

УДК 331.101.1

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.148.1252

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЕКЗОСКЕЛЕТАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В БУДІВНИЦТВІ ТА НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

ШАЛОМОВ В. А.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ДЕМЧЕНКО В. В.<sup>2\*</sup>, асп.,

ЖИРКОВ В. Ю.<sup>3</sup>, асп.,

ХРЯП П. Д.<sup>4</sup>, асп.

<sup>1</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 657-65-34, e-mail: [shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua](mailto:shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-6890-932X>

<sup>2\*</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 951-98-08, e-mail: [demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0001-1596-1010>

<sup>3</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 481-86-09, e-mail: [zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0002-2819-2094>

<sup>4</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 838-62-83, e-mail: [khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua](mailto:khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0003-2222-5614>

**Анотація. Постановка проблеми.** У зв'язку із постійним зростанням складності інфраструктурних проєктів та високим рівнем фізичного навантаження в будівельній галузі, виробничий травматизм залишається однією з ключових загроз, що призводить до значних людських та економічних втрат. Недосконалість традиційних методів безпеки, які мають переважно реактивний характер, зумовлює необхідність впровадження проактивних технологій. Висока інтенсивність праці та експлуатація об'єктів у складних умовах (висотні роботи, замкнені простори, об'єкти енергетики) спричиняють масовий розвиток скелетно-м'язових розладів, що становлять до 40% усіх професійних захворювань у секторі. Відсутність інтелектуальних систем моніторингу в реальному часі призводить до несвоєчасного виявлення критичної втоми працівників, теплового стресу та порушень біомеханіки рухів. Сучасний стан галузі вимагає переходу від пасивних засобів індивідуального захисту до активних роботизованих систем, таких як екзоскелети, інтегровані з алгоритмами штучного інтелекту. Окупація або руйнування промислових об'єктів, обмеження доступу до небезпечних зон та потреба у швидкому відновленні критичної інфраструктури роблять питання автоматизації та інтелектуальної підтримки фізичної праці найактуальнішим завданням сучасної охорони праці. **Мета статті** – полягає у виявленні та аналізі переваг інтеграції штучного інтелекту в конструкції промислових екзоскелетів для підвищення безпеки на об'єктах будівництва та критичної інфраструктури, визначенні технічних ризиків (таких як збої сенсорів чи помилки алгоритмів керування) та формуванні концептуальної моделі проактивного моніторингу стану працівника. Метою також є дослідження перспектив переходу від механічних систем підтримки до «розумних» Wearable AI систем, здатних прогнозувати небезпечні ситуації та автоматично коригувати рівень механічної допомоги залежно від фізіологічних показників користувача. **Висновок.** У ході аналізу потенційних небезпек при виконанні важких робіт на об'єктах критичної інфраструктури України було визначено, що основною загрозою є накопичувальний ефект фізичного перенавантаження та раптові травми через втрату координації. В умовах сучасних викликів, коли традиційний нагляд за безпекою праці обмежений динамічністю процесів, проведення моніторингу стандартними методами (анкетування, візуальний огляд) не є достатньо ефективним. Саме тому слід використовувати новітні методи з використанням автономних інтелектуальних екзоскелетів, що оснащені інерційними датчиками, біометричними сенсорами та системами комп'ютерного зору. Використання штучного інтелекту для аналізу великих даних дозволяє здійснювати скринінг фізіологічних параметрів (частота серцевих скорочень, температура тіла) та біомеханічних циклів безпосередньо під час виконання завдань. Впровадження таких апаратів є сьогодні найактуальнішим питанням не тільки для підвищення продуктивності, а й для забезпечення безпеки праці, де людина є ключовою ланкою управління. Для подальших досліджень необхідно виявити технічні можливості щодо адаптації закордонних розробок (типів Robo-Mate або Sarcos) до вітчизняних стандартів безпеки та перехід від пасивних шарнірних конструкцій до активних сервоприводних систем із інтелектуальним керуванням, що забезпечують захист від гіперекстензії суглобів та раптових збоїв системи.

**Ключові слова:** штучний інтелект; екзоскелети; безпека праці; будівельна індустрія; об'єкти критичної інфраструктури; скелетно-м'язові розлади; проактивний моніторинг; Wearable AI; біомеханіка; охорона праці

## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN EXOSKELETONS TO IMPROVE LABOUR SAFETY IN CONSTRUCTION AND CRITICAL INFRASTRUCTURE

SHALOMOV V.A.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
DEMCHENKO V.V.<sup>2\*</sup>, *PhDStud.*,  
ZHyrkov V.Yu.<sup>3</sup>, *PhDStud.*,  
KHRIAP P.D.<sup>4</sup>, *PhDStud.*

<sup>1</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 657-65-34, e-mail: [shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua](mailto:shalomov.volodymyr@pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-6890-932X>

<sup>2\*</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 951-98-08, e-mail: [demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:demchenko.vladyslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0001-1596-1010>

<sup>3</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 481-86-09, e-mail: [zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua](mailto:zhirkov.viacheslav@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0002-2819-2094>

<sup>4</sup> Department of Labor Protection, Civil and Ecological Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 838-62-83, e-mail: [khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua](mailto:khriap.pavlo@365.pdaba.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0003-2222-5614>

**Abstract. Problem Statement.** Due to the continuous increase in the complexity of infrastructure projects and the high level of physical load in the construction industry, occupational injuries remain one of the key threats, leading to significant human and economic losses. The inadequacy of traditional safety methods, which are primarily reactive, necessitates the implementation of proactive technologies. High labor intensity and the operation of facilities in difficult conditions (high-altitude work, confined spaces, energy facilities) cause the mass development of musculoskeletal disorders, which account for up to 40 % of all occupational diseases in the sector. The absence of intelligent real-time monitoring systems leads to the untimely detection of critical worker fatigue, heat stress, and biomechanical movement disorders. The current state of the industry requires a transition from passive personal protective equipment to active robotic systems, such as exoskeletons integrated with artificial intelligence algorithms. The occupation or destruction of industrial facilities, limited access to hazardous areas, and the need for rapid restoration of critical infrastructure make the issues of automation and intelligent support of physical labor the most urgent task of modern occupational safety. **The purpose of the article** is to identify and analyze the advantages of integrating artificial intelligence into industrial exoskeleton designs to enhance safety at construction and infrastructure sites, determine technical risks (such as sensor failures or control algorithm errors), and develop a conceptual model for proactive monitoring of the worker's condition. The objective is also to study the prospects of transitioning from mechanical support systems to "smart" Wearable artificial intelligence systems capable of predicting dangerous situations and automatically adjusting the level of mechanical assistance based on the user's physiological parameters. **Conclusion.** In the course of analyzing potential hazards when performing heavy work at infrastructure sites in Ukraine, it was determined that the main threat is the cumulative effect of physical overexertion and sudden injuries due to loss of coordination. In the context of modern challenges, where traditional occupational safety supervision is limited by the dynamism of processes, monitoring using standard methods (questionnaires, visual inspection) is not effective enough. That is why the latest methods using autonomous intelligent exoskeletons equipped with inertial measurement units, biometric sensors, and computer vision systems should be used. Using artificial intelligence for big data analysis allows for the screening of physiological parameters (heart rate, body temperature) and biomechanical cycles directly during task performance. The implementation of such devices is currently the most pressing issue not only for increasing productivity but also for ensuring environmental and technogenic safety, where humans are the key link in management. For further research, it is necessary to identify the technical possibilities for adapting foreign developments (such as Robo-Mate or Sarcos types) to national safety standards and the transition from passive hinged structures to active servo-driven systems with intelligent control that provide protection against joint hyperextension and sudden system failures.

**Keywords:** *artificial intelligence; exoskeletons; occupational safety; construction industry; critical infrastructure facilities; musculoskeletal disorders; proactive monitoring; Wearable AI; biomechanics; occupational health*

**Постановка проблеми** Будівельна галузь та сектор обслуговування великих інфраструктурних об'єктів стабільно класифікуються як найбільш небезпечні сфери професійної діяльності [1-2]. Згідно

зі статистичними даними, на цей сектор припадає значна частка фатальних випадків та важких травм на виробництві. Основною причиною тривалої непрацездатності є скелетно-м'язові розлади (MSDs) (рис. 1), які

виникають внаслідок постійних маніпуляцій з важкими вантажами, незручних робочих поз та повторюваних рухів. Як зазначають дослідники проекту Robo-Mate, у країнах ЄС витрати на лікування та компенсації, пов'язані з MSDs, сягають мільярдів євро щорічно.

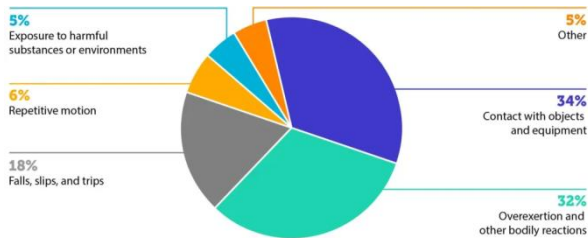


Рис. 1. Графік MSD поширеності захворюваності опорно-рухового апарату у будівництві

Традиційні системи управління охороною праці на об'єктах критичної інфраструктури та будівництва базуються на реактивному підході – аналізі інцидентів, що вже сталися. Проте в умовах сучасної цифровізації та потреби в швидкому відновленні інфраструктури, такий підхід є недостатньо ефективним. Існує критична потреба у переході до проактивного моніторингу, де небезпека ідентифікується до моменту отримання травми. Основним бар'єром тут виступає людський фактор: працівники часто ігнорують ознаки критичної втоми або теплового стресу. Впровадження екзоскелетів дозволяє механічно розвантажити тіло, але без «інтелектуальної» складової такі пристрої самі можуть стати джерелом ризику через непередбачувану взаємодію з користувачем або механічні збої.

**Аналіз публікацій.** Сучасні роботи А. Пандіта (2025) пропонують комплексну концепцію «Wearable AI», яка включає не лише механічну підтримку, а й інтегровані датчики для моніторингу здоров'я (частота серцевих скорочень (ЧСС), температура тіла) та алгоритми прогнозування ризиків [3].

Питання розробки та безпеки промислових екзоскелетів активно досліджуються провідними науковими групами. Проект Robo-Mate (Л. О'Салівана та ін.) став одним із перших фундаментів для розробки інтелектуальних систем

підтримки, зосередившись на ергономічних принципах та створенні стандартів безпеки для маніпуляцій з вантажами [4]. Проте на момент їхніх досліджень питання інтеграції штучного інтелекту (ШІ) перебувало на початкових етапах.

Важливий внесок у питання безпеки внесли А. Наср та Дж. Макфі (2024), які розробили настанови щодо проектування, контролю та тестування носимих роботизованих систем, виділивши ключові технічні виклики: від гіперекстензії суглобів до помилок у моделях машинного навчання [5].

**Мета дослідження** – полягає у науковому обґрунтуванні використання алгоритмів штучного інтелекту в конструкції активних екзоскелетів для створення проактивної системи захисту працівників будівельної та інфраструктурної галузей. Дослідження спрямоване на аналіз механізмів реального часу, що дозволяють виявляти втому та коригувати зусилля пристрою, а також на ідентифікацію потенційних ризиків, що виникають при цифровій взаємодії людини та роботизованого комплексу.

**Результати досліджень.** Інтеграція інтелектуальних систем у конструкцію промислових екзоскелетів відкриває нові горизонти безпеки але водночас створює комплекс специфічних технічних викликів які потребують детального розгляду. Одним із першочергових факторів ризику є порушення механічної узгодженості між шарнірами пристрою та анатомічними суглобами людини. Будь-яке зміщення осей обертання призводить до виникнення паразитних сил які замість розвантаження створюють тиск на м'які тканини та можуть спричинити пошкодження зв'язок або гіперекстензію. Такі ситуації часто виникають через неправильне налаштування кріплень або антропометричні особливості конкретного працівника, що вимагає розробки більш гнучких адаптивних конструкцій для інфраструктурних об'єктів.

Функціональні можливості сучасних засобів індивідуального захисту значно розширюються завдяки інтеграції екосистеми носимого штучного інтелекту що детально розглядається у дослідженні Адітья Пандіта (рис. 2). Автор наводить приклад використання інтелектуальних шоломів які

поєднують у собі дисплеї доповненої реальності з датчиками газу та акселерометрами для миттєвого попередження про структурну нестабільність об'єктів або токсичні викиди. В цій же роботі описуються біометричні жилети які здійснюють безперервний моніторинг температури тіла та частоти серцевих скорочень для запобігання тепловим ударами під час інтенсивної праці на відкритих майданчиках будівельних об'єктів. Особлива увага приділяється екзоскелетам, що оснащені датчиками електроміографії для аналізу рівня м'язової втоми в реальному часі та надання адаптивної біомеханічної підтримки яка дозволяє суттєво зменшити ризик виникнення травм від повторюваних стресів.

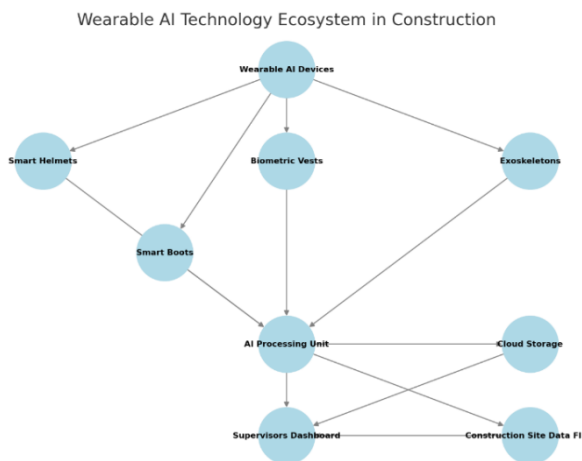


Рис. 2. Екосистема технологій носимого штучного інтелекту в будівництві

Будівельна галузь стикається з постійними загрозами від динамічних небезпек таких як падіння та обвали конструкцій або захворювання пов'язані з тепловим стресом та помилки спричинені критичною втомою персоналу. Традиційні засоби індивідуального захисту зокрема каски та жилети забезпечують лише пасивний захист і не мають здатності виявляти фізіологічні чи екологічні зміни або реагувати на них у режимі реального часу. Для подолання цих обмежень на об'єктах критичної інфраструктури розгортаються носимі технології з інтегрованим штучним інтелектом які докорінно змінюють підходи до безпеки через механізми активного моніторингу та

прогнозою аналітики. Такі системи включають біометричні датчики та алгоритми машинного навчання що вбудовані в предмети щоденного використання від шоломів до екзоскелетів. Ці пристрої здійснюють безперервний збір фізіологічних та поведінкових даних для їх обробки в реальному часі та передачі тривожних сигналів у центри управління що дозволяє здійснювати динамічні втручання з урахуванням точного розташування працівника.

Важливим етапом впровадження таких систем є розуміння функціональних особливостей кожного типу пристроїв та їх впливу на загальний рівень ризику. Розумні шоломи наприклад суттєво розширюють ситуаційну обізнаність завдяки доповненій реальності тоді як біометричні жилети дозволяють виявляти ранні ознаки серцево-судинного навантаження. Розумне взуття та браслети доповнюють цю екосистему функціями відстеження патернів ходьби та рівня кисню в крові що дає змогу ідентифікувати виснаження задовго до виникнення аварійної ситуації. Порівняльний аналіз цих технологій представлений у таблиці 1 дозволяє оцінити як ключові переваги так і технічні виклики пов'язані з їх практичною імплементацією.

Використання представлених технологій дозволяє перетворити стандартні засоби захисту на інтелектуальні вузли передачі даних які забезпечують стійкий зв'язок між працівником та керівництвом. Це створює надійну інформаційну базу для прийняття рішень щодо подальшого навчання персоналу та вдосконалення внутрішніх політик безпеки на підприємстві.

Взаємозв'язок між робочим середовищем та погіршенням стану здоров'я працівників є давно визнаним фактором у промисловому секторі. Скелетно-м'язові розлади які вражають м'язи та суглоби виступають однією з основних причин відсутності на робочому місці та передчасного виходу на пенсію через непрацездатність. Поширеність цих розладів постійно зростає в усіх професіях по всьому світу що створює значний фінансовий тягар для окремих осіб та роботодавців і загалом для економіки держав.

## Порівняльний огляд пристроїв із підтримкою штучного інтелекту в будівництві

Тип пристрою	Ключові характеристики	Переваги для безпеки	Виклики впровадження
Розумні шоломи	Доповнена реальність (AR), екологічні сенсори, геозонування	Покращення ситуаційної обізнаності, виявлення структурних загроз та газів	Висока вартість, необхідність навчання персоналу
Біометричні жилети	Датчики серцевого ритму, температури тіла та гідратації	Виявлення ранніх ознак теплового стресу та втоми	Питання конфіденційності, обмежений термін служби батареї
Екзоскелети зі штучним інтелектом	Допомога в русі, ергономічна оптимізація, адаптивний зв'язок	Зниження скелетно-м'язових розладів, підвищення витривалості	Громіздка конструкція, висока вартість впровадження
Розумне взуття	GPS-трекінг, датчики тиску, виявлення ковзання та падіння	Запобігання інцидентам, пов'язаним із падінням, моніторинг ходи	Шуми в даних при роботі на нерівній місцевості
Браслети	Датчики SpO <sub>2</sub> , відстеження рухів, варіабельність серцевого ритму	Постійний моніторинг здоров'я, раннє виявлення виснаження	Обмежений діапазон дії сенсорів, проблеми з точністю при русі

Основними факторами ризику є ручне переміщення великих або незручних вантажів висока частота та тривалість таких операцій а також повторювані рухи та тривале перебування у незручних позах таких як нахили або скручування тулуба. З метою зниження цих ризиків роботодавцям та проєктувальникам рекомендується впроваджувати ієрархічну систему обов'язків при організації робочого простору враховуючи фізичні можливості та обмеження людського тіла.

Еволюція технологій для підтримки ручної праці пройшла шлях від механізованих інструментів та автоматизованих систем до колаборативних інтерактивних роботів і нарешті до носимих екзоскелетів.

Незважаючи на запровадження відповідного законодавства та стандартів на міжнародному та локальному рівнях розвиток таких технологій як промислові та екзоскелетні роботи відбувається набагато швидше ніж розробка нормативних вимог. У цьому контексті проєкт Robo-Mate що фінансується Європейською Комісією ставить за мету впровадження екзоскелетів у промислове середовище для посилення спроможностей працівників.

Використання таких пристроїв дозволяє зменшити навантаження на

здоров'я персоналу одночасно зберігаючи або навіть підвищуючи ефективність виробництва у будь-яких умовах де вимагається ручна праця. Консорціум проєкту об'єднав дванадцять партнерів із семи країн включаючи промислових розробників та експертів з ергономіки.

Робота в рамках проєкту Robo-Mate призвела до накопичення значних наукових знань щодо кінетики та кінематики рухів людського тіла та принципів конструювання інтелектуальних систем. На етапі розробки фахівці використовують ці дані для створення легких гнучких та зручних у використанні прототипів екзоскелетів які відповідають принципам ергономіки.

Важливим інструментом поширення результатів цих досліджень є стандартизація оскільки стандарти визнаються ключовим чинником інновацій (рис. 3). Вони забезпечують мінімально прийнятні настанови для створення безпечних та надійних продуктів які сумісні з людською формою та її можливостями. Продукція що виготовляється відповідно до таких стандартів проходить ретельне тестування що мінімізує витрати та сприяє взаємодії на європейському та світовому ринках. Стандартизація безпеки промислових екзоскелетів є необхідною для надання дизайнерам та користувачам узгодженої бази критеріїв для безпечного

проектування та експлуатації пристроїв підвищуючи впевненість роботодавців у надійності таких інноваційних рішень [4].

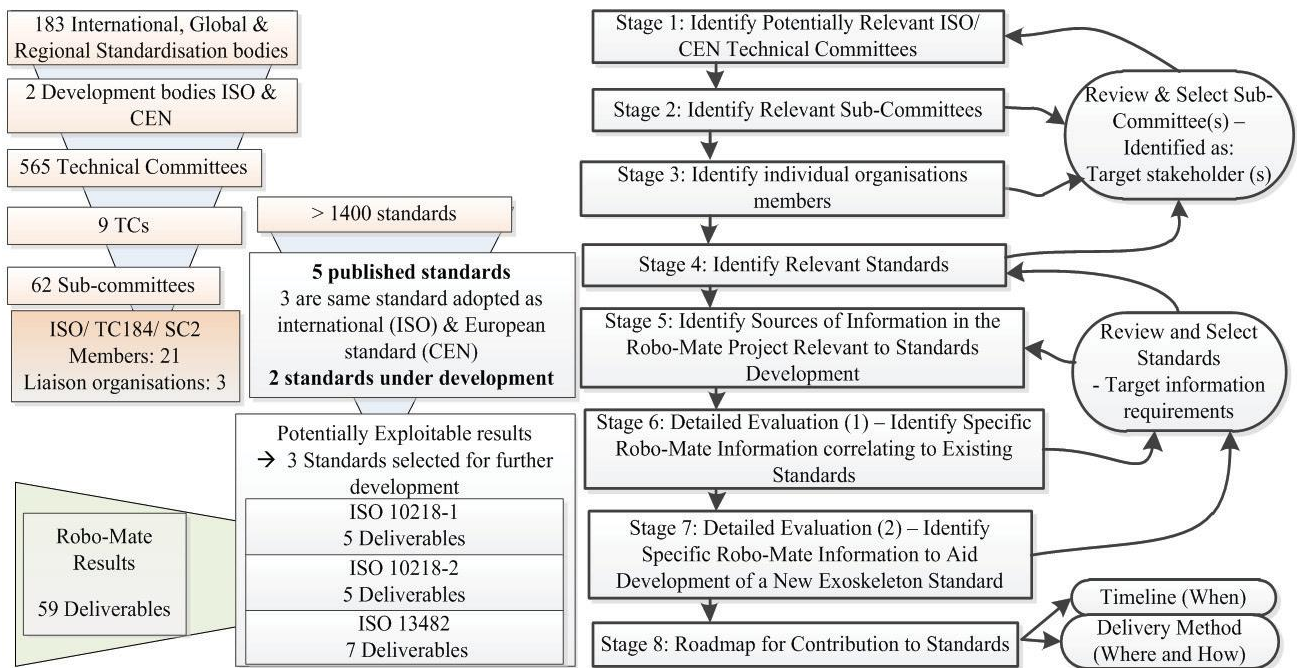


Рис. 3. Схема процесу оцінки для оптимізації розробки стандартів промислових екзоскелетів

Окрім біометричного моніторингу та загальних ергономічних переваг особливої уваги заслуговують специфічні технічні та експлуатаційні виклики які детально класифікував Алі Наср у своїх дослідженнях щодо безпеки носимої робототехніки. Він виділяє розгалужену групу механічних ризиків серед яких найбільш критичним для інфраструктурних об'єктів є порушення узгодженості між осями обертання екзоскелета та анатомічними суглобами людини. Таке зміщення призводить до виникнення небажаних паразитних сил та моментів що можуть спричинити дискомфорт або навіть серйозні травми м'яких тканин і зв'язок.

Також існує значна небезпека гіперекстензії суглобів у разі програмного збою або механічної несправності системи обмеження ходу приводів що потребує впровадження дублюючих механічних стопорів у конструкцію активних пристроїв.

На рівні систем керування Наср акцентує увагу на ризиках пов'язаних із використанням алгоритмів машинного навчання які часто діють за принципом чорної скриньки. Непрозорість прийняття

рішень такими моделями в непередбачуваних умовах будівельного майданчика може призвести до нестабільної поведінки пристрою або раптових і занадто швидких рухів приводів. Це створює загрозу втрати рівноваги та падіння працівника що особливо небезпечно при роботі на висоті або поблизу рухомих механізмів. Крім того актуальним залишається питання надійності зв'язку оскільки будь-яке відключення сенсорів або затримка в передачі даних між модулями ШІ та виконавчими механізмами може спровокувати неконтрольовану реакцію системи або її повне блокування в незручній для оператора позі.

Для мінімізації зазначених загроз Алі Наср пропонує впроваджувати комплексну стратегію валідації безпеки яка складається з кількох послідовних етапів. Першим кроком є використання багатотілесних динамічних симуляцій що дозволяють змодельовати взаємодію людини та робота у віртуальному середовищі та виявити потенційно небезпечні режими роботи без ризику для реального персоналу. Наступним обов'язковим етапом є проведення експериментів з участю людини в контурі керування (Human-In-The-Loop) які дозволяють перевірити здатність системи

адекватно реагувати на раптові зовнішні збурення або непередбачувані дії користувача. Такий підхід забезпечує високий рівень надійності активних екзоскелетів та дозволяє адаптувати алгоритми штучного інтелекту до специфічних умов експлуатації на складних об'єктах енергетики та будівництва де фактори навколишнього середовища такі як вологість або вібрації можуть суттєво впливати на роботу електронних компонентів [4].

Практична ефективність екзоскелетів із підтримкою штучного інтелекту, спрямованих на запобігання втомі та проблемам зі спиною, була успішно підтверджена під час випробувань у компанії «TECHNAL UK», яка є провідним постачальником алюмінієвих віконних та фасадних систем для будівельної індустрії. Цей проєкт був реалізований за сприяння експертів з охорони праці компанії Stanley та продемонстрував реальні переваги використання роботизованих систем у динамічному середовищі складу та виробництва. Основним завданням було надання підтримки працівникам, які щоденно виконують підйом важких металевих профілів вагою до двадцяти п'яти кілограмів. Специфіка роботи вимагала від операторів низько нахилитися до стелажів, щоб підняти профілі, а потім піднімати їх на плечі для транспортування, що створювало значне пікове навантаження на поперековий відділ хребта працівників.

Випробування тривало два тижні та охоплювало працівників різних вікових категорій, зокрема представників віком понад шістьдесят та близько двадцяти років, що дозволило оцінити вплив технології на різні групи персоналу. Процес дослідження включав тижневий етап індукції для звикання до обладнання та наступний тиждень активних вимірювань із використанням сенсорів для визначення різниці в показниках до та після втручання.

Аналіз отриманих даних продемонстрував, що використання інтелектуального екзоскелета «Наро Васк» (рис. 4) дозволяє потенційно запобігти розтягненню м'язів нижньої частини спини на тридцять відсотків. Крім того,

результати аналізу показали можливість зменшення загального добового навантаження на хребет одного працівника на величину до п'яти тонн, що є критично важливим показником для довгострокового збереження працездатності.

Суб'єктивні звіти учасників випробувань повністю збіглися з об'єктивними даними датчиків, оскільки обидва працівники повідомили про миттєве полегшення та надійну підтримку спини під час зміни. Молодший працівник відзначив, що завдяки використанню екзоскелета він відчував значно меншу втому наприкінці дня та повертався додому в набагато кращому фізичному стані, висловивши повну готовність використовувати такий захист протягом кожної зміни.



*Рис. 4. Використання екзоскелета Наро Васк під час маніпуляцій з важкими металевими профілями на складі*

Керівництво компанії TECHNAL UK оцінило успіх випробувань як вагомий внесок у систему безпеки та прийняло рішення про подальше розширення використання цієї технології серед більшої кількості працівників. Цей приклад наочно демонструє, що впровадження екзоскелетів на інфраструктурних об'єктах забезпечує не лише зниження виробничих ризиків, але й безпосередньо покращує комфорт та якість

життя персоналу за рахунок точного аналізу та компенсації фізичних зусиль [6].

### Висновки

1. Встановлено, що перехід від реактивного підходу до проактивного моніторингу за допомогою технологій «Wearable AI» є критично необхідним для зниження рівня виробничого травматизму та запобігання скелетно-м'язовим розладам (MSDs). Використання інтелектуальних систем дозволяє ідентифікувати небезпечні фактори, такі як критична втома або порушення біомеханіки, до моменту настання травми.

2. Аналіз функціональних можливостей екосистеми носимого ШІ показав, що синергія різних пристроїв (розумних шоломів, біометричних жилетів та екзоскелетів) дозволяє створити цілісну систему ситуаційної обізнаності. Зокрема, використання датчиків електроміографії та інерційних вимірювальних пристроїв забезпечує адаптивну підтримку, яка підлаштовується під індивідуальні антропометричні особливості та поточний фізіологічний стан працівника.

3. Виявлено ключові технічні виклики, що супроводжують впровадження інтелектуальних екзоскелетів: необхідність суворої механічної узгодженості шарнірів з анатомією людини, стабільність алгоритмів машинного навчання в умовах «шумних» даних будівельного майданчика та питання захисту конфіденційності біометричних даних.

4. Практичне випробування екзоскелета «Наро Вак» на об'єктах компанії «TECHNAL UK» підтвердило високу ефективність технології, продемонструвавши можливість зниження навантаження на хребет до 5 тонн за зміну та зменшення ризику розтягнень м'язів нижньої частини спини на 30 %. Суб'єктивне схвалення технології працівниками різних вікових категорій свідчить про готовність галузі до адаптації таких рішень.

5. Обґрунтовано, що подальший розвиток галузі потребує прискореної стандартизації безпеки промислових екзоскелетів. Створення єдиної міжнародної бази критеріїв проектування та експлуатації, за прикладом проєкту «Robo-Mate», є необхідною умовою для масштабування технологій та підвищення довіри роботодавців до інноваційних засобів індивідуального захисту.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беліков А. С., Шаломов В. А., Кульбач А. А., Калда Г. С., Коваленко О. В., Бородіна Н. А., Третьяков О. В., Данченко Ю. М. Ергономіка в будівництві (2-ге вид.). Дніпро : Журфонд, 2022. ISBN 978-966-934-332-1.
2. Шаломов В. А., Беліков А. С., Жирков В. Ю., Хряп П. Д., Шаломов О. В. Ергономічність як фактор забезпечення безпеки під час роботи будівельних машин на прикладі екскаваторів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 5 (023). С. 160–165. URL: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.160.1105>
3. Pandit A. Integrating Wearable AI Technology for Construction Worker Safety : A Framework for Real-Time Health, Fatigue, and Risk Monitoring. *International Journal on Science and Technology (IJSAT)*. 2025. Vol. 16, iss. 1. Pp. 1–18. URL: <https://doi.org/10.71097/IJSAT.v16.i1.3154>
4. O'Sullivan L., Nugent R. and van der Vorm J. Standards for the safety of exoskeletons used by industrial workers performing manual handling activities. *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 3. Pp. 1418–1425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.306>
5. Nasr A., Inkol K. and McPhee J. Safety in Wearable Robotic Exoskeletons : Design, Control, and Testing Guidelines. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2024. Vol. 16(10). P. 101011. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4066900>.
6. MEPCA Engineering. AI exoskeleton technology trial at construction supplier shows potential for reducing back injuries. 2024. URL: <https://mepca-engineering.com/ai-exoskeleton-technology-trial-at-construction-supplier-shows-potential-for-reducing-back-injuries/>

### REFERENCES

1. Bielikov A.S., Shalomov V.A., Kulbach A.A., Kalda H.S., Kovalenko O.V., Borodina N.A., Tretiakov O.V. and Danchenko Yu.M. *Erhonomika v budivnytstvi* [Ergonomics in Civil Engineering]. Dnipro : Zhurfond, 219 p. ISBN 978-966-934-332-1. (in Ukrainian).
2. Shalomov V.A., Bielikov A.S., Zhyrkov V.Yu., Khriap P.D. and Shalomov O.V. *Erhonomichnist yak faktor zabezpechennia bezpeky pid chas roboty budivelnikh mashyn na prykladi ekskavatoriv* [Ergonomics as a factor in ensuring safety during the operation of construction machines on the example of excavators]. *Ukrayins'kyi zhurnal*

*budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 5 (023), pp. 160–165. URL: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.160.1105> (in Ukrainian).

3. Pandit A. Integrating Wearable AI Technology for Construction Worker Safety : A Framework for Real-Time Health, Fatigue, and Risk Monitoring. *International Journal on Science and Technology (IJSAT)*. 2025, vol. 16, iss. 1, pp. 1–18. URL: <https://doi.org/10.71097/IJSAT.v16.i1.3154>

4. O’Sullivan L., Nugent R. and van der Vorm J. Standards for the safety of exoskeletons used by industrial workers performing manual handling activities. *Procedia Manufacturing*. 2015, vol. 3, pp. 1418–1425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.306>

5. Nasr A., Inkol K. and McPhee J. Safety in Wearable Robotic Exoskeletons : Design, Control, and Testing Guidelines. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2024, vol. 16 (10), pp. 101011. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4066900>

6. MEPCA Engineering. AI exoskeleton technology trial at construction supplier shows potential for reducing back injuries. 2024. URL: <https://mepca-engineering.com/ai-exoskeleton-technology-trial-at-construction-supplier-shows-potential-for-reducing-back-injuries/>

Надійшла до редакції: 07.02.2026 р.

Прийнято після рецензування: 05.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.