. H., Lee K. H., Kwon S. W., Cho C. S., Chung S. W. Object detection and distance measurement algorithm for collision avoidance of precast concrete installation during crane lifting process // *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 10. P. 2551.
10. Pazari P., Didehvar N., Alvanchi A. Enhancing Tower Crane Safety: A Computer Vision and Deep Learning Approach // *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 53, No. 1. P. 38.
11. Li Yu J., Zhou R. F., Miao M. X., Huang H. Q. An application of artificial neural networks in crane operation status monitoring // *Intelligent Automation Professional Committee of China Association of Automation*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
12. Hussain M., Ye Z., Chi H. L., Hsu S. C. Predicting degraded lifting capacity of aging tower cranes: A digital twin-driven approach // *Advanced Engineering Informatics*. 2024. Vol. 59. P. 102310.
13. Xiong G., Helo P., Ekström S., Shen Z. A Service-Oriented Autonomous Crane System // *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2024.
14. Radlov K., Ivanov G. Analysis of accidents with tower cranes on construction sites and recommendations for their prevention // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 951, No. 1, p. 012025. IOP Publishing.
15. Albadawi, Y., Takruri, M., & Awad, M. (2022). A review of recent developments in driver drowsiness detection systems. *Sensors*, 22(5), 2069.
16. Stancin, I., Cifrek, M., & Jovic, A. (2021). A review of EEG signal features and their application in driver drowsiness detection systems. *Sensors*, 21(11), 3786.
17. 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.
18. Sikander G., Anwar S. Driver fatigue detection systems: a review // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 20, No. 6. P. 2339–2352. DOI: 10.1109/TITS.2018.2868499.
19. Abu M. A., Ishak I. D., Basarudin H., Ramli A. F., Shapiai M. I. Fatigue and drowsiness detection system using artificial intelligence technique for car drivers // *Advanced Structured Materials*. 2022. Vol. 167. P. 421–430. DOI: 10.1007/978-3-030-89988-2\_31.
20. Alnagar M., Siam A. I., Handosa M., Medhat T., Rashad M. Z. Video-based real-time monitoring for heart rate and respiration rate // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 225. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120135.
21. Alioua N., Amine A., Rogozan A., Bensrhair A., Rziza M. Driver head pose estimation using efficient descriptor fusion // *Eurasip Journal on Image and Video Processing*. 2016. Vol. 2016, No. 1. DOI: 10.1186/s13640-016-0103-z.
22. Kortli Y., Jridi M., Falou A. A., Atri M. Face recognition systems: A survey. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 2. DOI: 10.3390/s20020342.
23. Almabdy S., Elrefaei L. Deep convolutional neural network-based approaches for face recognition. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 20. DOI: 10.3390/app9204397.
24. Saleem S., Shiney J., Shan B. P., Mishra V. K. Face recognition using facial features. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 80. Pp. 3857–3862. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.402.
25. Hasan M. K., Ahsan M. S., Mamun A.-A., Newaz S. H. S., Lee G. M. Human face detection techniques: A comprehensive review and future research directions. *Electronics*. 2021. Vol. 10, no. 19. DOI: 10.3390/electronics10192354.

26. Rahmad C., Asmara R. A., Putra D. R. H., Dharma I., Darmono H., Muhiqqin I. Comparison of Viola-Jones Haar cascade classifier and histogram of oriented gradients (HOG) for face detection. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/732/1/012038>.

27. Elngar A. A., Arafa M., Naeem A. E. R. A., Essa A. R., Shaaban Z. A. The Viola-Jones face detection algorithm analysis: A survey. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, pp. 85–95, 2021. <https://doi.org/10.54216/JCIM.060201>

28. Ngo H., Rakvic R., Broussard R., Ives R. An FPGA-based design of a modular approach for integral images in a real-time face detection system. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009. <https://doi.org/10.1117/12.820248>

29. Rezaei M., Klette R. Adaptive Haar-like classifier for eye status detection under non-ideal lighting conditions. *Proceedings of the 27th Conference on Image and Vision Computing New Zealand*. 2012. pp. 521–526. DOI: 10.1145/2425836.2425934.

30. Patel C. I., Labana D., Pandya S., Modi K., Ghayvat H., Awais M. Histogram of oriented gradient-based fusion of features for human action recognition in action video sequences. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 24. DOI: 10.3390

### References:

1. Hussein, M., Zayed, T. (2021). Crane operations and planning in modular integrated construction: Mixed review of literature. *Automation in Construction*, 1. 122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103466>. [in English].

2. China News. Crane Collapse in Western India Kills 20 and Injures 3. (2023). Retrieved from: <https://www.chinanews.com.cn/gj/2023/08-02/10054165.shtml>.

3. China News. A Crane Collapse Accident Occurred in Turin, Italy, Resulting in 3 Deaths and 3 Injuries. (2021). Retrieved from: <https://www.chinanews.com.cn/gj/2021/12-20/9633902.shtml>. [in English].

4. Chen, J., Chi, H.-L., Du, Q., Wu, P. (2022). Investigation of Operational Concerns of Construction Crane Operators: An Approach Integrating Factor Clustering and Prioritization. *Journal of Management in Engineering*, 38. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0001044](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001044). [in English].

5. Hu, S., Fang, Y., Moehler, R. (2023). Estimating and visualizing the exposure to tower crane operation hazards on construction sites. *Safety Science*, 160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106044>. [in English].

6. Zhang, X., Zhang, W., Jiang, L., Zhao, T. (2020). Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001861](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001861). [in English].

7. Johns, B., Abdi, E., Arashpour, M. (2023). Crane payload localisation for curtain wall installation: A markerless computer vision approach. *Measurement*, 221. P. 113459. [in English].

8. Lee, J., Lee, S. (2023). Construction site safety management: a computer vision and deep learning approach. *Sensors*, 23, 2, 944. [in English].

9. Yong, Y. P., Lee, S. J., Chang, Y. H., Lee, K. H., Kwon, S. W., Cho, C. S., Chung, S. W. (2023). Object detection and distance measurement algorithm for collision avoidance of precast concrete installation during crane lifting process. *Buildings*, 13, 10, 2551. [in English].

10. Pazari, P., Didehvar, N., Alvanchi, A. (2023). Enhancing Tower Crane Safety: A Computer Vision and Deep Learning Approach. *Engineering Proceedings*, 53, 1, 38.

11. Li Yu, J., Zhou, R. F., Miao, M. X., Huang, H. Q. (2015). An application of artificial neural networks in crane operation status monitoring. *Intelligent Automation Professional Committee of China Association of Automation*. Berlin, Heidelberg: Springer. [in English].

12. Hussain, M., Ye, Z., Chi, H. L., Hsu, S. C. (2024). Predicting degraded lifting capacity of aging tower cranes: A digital twin-driven approach. *Advanced Engineering Informatics*, 59, 102310. [in English].
13. Xiong, G., Helo, P., Ekström, S., Shen, Z. A. (2024). Service-Oriented Autonomous Crane System. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. [in English].
14. Radlov, K., Ivanov, G. (2020). Analysis of accidents with tower cranes on construction sites and recommendations for their prevention. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 951. 1, 012025. IOP Publishing. [in English].
15. Albadawi, Y., Takruri, M., Awad, M. (2022). A review of recent developments in driver drowsiness detection systems. *Sensors*, 22(5), 2069. [in English].
16. Stancin, I., Cifrek, M., & Jovic, A. (2021). A review of EEG signal features and their application in driver drowsiness detection systems. *Sensors*, 21(11), 3786. [in English].
17. 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. *Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics (PRASA-RobMech)*, 156-161. [in English].
18. Sikander, G., Anwar, S. (2019). Driver fatigue detection systems: a review . *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20. 6, 2339–2352. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2868499>. [in English].
19. Abu, M. A., Ishak, I. D., Basarudin, H., Ramli, A. F., Shapiai, M. I. (2022). Fatigue and drowsiness detection system using artificial intelligence technique for car drivers. *Advanced Structured Materials*, 167, 421–430. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89988-2\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89988-2_31). [in English].
20. Alnagar, M., Siam, A. I., Handosa, M., Medhat, T., Rashad, M. Z. (2023). Video-based real-time monitoring for heart rate and respiration rate. *Expert Systems with Applications*, 225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120135>. [in English].
21. Alioua, N., Amine, A., Rogozan, A., Benshair, A., Rziza, M. (2016). Driver head pose estimation using efficient descriptor fusion. *Eurasip Journal on Image and Video Processing*, 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13640-016-0103-z>. [in English].
22. Kortli, Y., Jridi, M., Falou, A. A. Atri, M. (2020). Face recognition systems: A survey. *Sensors*. 20, 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20020342>. [in English].
23. Almabdy, S., Elrefaei, L. (2019). Deep convolutional neural network-based approaches for face recognition. *Applied Sciences*, 9, 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9204397>. [in English].
24. Saleem, S., Shiney, J., Shan, B. P., Mishra, V. K. (2023). Face recognition using facial features. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3857–3862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.402>. [in English].
25. Hasan, M. K., Ahsan, M. S., Mamun, A.-A., Newaz, S. H. S., Lee, G. M. (2021). Human face detection techniques: A comprehensive review and future research directions. *Electronics*, 10, 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10192354>. [in English].
26. Rahmad, C., Asmara, R. A., Putra, D. R. H., Dharma, I., Darmono, H., Muhiqqin, I. (2020). Comparison of Viola-Jones Haar cascade classifier and histogram of oriented gradients (HOG) for face detection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/732/1/012038>. [in English].
27. Elngar, A. A., Arafa, M., Naem, A. E. R. A., Essa, A. R., Shaaban, Z. A. (2021). The Viola-Jones face detection algorithm analysis: A survey. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, 85–95. DOI: <https://doi.org/10.54216/JCIM.060201>. [in English].

28. Ngo, H., Rakvic, R., Broussard, R., Ives, R. (2009). An FPGA-based design of a modular approach for integral images in a real-time face detection system. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.820248>. [in English].

29. Rezaei, M., Klette, R. (2012). Adaptive Haar-like classifier for eye status detection under non-ideal lighting conditions. Proceedings of the 27th Conference on Image and Vision Computing New Zealand, 521–526. DOI: <https://doi.org/10.1145/2425836.2425934>. [in English].

30. Patel, C. I., Labana, D., Pandya, S., Modi, K., Ghayvat, H., Awais, M. (2020). Histogram of oriented gradient-based fusion of features for human action recognition in action video sequences. Sensors, 20, 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247299>. [in English].