

УДК 625.08:658.382.3:004.8

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРІВ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН НА ОСНОВІ НОСИМИХ СЕНСОРІВ

Асп. М. Ю. Крайнюк, канд. техн. наук О. В. Щербак,
д-р техн. наук Ю. В. Буц, канд. техн. наук. О. В. Крайнюк

INTELLIGENT MONITORING SYSTEM OF THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF ROAD CONSTRUCTION MACHINERY OPERATORS BASED ON WEARABLE SENSORS

PhD Student M. Krainiuk, PhD, Assoc. Prof. O. Shcherbak,
DSc, Prof. Yu. Buts, PhD, Assoc. Prof. O. Krainiuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.363991>



***Анотація.** Розроблено архітектуру багаторівневої системи моніторингу стану оператора асфальтоукладача на основі периферійних обчислень. Рішення базується на інтегрованому аналізі варіабельності серцевого ритму та концентрації летких органічних сполук від гарячої асфальтобетонної суміші. Описано авторський алгоритм ідентифікації мікросну за кутом нахилу голови оператора. Запропоновано сценарій адаптивного реагування у режимі обмеженої швидкості, що дозволяє запобігти дорожньо-транспортним пригодам та виникненню браку покриття без зупинки технологічного циклу. Впровадження системи мінімізує вплив «людського фактору» на безпеку дорожнього будівництва.*

***Ключові слова:** архітектура системи інтелектуального моніторингу, алгоритм критичних станів, асфальтоукладач, безпека праці, втома оператора, датчики*

***Abstract.** The paper addresses road construction safety by developing a multi-level architectural framework for the continuous monitoring of an asphalt paver operator's psychophysiological state. Motivated by high injury rates caused by fatigue and extreme conditions, the study proposes a proactive monitoring strategy based on integrated data streams, moving beyond conventional reactive video surveillance.*

The research integrates biometric indicators, such as heart rate variability (HRV) and skin temperature, with environmental stressors. A key innovation is the inclusion of sensors for volatile organic compounds (VOCs) and particulate matter (PM_{2.5}/PM₁₀) arising from hot asphalt. This allows the system to account for the toxicological impact of bitumen fumes as a factor accelerating operator exhaustion.

The technical implementation relies on a three-tier architecture that leverages Edge Computing. The Perception Layer ensures high-frequency data acquisition; the Edge Processing Layer performs real-time signal filtration to eliminate machinery vibrations; and the Application Layer manages decision-making logic. A central contribution is a proprietary algorithm that distinguishes between focused concentration and micro-sleep by analysing head tilt angle and muscle tonus via sensors integrated into the seat's headrest.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Крайнюк М. Ю., Щербак О. В., Буц Ю. В., Крайнюк О. В., 2026.

Special emphasis is placed on adaptive "Limp Mode" scenarios to maintain technological continuity. Upon detecting critical fatigue, the system avoids emergency shutdowns, which cause thermal discontinuities and paving joints by reducing speed to a safe minimum. Simultaneously, it activates warning beacons and transmits an SOS signal with GPS coordinates to dispatch. This tool minimises "human factor" risks and establishes new safety standards in the road construction industry.

Keywords: *intelligent monitoring system architecture, critical condition algorithm, asphalt paver, occupational safety, operator fatigue, sensors.*

Вступ. Сучасне дорожнє будівництво характеризується високою інтенсивністю та цілодобовим режимом робіт, що зумовлює критичне навантаження на психофізіологічний стан операторів. За даними HSE [1] та NHTSA [2], понад 30 % інцидентів на об'єктах інфраструктури спричинені людським фактором, а саме зниженням концентрації або втому, ризик яких зростає під час нічних змін. Впровадження сенсорних технологій дозволяє перейти від розслідування нещасних випадків до їх активного запобігання в реальному часі.

Тривала робота в умовах монотонності, інтенсивної вібрації та високих температур [3] призводить до накопичення втоми. Це створює необхідність розробки систем автоматизованого контролю стану персоналу безпосередньо в кабінах дорожніх машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри підтверджену статистику вирішального впливу людського чинника на безпеку робіт, існуючі системи телеметрії зосереджені переважно на предиктивному обслуговуванні механізмів. Питання динамічного моніторингу психофізіологічного стану людини залишається технічно не вирішеним через низку обмежень через низку обмежень сучасних методів виявлення небезпечних станів [4, 5].

Сучасні методи безпеки мають суттєві обмеження: масові носимі пристрої демонструють низьку вібростійкість, що призводить до похибок через змішування коливань техніки з активністю оператора [6, 7]. Водночас системи відеофіксації погляду зазвичай ідентифікують втому лише на

стадії її настання. Отже, спостерігається технологічний розрив між наявними методами контролю та специфічними умовами дорожнього будівництва, що зумовлює потребу в розробці випереджальних систем захисту.

Науковий пробіл у цій сфері полягає у відсутності інтегрованих моделей, які б пов'язували біометричні показники людини (такі як пульс чи температура шкіри) безпосередньо з агресивними умовами робочого середовища. Частково, в Україні над питаннями підвищення ефективності контролю за функціональним станом працівників та проблемами «людського фактору» в забезпеченні безпеки на залізничному транспорті приділяли увагу науковці Українського державного університету залізничного транспорту [8,9]. Однак в машинобудуванні, зокрема, залишається неврахованим кумулятивний вплив високих температур під час укладання асфальтобетону та специфіки нічних змін на організм працівника.

Сучасні технології моніторингу в будівництві розвиваються за трьома основними напрямками. Перший фокусується на сенсоризації техніки: від контролю вібрації до автономної навігації [10]. Ці рішення мінімізують технічні збої, проте не враховують стан оператора як активного учасника процесу.

Другий напрямок використовує комп'ютерний зір та алгоритми глибокого навчання для аналізу міміки й частоти кліпання [11]. Попри високу точність, такі системи чутливі до освітлення в кабіні та створюють психологічний дискомфорт через постійний відеонагляд.

Третій, найбільш перспективний напрямок, базується на носимих IoT-сенсорах та «розумному» спецодязі для аналізу варіабельності серцевого ритму (HRV) та електроміографії (EMG) [12], що дозволяє збирати дані не відволікаючи працівника.

Проте більшість існуючих моделей розроблені для лабораторних умов і не враховують агресивне середовище (вібраційний та тепловий фон), характерне для дорожніх робіт. Цей пробіл визначає необхідність створення адаптивної системи, що поєднує біометричний контроль із моніторингом зовнішніх чинників.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розробка методу комплексної оцінки стану оператора шляхом синхронізації біометричних показників із параметрами екологічного навантаження робочої зони. Це дозволить не лише фіксувати факт втоми, а й предиктивно визначати втрату працездатності під впливом кумулятивної дії вібрації та токсичних випарів асфальтобетону.

Порівняльна характеристика методів контролю стану оператора. Ефективність прогнозування небезпечних станів у дорожньому будівництві безпосередньо залежить від обраного технологічного підходу. На відміну від систем комп'ютерного зору, що фіксують лише зовнішні прояви втоми та є чутливими до умов освітлення й запиленості кабіни, біометричні сенсори дозволяють аналізувати внутрішні сигнали організму. Це забезпечує проактивність захисту, оскільки аналіз варіабельності серцевого ритму (HRV) дозволяє ідентифікувати ознаки виснаження за 10-15 хвилин до втрати оператором контролю [13]. Порівняльну характеристику методів за ключовими експлуатаційними критеріями наведено нижче:

– *Час ідентифікації загрози.* Відеоаналіз працює ретроспективно, тоді як носимі пристрої на основі HRV виявляють

деградацію когнітивних функцій на ранніх стадіях.

– *Стійкість до зовнішніх чинників.* Оптичні сенсори обмежені рівнем запиленості та використанням засобів індивідуального захисту. Біометричні браслети працюють незалежно від візуальних умов, але потребують алгоритмічного відсікання вібраційного фону.

– *Ергономіка та психологічний комфорт.* Відеофіксація сприймається як чинник додаткового стресу. Контактні сенсори інтегруються в аксесуари та працюють у фоновому режимі.

– *Широта діагностичного охоплення.* На відміну від відеоаналізу, контактні сенсори забезпечують мультимодальний моніторинг, дозволяючи одночасно відстежувати ризики теплового стресу.

Архітектура інтегрованого середовища моніторингу. Для забезпечення комплексного контролю безпеки дорожніх робіт розроблено концептуальну модель інтегрованого середовища оператора асфальтоукладача (рис. 1). На відміну від однопараметричних систем, запропонована схема реалізує синергію біометричного контролю та екологічного моніторингу робочої зони.

Структурно система «цифрової оболонки» розподілена на чотири функціональні блоки, що охоплюють ключові чинники ризику (рис. 1):

Блок 1 «Фізіологічний моніторинг». Поєднує використання смарт-браслета (пульс, температура шкіри, локальна вібрація HAV) та датчика положення голови, вбудованого у підголівник крісла. Це дозволяє аналізувати варіабельність серцевого ритму (HRV) у кореляції з нахилом голови для ідентифікації фази мікросну.

Блок 2 «Екологічний модуль». Розміщений на передній стійці кабіни на рівні дихання оператора. Здійснює безперервний аналіз концентрації летких органічних сполук (ЛОС), рівня CO₂, пилу

PM2.5 та шуму (ISO 9612), враховуючи токсичний вплив випарів бітуму як чинника, що прискорює втому.

Блок 3 «Техніко-ергономічний контроль». Об'єднує акселерометр сидіння для оцінки загальної вібрації тіла (WBV) згідно з ISO 2631-1 та емнісні датчики дотику на важелях керування. Це дозволяє верифікувати реальну присутність і

активність оператора та запобігати професійним захворюванням.

Блок 4 «Візуалізація та передача даних». Забезпечує агрегацію сигналів через протоколи BLE/ZigBee на бортовому планшеті. Система розраховує інтегральний «Індекс безпеки», надаючи оператору візуальні підказки для прийняття рішення про перерву, та передає дані до центру для дистанційного нагляду.



Рис. 1. Концептуальна схема розміщення сенсорів інтелектуальної системи в кабіні оператора асфальтоукладача

Джерело: створено авторами

Для забезпечення автономності та швидкодії системи в умовах віддалених об'єктів розроблено трирівневу ієрархічну модель обробки даних на основі периферійних обчислень (рис. 2).

Така архітектура дозволяє мінімізувати затримки та забезпечує безперервний цикл від реєстрації показників до активного реагування (рис. 3):

1. *Рівень сприйняття (сенсорний)* забезпечує зняття первинних показників через мережу біосенсорів (пульс, температура шкіри) та датчиків довкілля.

Синхронізація цих даних із динамікою машини дозволяє розрізнити звичайне фізичне навантаження та небезпечні реакції організму на зовнішній тепловий стрес.

Рівень обробки (аналітичний) виконує роль інтелектуального фільтра для усунення завад, спричинених вібрацією асфальтоукладчика. На цьому етапі відбувається порівняння поточних параметрів з індивідуальною фізіологічною нормою оператора для виявлення аномалій, що свідчать про втому або тепловий удар.

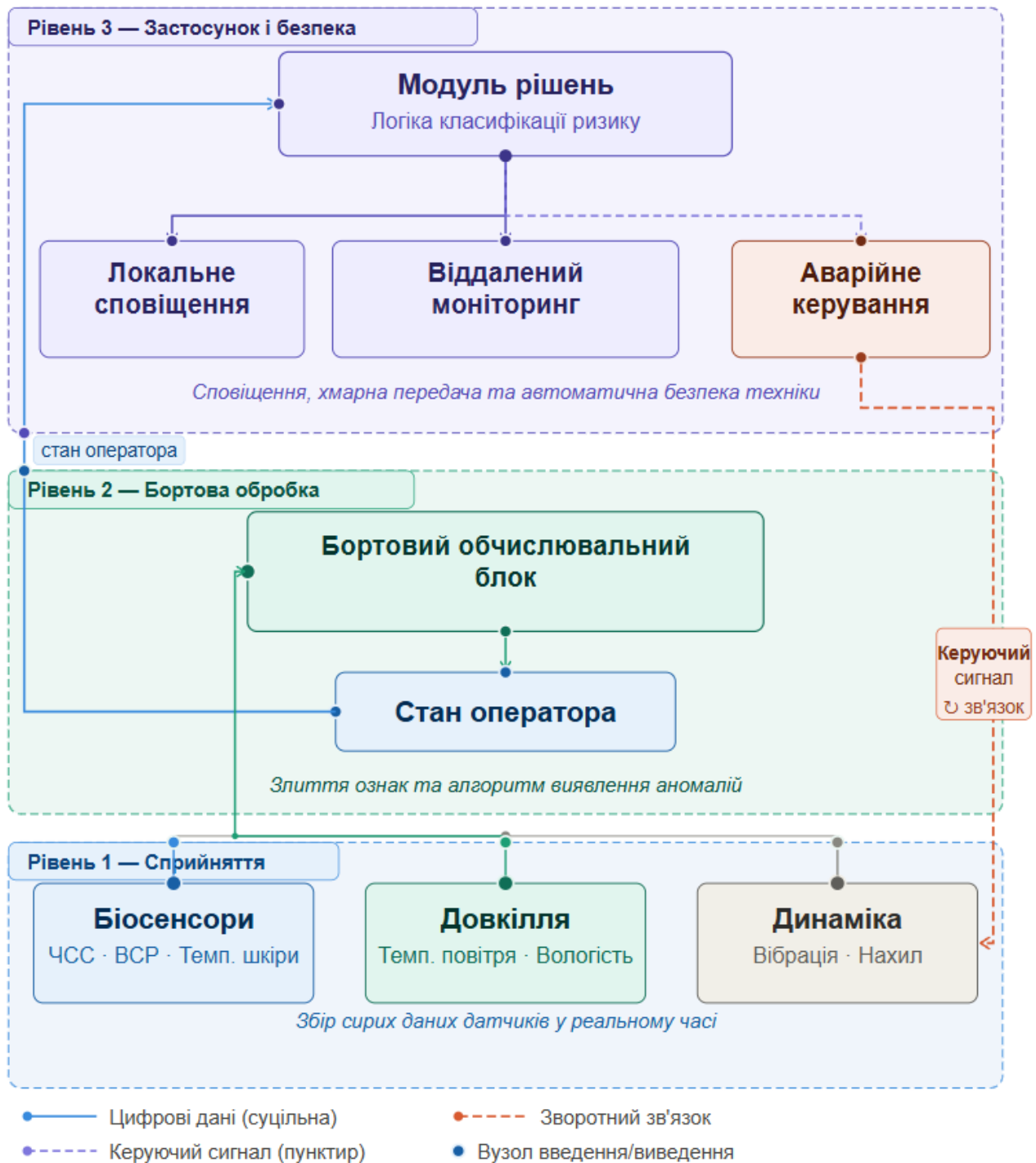


Рис. 2. Тривінева архітектура системи інтелектуального моніторингу та предиктивного захисту оператора дорожньо-будівельної техніки

Джерело: створено авторами

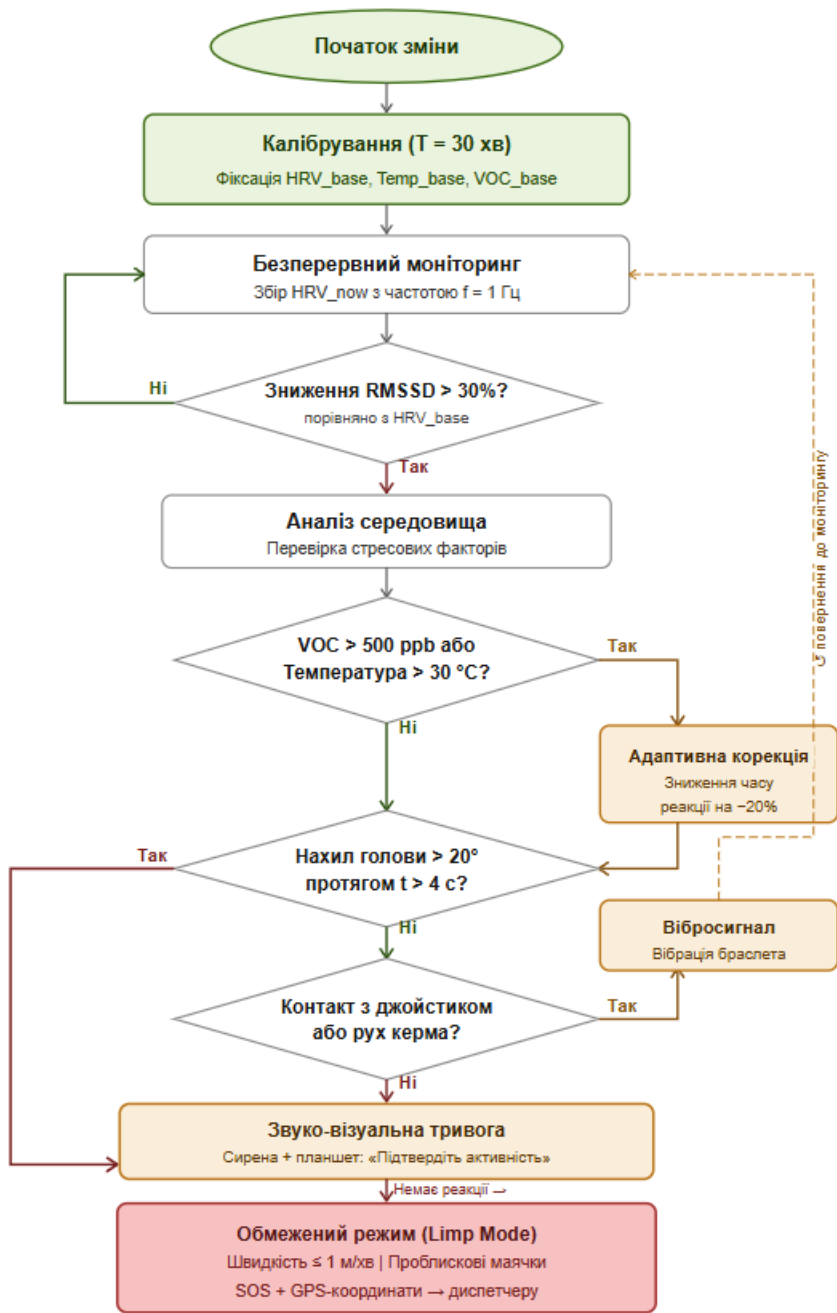


Рис. 3. Алгоритм детекції критичних станів втоми та предиктивного захисту оператора дорожньо-будівельної техніки

Джерело: створено авторами

2. Рівень безпеки (виконавчий) відповідає за прийняття рішень та активацію захисних сценаріїв у реальному часі. Система диференціює реакції: від локальних вібросигналів на браслеті для стимуляції уваги до дистанційного інформування диспетчера із зазначенням

GPS-координат.

Наявність контуру зворотного зв'язку дозволяє системі в автоматичному режимі впливати на механізми керування технікою (режим обмеженої швидкості), якщо оператор не реагує на попереджувальні сигнали.

Визначення критичних станів та алгоритми попередження. Ефективність випереджального нагляду базується на встановленні математичних порогів переходу оператора до фази виснаження. Основним індикатором обрано показник RMSSD (середньоквадратичне відхилення міжударних інтервалів). Оцінка стану та активація захисних сценаріїв (рис. 3) здійснюється за такими критеріями:

– *Порогове значення (Жовта зона).* Зниження RMSSD на 30% від базового рівня оператора. Система активує режим підвищеної уваги.

– *Критичний стан (Червона зона).* Зниження RMSSD на 50% у поєднанні зі зміною нахилу голови (понад 20° протягом 4 с). Система ідентифікує ризик мікросну та вмикає термінове сповіщення.

– *Тепловий та токсичний чинник.* Підвищення температури шкіри понад 37,5 °C при високій концентрації ЛОС (понад 500 ppb) сигналізує про ризик теплового удару.

– *Адаптивна корекція.* При фіксації граничних температур система автоматично знижує поріг чутливості до показників втоми на 15% (або скорочує час реакції на 20%), оскільки тепловий стрес прискорює втрату концентрації.

Висновки

1. У межах проведеного дослідження розроблено засади та багаторівневу будову інтелектуальної системи випереджального нагляду за станом оператора асфальтоукладача. Обґрунтовано, що традиційні способи контролю, засновані

лише на відеозаписі чи дистанційному вимірюванні параметрів машин, є недостатніми для особливих умов дорожнього будівництва. Доведено дієвість поєданого підходу, який зіставляє біологічні показники людини з чинниками шкідливого робочого середовища, такими як тремтіння, теплове навантаження та отруйні випари, що дозволяє виявляти загрози в момент їхнього зародження.

2. Запропонована унікальна конфігурація сенсорної мережі у форматі «цифрової оболонки» вперше поєднує відстеження мінливості серцевого ритму з виявленням ЛОС, що дає змогу враховувати токсичну дію гарячої суміші на пізнавальні здатності працівника. Сформований пристосований послідовник дій (алгоритм) вчасного попередження, що спирається на трирівневу структуру обробки даних та перевірку стану за нахилом голови, зводить до мінімуму кількість помилкових тривог. Впровадження захисного режиму обмеженої швидкості забезпечує найвищий рівень безпеки через поступове сповільнення техніки без переривання робочого процесу, що запобігає появі дефектів у дорожньому полотні.

3. Практичне застосування системи не лише зменшує ризики травмування через «людський чинник», а й створює підґрунтя для вдосконалення розкладів роботи та попередження професійних хвороб. Подальші дослідження будуть спрямовані на випробування дослідного зразка в реальних умовах для уточнення межових значень системи під час роботи.

Список використаних джерел

1. HSE (Health and Safety Executive). (2020) Managing fatigue risks at work. Guidance for the health and safety of workers. — London: HSE Books,— 42 p. <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg256.htm>
2. NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). (2018) Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey. — Washington, DC: U.S. Department of Transportation,— DOT HS 812 115.

3. Крайнюк, М. Ю., Крайнюк, О. В., Буц, Ю. В., Барбашин, В. В. (2024). Обґрунтування змін при проведенні атестації робочого місця тракториста в сучасних машинно-тракторних агрегатах. *Комунальне господарство міст*, 2024, 3(184), 209-215. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-209-215>
4. SAJRI, Nur Adibah, et al. (2024) Enhancing Safety Level at Construction Site Using Internet of Things (IoT). *Research in Management of Technology and Business*, 2024, 5.1: 1468-1485.
5. Li, J., Li, H., Umer, W., Wang, H., Xing, X., Zhao, S., & Hou, J. (2020). Identification and classification of construction equipment operators' mental fatigue using wearable eye-tracking technology. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103000>.
6. Mehmood, I., Li, H., Umer, W., Arsalan, A., Shakeel, M., & Anwer, S. (2022). Validity of facial features' geometric measurements for real-time assessment of mental fatigue in construction equipment operators. *Adv. Eng. Informatics*, 54, 101777. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101777>.
7. Krainiuk, M., Shcherbak, O. (2025). Intelligent Technologies for Optimising the Workplaces of Tractor Drivers: Safety and Comfort in Modern Machine and Tractor Units. In: Slavinska, O., Danchuk, V., Kunytska, O., Hulchak, O. (eds) *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort*. ITSESQC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1335. pp.211-222. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_19
8. Брусенцов, В. Г., Буц, Ю. В. (2025). Проблеми “людського фактору” в забезпеченні безпеки на залізничному транспорті. *Проблеми гарантування безпеки людини в умовах сучасних викликів: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції, 29-30 квітня 2025 року*. Луцьк: Відділ іміджу та промоції ЛНТУ, 2025. С. 53. <https://drive.google.com/file/d/1X8kkzQkoV4U8y18aHLB4ADkSQcrZaVEX/view>
9. Brusentsov, V., Puzyr, V., Vorozhbiian, M., Ivashchenko, M., & Datsun, Yu. (2020). Higher efficiency of control over functional status of locomotive crew members. To cite this article: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 985 012041 <https://www.researchgate.net/publication/347276501>
10. Jiang, Ying; He, Xiangyu. (2020) Overview of applications of the sensor technologies for construction machinery. *Ieee Access*, 8: 110324-110335.
11. Khan, Muhammad, et al. (2025) Wearable sensor-based fatigue classification under diverse thermal conditions. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2025, 30: 875-902.
12. Ouyang, Y., & Luo, X. (2025). Effects of physical fatigue superimposed on high temperatures on construction workers' cognitive performance. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106705>.
13. Vaussenat, F., Bhattacharya, A. et al. (2026). Early Drowsiness Detection via Second-Order Derivative Analysis of Heart Rate Variability: A Non-Contact ECG Approach with Machine Learning. *Sensors*. 26(4). 1348. doi.org/10.3390/s26041348

Reference

1. HSE (Health and Safety Executive). (2020) *Managing fatigue risks at work. Guidance for the health and safety of workers*. — London: HSE Books,— 42 p. <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg256.htm>
2. NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). (2018) *Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey*. — Washington, DC: U.S. Department of Transportation,— DOT HS 812 115.
3. Kraynyuk, M. Yu., Kraynyuk, O. V., Buts, Yu. V., Barbashyn, V. V. (2024). *Obgruntuvannya zmin pry provedenni atestatsiyi robochoho mistysya traktorysta v suchasnykh mashynno-traktornykh ahrehatakh*. [Justification of changes in the certification of the tractor

operator's workplace in modern machine-tractor units]. *Municipal economy of cities*, 2024, 3(184), 209-215. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-209-215>

4. SAJRI, Nur Adibah, et al. (2024) Enhancing Safety Level at Construction Site Using Internet of Things (IoT). *Research in Management of Technology and Business*, 2024, 5.1: 1468-1485.

5. Li, J., Li, H., Umer, W., Wang, H., Xing, X., Zhao, S., & Hou, J. (2020). Identification and classification of construction equipment operators' mental fatigue using wearable eye-tracking technology. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103000>.

6. Mehmood, I., Li, H., Umer, W., Arsalan, A., Shakeel, M., & Anwer, S. (2022). Validity of facial features' geometric measurements for real-time assessment of mental fatigue in construction equipment operators. *Adv. Eng. Informatics*, 54, 101777. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101777>.

7. Krainiuk, M., Shcherbak, O. (2025). Intelligent Technologies for Optimising the Workplaces of Tractor Drivers: Safety and Comfort in Modern Machine and Tractor Units. In: Slavinska, O., Danchuk, V., Kuniyska, O., Hulchak, O. (eds) *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort. ITSESQC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1335. pp.211-222. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_19 [in English].

8. Brusentsov, V. G., Buts, & Yu. V. (2025). Problemy “lyuds’koho faktoru” v zabezpechenni bezpeky na zaliznychnomu transporti [Problems of the “human factor” in ensuring safety in railway transport]. *Problems of guaranteeing human safety in the conditions of modern challenges: materials of the II All-Ukrainian scientific and practical conference, April 29-30, 2025*. Lutsk: Department of image and promotion of LNTU, 2025. С. 53. <https://drive.google.com/file/d/1X8kkzQkoV4U8y18aHLB4ADkSQcrZaVEX/view>

9. Brusentsov, V., Puzyr, V., Vorozhbiian, M., Ivashchenko, M., & Datsun, Yu. (2020). Higher efficiency of control over functional status of locomotive crew members. To cite this article: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 985 012041 <https://www.researchgate.net/publication/347276501>

10. Jiang, Ying; He, Xiangyu. (2020) Overview of applications of the sensor technologies for construction machinery. *Ieee Access*, 8: 110324-110335.

11. Khan, Muhammad, et al. (2025) Wearable sensor-based fatigue classification under diverse thermal conditions. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2025, 30: 875-902.

12. Ouyang, Y., & Luo, X. (2025). Effects of physical fatigue superimposed on high temperatures on construction workers' cognitive performance. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106705>.

13. Vaussenat, F., Bhattacharya, A. et al. (2026). Early Drowsiness Detection via Second-Order Derivative Analysis of Heart Rate Variability: A Non-Contact ECG Approach with Machine Learning. *Sensors*. 26(4). 1348. doi.org/10.3390/s26041348

Крайнюк Максим Юрійович, аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0009-0009-5640-1261. Тел.: +38 (097) 2066072. E-mail: krainiukmaksym@gmail.com.

Щербак Олег Віталійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-7953-2135. Тел.: +38 (099)5404231. E-mail: olegcherbak@gmail.com

Буц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-0450-2617. Тел.: +38(050)6830899. E-mail: butsyura@ukr.net

Крайнюк Олена Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри кібербезпеки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0001-9524-040X. Тел.: +38 (050)4042673. E-mail: alenuvarova@ukr.net

Krainiuk Maksym, postgraduate student, department of construction and road machines, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0009-0009-5640-1261. Tel. +38 (097) 2066072.

E-mail: krainiukmaksym@gmail.com.

Shcherbak Oleh, PhD (Tech.), Associate Professor, department of construction and road machines, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-7953-2135. Tel. +38 (099)5404231.

E-mail: olegcherbak@gmail.com.

Buts Yurii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of the department of occupational safety and environmental protection, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-0450-2617. Tel. +38(050)6830899.

E-mail: butsyura@ukr.net.

Krainiuk Olena, PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of cybersecurity, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0001-9524-040X. Tel. ++38 (050)4042673.

E-mail: alenauvarova@ukr.net.

Дата надходження статті 25.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 18.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY