

УДК 349.2

Б. М. Цимбал¹, д.держ.упр., доцент, проф. каф. (ORCID 0000-0002-2317-3428)

Є. О. Рибка¹, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-5396-5151)

П. В. Свіржевський¹, здобувач вищої освіти (ORCID 0009-0004-2463-5841)

О. В. Рибалова¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-8798-4780)

А. С. Петрищев², к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-2631-1723)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

²Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ

Дослідження зосереджене на розробці методики підвищення рівня безпеки роботів та маніпуляторів у промисловому середовищі. Роботизовані системи ефективно виконують складні та небезпечні завдання, але водночас створюють нові ризики для працівників, що потребує систематичної оцінки та управління. Було проведено аналіз основних факторів, які впливають на безпеку роботизованих систем, зокрема механічні, ергономічні, термічні та електричні небезпеки. На основі цього розроблено універсальну методику оцінки професійних ризиків, яка враховує тяжкість можливих ушкоджень, ймовірність їх виникнення, кваліфікацію персоналу, швидкість настання небезпеки та рівень обізнаності працівників. Методика включає розроблені чек-листи, матриці оцінки ризиків та анкети для ідентифікації небезпечних факторів та визначення рівня ризиків. Для перевірки її ефективності було проведено апробацію на машинобудівному підприємстві, де оцінено ризики для працівників, які працюють із вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 та зварювальним роботом ABB IRB 1400 M94A. Було встановлено, що найбільш небезпечним робочим місцем є робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A, бо він зіштовхується з механічними, термічними, електричними, ергономічними, комбінованими небезпека та небезпекою випромінювання, найбільше значення має ризик при контакті оператора з струмоведучими частинами або з'єднаннями, що складає 51 (суттєвий). Результати показали ключові ризики на робочих місцях, а також ефективність розроблених заходів із їх мінімізації. Запроваджено навчання персоналу, обмеження доступу до небезпечних зон та використання засобів індивідуального захисту. Методика може бути застосована для ідентифікації ризиків та впровадження заходів безпеки на підприємствах різних галузей.

Ключові слова: професійні ризики, безпека праці, коботи, роботи, маніпулятори, штучний інтелект

1. Вступ

Впровадження промислових роботів та маніпуляторів може неоднозначно впливати на безпеку, професійне здоров'я та благополуччя працівників [1]. Роботи та штучний інтелект радикально змінюють роль працівників у виробничому процесі [2]. Промислові роботи та маніпулятори зазвичай використовувалися для фізично інтенсивних та небезпечних завдань, які часто пов'язані з шкідливим впливом на професійне здоров'я та підвищеним ризиком нещасних випадків на виробництві [3]. Роботи також можуть запобігти численним небезпекам у надзвичайних ситуаціях, таких як розливи хімікатів [1]. Роботи також можуть мінімізувати ризики, пов'язані з помилками людини [4]. З іншого боку, роботи можуть становити небезпеку для працівників. Складна взаємодія між людьми та роботами може мати шкідливий вплив на психічне здоров'я працівників. Використання спільного робочого простору з людьми, може призвести до додаткових ризиків для безпеки [1–3].

Підвищення рівня безпеки роботів та маніпуляторів, зокрема удосконалення етапу оцінки професійних ризиків, має вагоме значення для підвищення ефективності функціонування підприємства, стабільного виробництва та забезпечення безпеки працівників.

Тому, підвищення рівня безпеки роботів та маніпуляторів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасне виробництво характеризується взаємодоповнюваністю між людьми та автоматизацією. Тому необхідно розробляти й впроваджувати нові методи та інструменти для проєктування та реалізації спільних робочих місць, які забезпечують безпеку, ергономіку та ефективність. У контексті HRC (взаємодії людини та роботи) люди й коботи працюють разом для досягнення ефективності [2]. Коботи забезпечують небезпечні, вимогливі та швидкі завдання, люди можуть працювати понад свої фізичні обмеження [3]. Існує значна кількість літератури з ергономіки для HRC-системи, але вона більше зосереджена на технологічних аспектах коботів, таких як сенсорні системи, системи позиціонування та розпізнавання [4–6]. Однак ергономіка є вторинним аспектом застосування безпеки в HRC. Ергономіка була представлена в різних способах: одні автори оцінювали цей аспект за витратами на енергію, а інші – у контексті уникнення незручних поз та підйому важких вантажів під час роботи з роботами [7–10]. Найефективніший підхід, який враховує ефективність лінії та рівень ергономічного ризику, – це розгляд факторів, таких як тривалість циклу й кількість станцій, а також фактори ризику для ергономіки під час балансування складної лінії [11–13].

Застосування штучного інтелекту (ШІ) в ергономіці має значний потенціал для покращення здоров'я та безпеки на робочому місці, оптимізації продуктивності працівників та зменшення частоти порушень опорно-рухового апарату. Системи комп'ютерного зору на базі ШІ можуть точно визначати та аналізувати пози працівників, виявляючи ергономічні ризики в режимі реального часу. Це дозволяє впроваджувати профілактичні заходи для запобігання травмам та сприяння здоровим робочим звичкам [14]. Дослідження показують, що системи виявлення втоми на основі ШІ можуть підвищити уважність та пильність працівників, що призводить до зменшення рівня аварій [15]. Програмне забезпечення на основі ШІ можна використовувати для проєктування та оптимізації робочих місць з урахуванням антропометрії працівників і конкретних вимог завдань. Це допомагає запобігати незручним позам, зменшувати м'язову напругу, покращувати комфорт та продуктивність [16, 17]. Однак впровадження ШІ в ергономіку не позбавлене викликів. Етичні аспекти, питання конфіденційності і необхідність створення прозорих та підзвітних систем ШІ мають бути пріоритетними. Важливо знайти баланс між використанням потужності ШІ для ергономічних удосконалень та вирішенням цих етичних питань для відповідального впровадження технологій.

Важливим аспектом є обмеження прикладених сил та тиску з боку роботів у межах допустимих для людського організму, щоб запобігти серйозним травмам. Поведінка робота має бути адаптивною до змін та повторного планування його траєкторії в непередбачуваних критичних ситуаціях. Основним ризиком у поточних впровадженнях HRC є відсутність детермінованих випадків – оскільки людина може уповільнити або зупинити роботу, є ймовірність, що певні часові цикли не можуть бути дотримані [18]. Оскільки людина зазвичай необмежена у робочому просторі, існує вірогідність виникнення нових небезпечних ситуацій, які раніше не враховувалися [19].

Існує методика RULA (Rapid Upper Limb Assessment) для оцінки професійного ризику опорно-рухового апарату, пов'язаного із завданнями зі складання. Виходячи з проведеного дослідження, впровадження роботів-коллаборантів у виробничий процес може суттєво покращити умови праці, усуваючи найкритичніші завдання, наприклад, нанесення клею, які можуть призвести до травм. civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-1

розладів, розтягнення м'язів спини та шиї [20], але дана методика є вузькоспеціалізованою враховує тільки ергономічні ризики та не враховує ризики для самих роботів.

ISO/TR 14121-2:2012 містить практичні вказівки щодо оцінки професійного ризику, ISO 10218-1:2011, ISO 13849-1:2015 та Європейська директива з машинобудування 2006/46ЄС описують процедури оцінки ризиків робочого місця та його окремих компонентів [21], але вони не в повній мірі враховують взаємодію людини з роботом, робота з людиною та робота з роботом, робота з ін. машиною чи обладнанням.

Існують дослідження, автори яких вимірювали показники безпеки та гнучкості в робототехніці, однак вони не враховують оцінку показників безпеки та гнучкості у фазі роботи кобота [22]. Крім того, більшість досліджень, що враховували ергономічність, безпеку та гнучкість, застосовували лише якісні критерії оцінювання [23]. Існує потреба в нових кількісних підходах, здатних одночасно виміряти ергономічність, безпеку та гнучкість системи спільного робочого середовища на всіх етапах процесу виготовлення або складання.

Оцінка професійних ризиків повинна враховувати вплив роботів та технологій штучного інтелекту (ШІ) на людей, крім фізичних, механічних або хімічних, ще й кіберзагрози та психологічні ризики. Оцінка професійних ризиків повинна враховувати взаємодію (фізичну та соціальну), психосоціальну, кібербезпеку часову та соціальну [24, 25]. Тому необхідно розробити методику оцінки професійних ризиків, яка б враховувала зростаючі можливості роботів та штучного інтелекту, включаючи взаємодію людини та робота.

Перспективними є дослідження з безпеки та гігієни праці в галузі складування, сільського господарства, гірничодобувної промисловості та будівельних робіт; ЗІЗ для робітників біля колаборативних роботів та спільна робота з кількома роботами [26]. У промисловому середовищі запобігання контакту без бар'єрів і огорож зазвичай базується на впровадженні вдосконалених систем датчиків та стратегій контролю; контакти повинні бути виявлені – можливо, передбачені – та пом'якшені внутрішніми функціями безпеки та заходами захисту. Координація людей і роботів має відповідати ергономічним принципам, щоб зменшити фізичне та розумове навантаження та підтримувати синергетичну співпрацю [27].

Людина повинна відчувати себе в безпеці під час співпраці з роботом. Відчуття безпеки можна досягти, довіряючи роботу, системі і, по суті, алгоритмам, які розроблені для HRC. Рівень ефективності може бути досягнутий шляхом безпечної співпраці, коли людина-працівник не відчуває небезпеки. Довіру можна заслужити за допомогою зрозумілих та передбачуваних дій робота, які повинні бути вирішені за допомогою розумного двонаправленого зв'язку між людиною і роботом. Однак навіть невеликі аварії можуть стати причиною обґрунтованої втрати довіри до роботизованих систем [28].

Існує шість основних факторів, які впливають на сприйняття безпеки, а саме: контекст використання роботів, комфорт, досвід та знайомство з роботами, довіра, відчуття контролю над взаємодією, прозорі та передбачувані дії роботів. Ці фактори можуть допомогти кількісно оцінити взаємодію з роботами та особливості їх конструкції, що потенційно може покращити сприйняття безпеки. Виявлені особливості також можуть допомогти кількісно оцінити сприйняття безпеки, що дозволить роботам адаптувати свою поведінку для пом'якшення психологічної шкоди [29, 30].

Сучасні роботи повинні бути запрограмовані з врахуванням вимог стандартів безпеки ЄС [31]. У траєкторії руху робота можна імітувати безпечну взаємодію. При цьому швидкість робота можна зменшити перед зіткненням з людиною, що ось-ось станеться, і це може бути мінімізація ризику зіткнення або зменшення шкоди від ризику [32].

Відповідно до стандарту ISO 10218–2, повинні бути проведена оцінка професійних ризиків перед введенням в експлуатацію промислових роботизованих систем, то б то ще на етапі їх проектування. У сучасній промисловій практиці оцінка професійних ризиків проводиться на основі досвіду, експертних знань та простих інструментів, таких як чек-листи. Однак нещодавня тенденція до співпраці людини та робота (HRC) значно збільшує складність роботизованих систем та ускладнює оцінку професійних ризиків, існуючі методики їх оцінки не відповідають сучасним потребам [33].

Для ідентифікації та оцінки ризиків використовуються методики оцінки професійних ризиків ISO 12100 [34] та 4M [35], але дані методики є не ефективними, бо враховують тільки фізичні фактори та не враховують психологічні та організаційні. Що обумовлює необхідність розширення масштабів оцінки ризиків робіт, щоб включити інші фактори небезпеки, окрім фізичних. До цих критичних факторів відносяться особистісні фактори операторів з рисами характеру, психологією та спілкуванням; пов'язані з роботою елементи з умовами роботи, роботою для психологічного клімату, організацією тощо; і системні фактори, а саме цілісність програмного забезпечення та кібербезпека.

Довготривалі небезпеки та наслідки хронічних станів та травм на робочих місцях робіт, таких як втрата слуху, гіперчутливість шкіри, вібрація, також є одним із напрямів для проведення досліджень факторів небезпеки робототехнічних завдань та травм операторів. Дві третини травм, спричинених нещасними випадками робіт, викликають психологічні та особисті риси робот-операторів [35].

Оцінка ризиків є одним із важливих процесів соціального впровадження робіт. При оцінці ризиків та проектуванні безпеки систем за участю різних зацікавлених сторін моделювання та візуалізація пов'язаних елементів важливі не лише для розробників, але й для користувачів. Через різноманітність сервісних робіт оцінка ризику в табличній формі стає складною та вимагає додаткових пояснень, тому для ефективного визначення потенційних проблем застосовується розширення SafeML, яке є інструментом для уніфікованої оцінки ризиків різноманітних сервісних робіт [36]. Але недоліком даної методики є складність застосування, адаптування під зміни умови використання, вона не є універсальною.

Поточні норми та стандарти вимагають оновлення оцінки ризиків для кожної зміни в роботизованому застосуванні, включаючи задіяні деталі, роботизовані компоненти та тип взаємодії в робочому просторі. Існує програмний інструмент аналізу ризиків, який слугує для підтримки управління змінами для адаптивних колаборативних роботизованих систем у моделі підключеної фабрики. Інструмент здатний автоматично визначати, де були внесені зміни в компоненти або процеси в рамках конкретної програми за допомогою його інтеграції з підключеною заводською архітектурою та дозволяє оновлювати оцінку ризиків. Але даний інструмент має значну кількість помилок упущення, спрацювань та є складним у використанні, необхідно коригувати графічний інтерфейс, збільшувати розмір поля з текстом, щоб відображати весь текст без потреби бічного прокручування [37].

Інструментам моделювання та тестування оцінки ризиків RA бракує реаліс-

тичності через спрощені моделі, обмежену динамічну реалістичність та обмеження інтеграції датчиків. Штучний інтелект (ШІ) може покращити методи оцінки ризиків. Перевагами інтеграції ШІ є систематична ідентифікація збоїв процесів, ретельна ідентифікація небезпек, моделювання складних систем, а недоліками – обмежене охоплення динаміки людина-робот, залежність від історичних даних, обмеження адаптивності, інтенсивність ресурсів, залежність від дизайну, складність, контроль за людським фактором, залежність від даних у вирішенні ризиків, пов'язаних з HRC. Дотримання стандартів значно підвищує надійність оцінки ризиків на основі штучного інтелекту, забезпечуючи узгоджені та перевірені результати за різними сценаріями HRC [38].

Комбінацію FMEA та аналіз краватку-метелик застосовують для ранньої оцінки безпеки співпраці людини та робота на прикладі промислового випадку з виробничої сфери. Інтеграція аналізу метелика з розрахунком RPN від FMEA дає можливість оцінити ризики в середовищах HRC. Поєднуючи низхідну візуалізацію та деталізацію аналізу краватки-метелика з нижньою класифікацією рівня ризику за допомогою розрахунку RPN, можна систематично визначати, аналізувати та розглядати потенційні небезпеки в процесі спільної роботи людини та робота [39]. Але дана інтеграція методів не дає можливість кількісно оцінити ризики.

Через труднощі зі збором випадків травм у реальному житті інтелектуальних сервісних роботів неможливо використати наявну інформацію про травми для побудови їх сценаріїв, необхідних для оцінки ризику. Тому експерименти проводять у віртуальній реальності для перевірки та підтвердження джерел шкоди, з метою покращення наукового визначення ймовірності та тяжкості травм, пов'язаних із безпекою продукту, використовується метод ваги, щоб присвоїти різні ваги ймовірності та тяжкості виникнення травм. При цьому здійснюється оцінка тяжкості травм на основі експериментів з моделюванням, оцінка тяжкості травм на основі анкет опитування споживачів та оцінка тяжкості травм на основі експертної оцінки [40]. Але недоліком цього методу є те, що коефіцієнти ваги споживачів та досліджень експертів є рівними, коефіцієнт ваги досліджень з моделювання є більшим ніж досліджень експертів.

Необхідно переосмислити режими безпеки та спільної роботи людини та робота, щоб змодельовати співпрацю з коботами та розглядати їх як справжніх співробітників. При цьому методика оцінки ризиків може передбачати такі критерії: тяжкість травми, частота впливу ризику та можливість уникнення ризику. Результатом оцінки є необхідний рівень ефективності, якому повинні відповідати окрема функції безпеки або заходи безпеки, необхідні для мінімізації ідентифікованих ризиків [41].

Методи аналізу ризиків, такі як HAZOP та STPA, довели свою ефективність забезпечення безпеки системи протягом багатьох років. Однак розмірність та невідзначеність людського фактора багатьох допоміжних робототехнічних додатків ставить під сумнів здатність цих методів забезпечувати всебічне висвітлення питань безпеки з міждисциплінарної точки зору своєчасно та економічно ефективним способом. Завдання з фізичною допомогою, в яких цілий ряд динамічних контекстів вимагає постійної фізичної взаємодії людини та робота, такі як, наприклад, одягання за допомогою робота або сидіння і стояння, представляють нову парадигму безпечного проектування та методології аналізу безпеки [42].

Роботи, що працюють у небезпечному середовищі, повинні вміти оцінювати пов'язані з цим ризики перед виконанням будь-якого заданого завдання. Хоча в

такому сценарії можна врахувати кілька ризиків, ризики, засновані на умовах навколишнього середовища, рідко досліджуються. Робот повинен коригувати свій шлях, щоб врахувати небезпеки, з якими він може зіткнутися. Робот повинен переміщатися в ядерному середовищі, оптимізуючи свій шлях, щоб уникнути зон з високим рівнем радіації та високою температурою [43].

Існують модель оцінки ризиків краватка-метелик, що включає принципи EN ISO 12100 та надає можливості уникнення небезпек, яка дозволяє здійснити комплексну оцінку ризику потенційного зіткнення людини-оператора з «рукою робота» з урахуванням чотирьох груп небезпечних факторів: фізичних, організаційних, психосоціальних та інформаційних [44].

Оцінка потенційних ризиків, які зварювальні роботи становлять для людей повинна бути для навколишнього середовища. Зварювальні роботи потенційно можуть становити значний ризик для здоров'я та безпеки людей, особливо якщо їх неправильно встановити, обслуговувати та експлуатувати. Тому дослідження повинні бути зосереджені на розробці більш комплексних методологій оцінки ризиків, які враховують не тільки фізичні небезпеки, пов'язані зі зварювальними роботами, але їх вплив на навколишнє середовище та потенційні довгострокові наслідки для здоров'я працівників [45].

Метод Вільяма Файна застосовують для того, щоб оцінити рівні ризику та визначити пріоритетність заходів під час сумісної роботи робота та людини. Методологія оцінки ризиків за активної участі працівників включає сприйняття працівників існуючих небезпек на їх робочих місцях. Оцінка ризиків на робочих місцях може включати стратегію участі з додатковими методологіями до методу Вільяма Файна (наприклад, статистичний контроль) [46].

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка методики оцінки професійних ризиків, що дозволить підвищити рівень безпеки роботів та маніпуляторів.

Досягнення зазначеної мети ґрунтується на реалізації наступних завдань:

- розробити методику оцінки професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами;
- апробувати (випробувати) розроблену методику оцінки професійних ризиків під час роботи з роботами і маніпуляторами на машинобудівному підприємстві та розробити заходи з управління професійними ризиками.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є рівень безпеки роботів та маніпуляторів. Предметом дослідження є розробка методики оцінки професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами. Гіпотеза дослідження – розробка методики оцінки професійних ризиків дозволить підвищити рівень безпеки роботів та маніпуляторів. Аналіз методів оцінки професійних ризиків при взаємодії з роботами та маніпуляторами надає можливість виявити їх недоліки та надати рекомендації щодо їх вдосконалення. Випробування розробленої методики оцінки професійних ризиків при роботі з роботизованим вимірювальним та зварювальним обладнанням машинобудівного підприємства підтвердить її ефективність та точність у практичному застосуванні. Тому, розроблена методика оцінки професійних ризиків роботів та маніпуляторів може стати важливим інструментом для ідентифікації і оцінки специфічних ризиків, розробки та реалізації заходів, які підвищать рівень безпеки промислових роботів та маніпуляторів.

З метою перевірки гіпотез, вирішення дослідницьких завдань була використана система прийомів та способів таких, як метод абстрагування, аналізу й синтезу, порівняння, спостереження та експертний метод оцінки професійних ризиків.

Дослідження проводили із застосуванням роботизованого обладнання: вимірювальної руки Absolute Arm 7-Axis, координатно-вимірювальної машини GLOBAL S GREEN 05.07.05 та зварювального робота ABB IRB 1400 M94A. Для аналізу і обробки експериментальних даних було застосовано персональний комп'ютер. Для обробки та аналізу результатів даних випробування, розробки чек-листа та анкети оцінки ризиків працівників від роботизованого обладнання використовувалась програма, табличний процесор Microsoft Office Excel.

5. Розробка універсальної методики оцінки професійних ризиків

Більшість методик з оцінки професійних ризиків враховують тільки важкість шкоди до якої може призвести конкретна небезпека та можливість виникнення цієї шкоди.

Крім цього більшість методик не передбачають врахування поширювання шкоди на кілька осіб, тобто настання групового нещасного випадку.

Також більшість методик не враховує нараження осіб на небезпеку, надійність обладнання, хроніку шкоди для здоров'я та нещасних випадків, порівняння ризиків, можливість усунення чи обмеження шкоди, швидкість настання шкоди та людський чинник. Крім того необхідно враховувати не тільки механічні, електричні, термічні небезпеки, утворювані шумом, спричинені вібрацією, випромінюванням, матеріалами, речовинами, радіаційні, ергономічні небезпеки, які пов'язані з середовищем у якому використовується роботи і маніпулятори, а також комбінація небезпек. Методики оцінки ризиків є вузьконаправленими, бо враховують тільки ризики на певному робочому місці та не враховують небезпеки для самих роботів та маніпуляторів, а також небезпеки, які виникають при взаємодії з іншими пристроями та системами, то б то небезпеки до оточуючого середовища роботів та маніпуляторів, крім людини.

Для розроблення методики оцінки ризиків, які виникають при взаємодії людини, робота та навколишнього середовища було враховано вимоги міжнародних та європейських стандартів: ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності промислових роботів. Частина 1. Роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT); ДСТУ EN ISO 10218-2:2018 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності промислових роботів. Частина 2. Роботизовані системи та їхні поєднання (EN ISO 10218-2:2011, IDT; ISO 10218-2:2011, IDT) та ДСТУ EN ISO 12100:2016 Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT) [47–49].

Ризик, який пов'язаний з певною небезпечною ситуацією, залежить від тяжкості шкоди та можливості виникнення цієї шкоди (рис. 1).

В свою чергу важкість шкоди, до якої може призвести конкретна небезпека є функцією важкості травми або шкоди для здоров'я працівників та поширювання шкоди. Можливість виникнення шкоди є функцією нараження осіб на небезпеки, виникнення небезпечної події та можливість усунення чи обмеження шкоди. Можливість усунення чи обмеження шкоди є функцією кваліфікації працівників, швидкості небезпечної ситуації, яка може призвести до шкоди, обізнаності працівників із ризиком, можливістю людини уникнути шкоди чи обмеження, практичний досвід та знання.

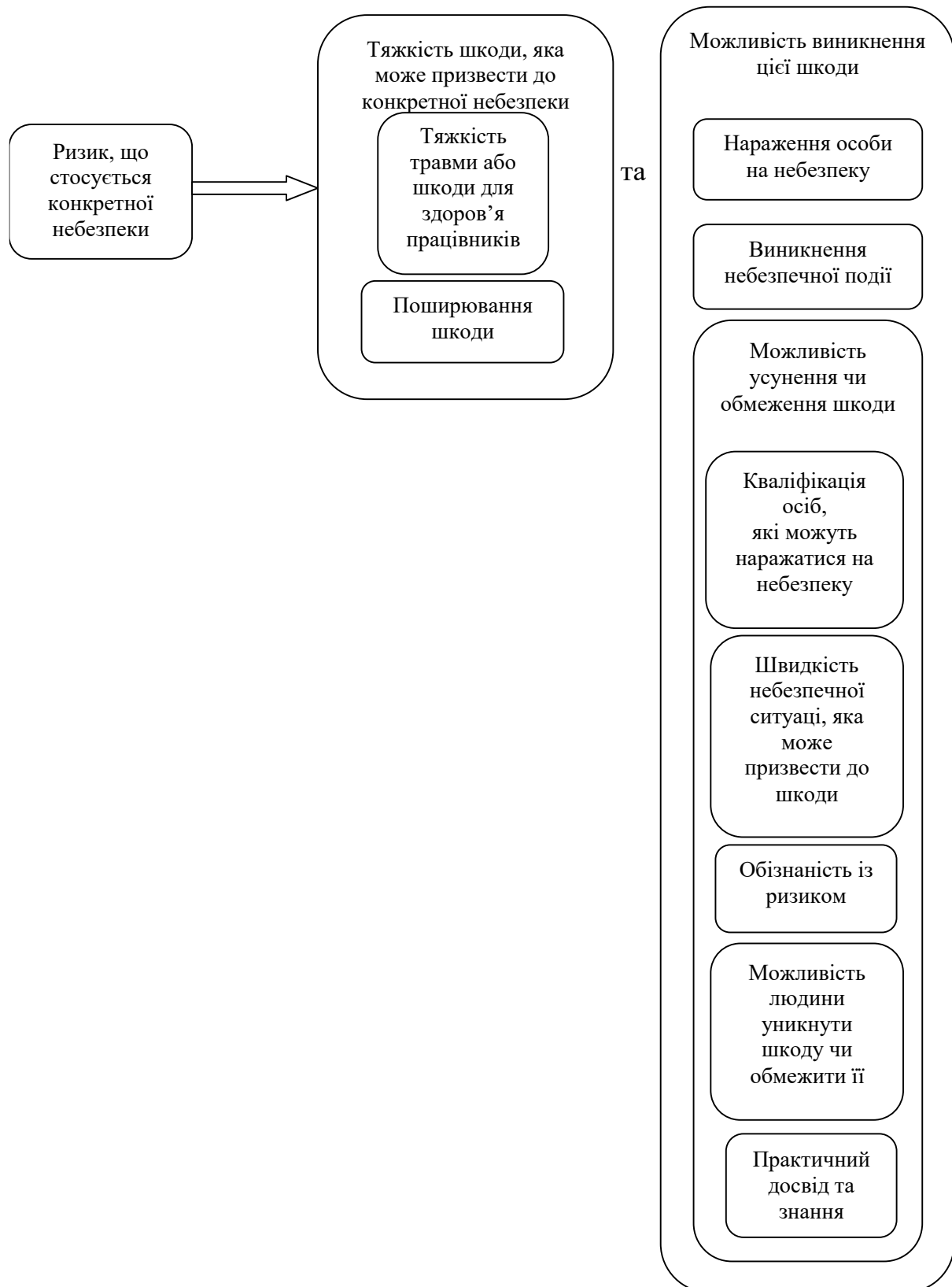


Рис. 1. Елементи ризику

Рівень професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами можливо визначити за формулою:

$$R = B \cdot P, \quad (1)$$

де B – тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки; P – можливість виникнення цієї шкоди.

Тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки:

$$B = N + K, \quad (2)$$

де N – тяжкість травми або шкоди для здоров'я; K – поширювання шкоди.

Тяжкість травми або шкоди для здоров'я може бути: незначною 1, серйозною 2 або смертельною 3. При цьому поширення шкоди може бути на одну особу 1 або кілька осіб, тобто груповий нещасний випадок 2.

Можливість виникнення цієї шкоди:

$$P = V + I + U, \quad (3)$$

де V – нараження осіб на небезпеку, I – виникнення небезпечної події та U – можливість усунення чи обмеження шкоди.

Нараження осіб на небезпеку, яка впливає на ймовірність виникнення шкоди залежить від таких чинників: необхідність доступу в небезпечну зону (для нормальної роботи, виправлення помилок, обслуговування або ремонту тощо), при цьому якщо виникає потреба тоді 1, якщо ні – 0; характеру доступу (наприклад ручне видалення матеріалу), якщо виконується ручна праця тоді 1, якщо ні – 0; часу перебування в небезпечній зоні, при цьому якщо людина довго перебуває в небезпечній зоні тоді 1, якщо не довго 0; кількості осіб, які потребують доступ, якщо багато тоді 1, якщо ні – 0 та частоти доступу, якщо частий доступ 1 та нечастий 0.

Виникнення небезпечної події, яка впливає на ймовірність шкоди залежить від таких чинників: надійності та інших статистичних даних, якщо не надійно, то 1, якщо надійне – 0; хроніка нещасних випадків, якщо нещасні випадки повторюються 1, якщо ні – 0; хроніка щодо шкоди для здоров'я, якщо спостерігається 1, якщо ні 0; порівняння ризиків, наприклад у разі використання роботів та маніпуляторів з однаковими властивостями, необхідно враховувати відповідність стандартним вимогам, правильність використання та ін., якщо вони не відповідають стандартним вимогам, неправильно експлуатуються або використовуються не за призначенням, то 1, якщо все відповідає тоді 0.

Можливість усунення чи обмеження шкоди визначається за формулою:

$$U = Q + T + O + D + Z, \quad (4)$$

де Q – кваліфікація осіб; T – швидкість настання шкоди; O – обізнаність із ризиком; D – можливість людини обмежити шкоду чи уникнути її; Z – практичний досвід та знання.

Можливість усунення чи обмеження шкоди залежить від таких чинників: кваліфікація осіб, якщо особи не кваліфіковані – 1, якщо кваліфіковані 0; швидкість настання шкоди: одразу 3, швидко 2, повільно 1; обізнаність із ризиком: працівник знає загальну інформацію про робота чи маніпулятора, зокрема інформацію для користувача 0, не знає – 1, виконував безпосереднє спостереження 0, якщо ні 1, знає застережні знаки та індикатори, зокрема на машині 0, якщо не знає 1; можливість людини обмежити шкоду чи уникнути її, наприклад рефлекс, жвавість або можливість втечі 0, якщо не має 1; практичний досвід та знання: щодо робота або маніпулятора 1, щодо подібних роботів чи маніпуляторів 2, відсутній досвід 3.

Якщо врахувати формули (2), (3) та (4), тоді професійний ризик можливо визначити за формулою:

$$R = (N + K)(V + I + Q + T + O + D + Z), \quad (5)$$

Для спрощення проведення розрахунків з визначення професійного ризику необхідно користуватися розробленим чек-листом (табл. 1) та матрицею (табл. 2).

Табл. 1. Чек-лист для визначення величини професійного ризику

Критерій оцінювання	Величина критерію оцінювання										
Тяжкість травми або шкоди для здоров'я, N	незначна 1			серйозна 2				смертельна 3			
Поширення шкоди, K	одна особа 1					кілька осіб 2					
Тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки, B=N+K	2		3			4			5		
Необхідність доступу в небезпечну зону	ні, 0					так, 1					
Характер доступу (ручна праця)	ні, 0					так, 1					
Часу перебування в небезпечній зоні (довго)	ні, 0					так, 1					
Кількості осіб, які потребують доступ (багато)	ні, 0					так, 1					
Частота доступу (часто)	ні, 0					так, 1					
Нараження осіб на небезпеку, V (сумарне значення «так»)	0	1	2	3	4	5					
Надійність (ненадійний)	ні, 0					так, 1					
Хроніка нещасних випадків (спостерігається)	ні, 0					так, 1					
Хроніка щодо шкоди для здоров'я (спостерігається)	ні, 0					так, 1					
Порівняння ризиків (не відповідають стандартним вимогам, неправильно експлуатуються або використовуються не за призначенням)	ні, 0					так, 1					
Виникнення небезпечної події, I (сумарне значення «так»)	0	1	2	3	4						
Кваліфікація осіб Q	кваліфіковані 0					некваліфіковані 1					
Швидкість настання шкоди T	повільно 1					швидко 2			одразу 3		
Працівник знає загальну інформацію про роботу чи маніпулятора, зокрема інформацію для користувача	так,0					ні, 1					
Виконував безпосереднє спостереження	так,0					ні, 1					
Знає застережні знаки та індикатори, зокрема на машині	так,0					ні, 1					
Обізнаність із ризиком, O (сумарне значення «ні»)	0		1	2	3						
Можливість людини обмежити шкоду чи уникнути її, наприклад рефлекс, жвавість або можливість втечі, D	так,0					ні, 1					
Практичний досвід та знання, Z	щодо робота або маніпулятора 1			щодо подібних робіт чи маніпуляторів 2				відсутній досвід 3			
Можливість усунення чи обмеження шкоди, U=Q+T+O+D+Z	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Можливість виникнення цієї шкоди, P=V+I+U											
Рівень професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами, R=B·P											

Табл. 2. Матриця визначення рівня професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами

Можливість виникнення цієї шкоди, Р	Тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки, В			
	2	3	4	5
2	4	6	8	10
3	6	9	12	15
4	8	12	16	20
5	10	15	20	25
6	12	18	24	30
7	14	21	28	35
8	16	24	32	40
9	18	27	36	45
10	20	30	40	50
11	22	33	44	55
12	24	36	48	60
13	26	39	52	65
14	28	42	56	70
15	30	45	60	75
16	32	48	64	80
17	34	51	68	85
18	36	54	72	90
19	38	57	76	95
20	40	60	80	100

Рівні професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами поділяються на:

- незначний (зелена зона) – 2–10;
- мінімальний (синя зона) – 12–20;
- помірний (жовта зона) – 21–40;
- суттєвий (помаранчева зона) – 42–60;
- високий (червона зона) – 64–100.

Високий рівень професійного ризику свідчить про недостатню ефективність чинних заходів захисту та нагальну потребу в розробці й впровадженні додаткових рішень для його зниження або мінімізації. Якщо ж рівень ризику є низьким, це свідчить про результативність наявних заходів. У такій ситуації варто продовжувати їх застосування, паралельно здійснюючи моніторинг та регулярну переоцінку ризиків у разі зміни умов.

Для визначення типу або групи небезпек під час роботи з роботами, походження небезпек та їх потенційні наслідки, можливо скористатися розробленою анкетною (табл. 3).

Розроблена методика надає можливість встановити взаєв'язок між нараженням на небезпеку та його результатом, врахувати людські чинники: взаємозв'язок людей із роботом та маніпулятором; взаємодію між людьми; аспекти, пов'язані зі стресом; ергономічні аспекти; спроможність людей щодо обізнаності ризиків у конкретній ситуації, яка залежна від їх навченості, досвіду і здібностей; втоми; аспектів обмежених можливостей (інвалідність, вік тощо).

Крім цього придатності захисних засобів, можливості руйнування чи обмеження заходів захисту, здатності утримання засоби захисту та доступність інформації для користувача.

Табл. 3. Анкета визначення типу або групи небезпек під час роботи з роботами та маніпуляторами, походження небезпек та їх потенційні наслідки

№ небезпеки	Тип або група небезпеки	Походження	Може призвести до небезпеки чи шкоди	Немає небезпеки чи шкоди	Немає даних	Потенційні наслідки
1	Механічні	Рухи (нормальні чи несподівані) будь якої частини робота (включаючи спину) Рухи (нормальні чи несподівані) кінцевого ефектора або будь-якої рухомої частин клітини робота Переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі				дроблення; зрізання; різання або розрізання;
		Несправність кінцевого ефектора (відрив) Переміщення інструменту кінцевого ефектору в положенні обслуговування Ненавмисне переміщення машини або частини роботизовано клітини під час вантажно-розвантажувальних операцій Падіння або викидання матеріалів і виробів Ненавмисне переміщення джигів або захвату Ненавмисне вивільнення інструменту Ненавмисне переміщення пов'язаної машини (машин) Маніпуляції з продуктами та матеріалами, включаючи викид Рух або обертання інструменту на кінцевому механізмі Рух частин робота Рух частини з гострим краєм, утримуваним роботом Обертання або переміщення пов'язаної машини чи верстатного інструменту в камері робота Обертальний рух будь-яких осей робота Вільний одяг, довге волосся Між рукою робота та будь-яким нерухомим об'єктом Між кінцевим елементом і будь-яким нерухомим об'єктом (паркан, балка тощо) Неможливість виходу робота камери (через двері камери) для захоплення оператора в автоматичному режимі				заплутаність; втягування або захоплення; вплив; укол або прокол; тертя, стирання; впорскування або викид рідини/газу під високим тиском

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
		Між світильниками (впадання); між маршрутами, комунікаціями				
		Маніпуляції з продуктами та матеріалами, включаючи викид				
		Переміщення або обертання гострого інструменту на кінцевому механізмі або зовнішніх осях, деталі, що обертається і пов'язаного обладнання				
		Ненавмисний рух кінцевого механізму (специфічний процес для шліфувальних кругів тощо)				
		Ненавмисний рух або активація кінцевого ефектора або пов'язаного обладнання (включаючи зовнішні осі, керовані роботом)				
		Несподіване вивільнення потенційної енергії з накопичених джерел				
2	Електричні	Контакт з струмоведучими частинами або з'єднаннями				ураження електричним струмом; спалення або опік;
		Плутанина різних напруг в системі				вдихання отруйних парів;
		Контакт з окремими компонентами електричної (електронної) схеми, тобто конденсаторами				ураження очей електричним струмом, іскра;
		Вплив дугового спалаху				вплив на кардіостимулятор
		Процес використання високої напруги або високої частоти, наприклад, електростатичне фарбування, індукційне нагрівання				
		Зварювання з використанням високої напруги				
3	Термічні	Гарячі поверхні, пов'язані з кінцевим ефектором; або пов'язане обладнання чи деталь				опіки;
		Холодні поверхні або предмети				пожежа, вибух;
		Вибухонебезпечна атмосфера, спричинена процесом, тобто фарба (розпилені частинки, шліфувальний та фрезерний пил				випромінювання від джерел тепла;
		Вплив екстремальних температур, необхідних для підтримки процесу				вдихання токсичних парів; зневоднення
4	Шуму	Втрата рівноваги, дезорієнтація в робочій зоні роботоклітини				вплив на слух і рівновагу, свідомість;
		Нездатність двох осіб, яким призначено завдання, координувати свої дії шляхом звичайної розмови				вплив на мовлення спілкування, сприйняття акустичних сигналів;
		Рівень навколишнього шуму настільки високий або відволікаючий, що не дозволяє почути або зрозуміти звукові сигнали попередження про небезпеку				втрата слуху
		Тривалий вплив підвищеного рівня шуму				
5	Вібрації	Ослаблення з'єднань, кріпильних деталей, компонентів, що призводить до несподіваної зупинки або висування частин				втома;
						неврологічні пошкодження;
						судинний розлад
6	*	ЕМП перешкоджає правильній роботі системи				опіки;
		Під впливом технологічного випромінювання, наприклад дугового зварювання, лазера				захворювання

* – Випромінювання

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
7	Ергономічні	Погано спроектовані навчальні панелі або сенсорні екрани (НМІ), розташовані високо або далеко.				втома;
		Погано спроектовані місця завантаження/розвантаження: велика відстань між розташуванням компонентів і зоною завантаження/розвантаження.				удари;
		Погано спроектовані пристрої активації.				падіння;
		Невідповідне розташування елементів керування.				втрати пильності;
		Випадкова активація елементів керування.				стрес;
		Труднощі доступу через додаткові ризики, пов'язані з невідповідним розташуванням елементів керування.				наслідки людських помилок
		Труднощі доступу до компонентів для обслуговування (усунення неполадок, ремонт, налаштування) через їх неправильне розташування.				
		Погане освітлення робочих зон, що ускладнює розпізнавання ризиків і небезпечних ситуацій.				
		Компоненти в закритих зонах, які блокують існуюче освітлення.				
		Блоки НМІ розташовані занадто високо або занадто низько для зручного перегляду.				
8	Матеріалу/речовини	Обслуговування, змащення та заміна компонентів, які перебувають у контакті з рідинами (охолоджувальними чи технологічними)				отруєння;
		Несподівані відмови механічних та електричних компонентів роботизованої системи та систем захисту.				вдихання корозійних парів та пилу; опіки.
9	Середовище	Проектування, причинене навколишнім середовищем, тобто встановлення в зонах землетрусів.				форс-мажор;
		Неправильне визначення справжньої проблеми та складної проблеми шляхом виконання неправильних або непотрібних дій.				індуковані збої;
		Одна дія або помилка збільшує серйозність шкоди, тобто намагаючись уникнути гострого краю, замість цього відбувається контакт з гарячою поверхнею.				небезпечна рефлекторна дія
10	Комбіновані	Несподівані рухи робота або кінцевих ефекторів або пов'язаних машини.				відновлення енергопостачання після перерви;
		Непередбачувана поведінка елементів керування машиною через електромагнітні перешкоди або стрибки в джерелі енергії.				зовнішній вплив на джерело живлення
		Одна особа керує роботосистемою, але ця дія не очікується іншою особою.				

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
		Неправильне сприйняття роботів, які співпрацюють, або одночасний рух.				
		Видана команда зупинки зупиняє робота в неповному циклі.				
		Швидкість роботизованої системи можна регулювати, завдяки чому різні завдання виконуються з різною швидкістю.				
		Несправності керування, що спричиняють звільнення утримуваних пристроїв на столі завантаження або змушують виконавчі механізми рухатися під дією залишкових сил (інерція, гравітація, пружина/накопичувач енергії), що може призвести до утворення «снаряду».				
		Несправності керування, що спричиняють звільнення гальма роботизованої руки; звільнення гальма змушує елементи робота рухатися під дією залишкових сил (інерції, гравітації, пружина/засобів накопичення енергії) несподівано.				
		Несподівані рухи робота, виконавчих механізмів, додаткових осей або пов'язаного обладнання.				
		Несподівані рухи робота, кінцевий ефекторів, допоміжної осі або пов'язаного обладнання.				
		Нездатність захисного пристрою функціонувати належним чином.				
		Ослаблені, незакріплені шланги та компоненти від'єднуються або розбиваються.				
		Компоненти неправильно встановлені, що створює несподіваний рух/небезпеку.				
		Високошвидкісні обертові частини, що ламаються або від'єднуються від обладнання для утримання деталей.				
		Перевантаження руки робота або пов'язаного обладнання, що призводить до поломки або викривлення механічних компонентів.				
		Потрапляння в контакт через витіснення, пов'язане з процесом (тобто точкове зварювання).				
		Вихід з ладу пристрою утримання деталей.				
		Нестримний робот або пов'язана з ним частина машини (утримується в положенні тяжіння) подає або перевертається.				
		Усунення несправностей під час введення в експлуатацію або виведення з експлуатації.				
		Деталі можуть впасти, якщо неправильно прикріпити або встановити неправильно.				
		Недостатнє освітлення в зоні оператора або камері робота.				
		Перешкоди на підлозі камери.				
		Розсувна підлога.				
		Невдале розташування комунікацій.				
		Специфічні небезпеки застосування.				

6. Апробування розробленої методики оцінки ризиків

Для апробації розробленої методики оцінки ризиків під час роботи з роботами на робочому місці: контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 та оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A (рис. 2 – рис. 4). Результати оцінки деяких професійних ризиків даних працівників наведені в табл. 4.



а)



б)

Рис. 2. Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis: а – до вимірювання; б – під час вимірювання



а)



б)

Рис. 3. Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05: а – під час вимірювання; б – під час налаштування

Табл. 4. Результати оцінки деяких професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами

№ з/п	Походження небезпеки	Рівень ризику	Заходи
Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis			
1	Переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі	22 (помірний)	Провести навчання щодо безпечної експлуатації, знаків безпеки, зменшити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту.
2	Рух частин робота	34 (помірний)	Провести навчання щодо безпечної експлуатації, обмежити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту.
3	Компоненти неправильно встановлені, що створює несподіваний рух/небезпеку.	40 (помірний)	Перед початком експлуатації перевіряти працездатність встановлення деталі для вимірювання, обмежити швидкість руху під час вимірювання.
4	Специфічні небезпеки застосування.	42 (суттєвий)	Зменшити вагове навантаження на руку контролера, обмежити доступ до місць затискання та удару.
Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05			
5	Рухи (нормальні чи несподівані) будь якої частини робота (включаючи спину)	20 (помірний)	Тримати дистанцію під час проведення вимірювань. Не розмішувати руки в зоні переміщення рухомих частин.
6	Непередбачувана поведінка елементів керування машиною через електромагнітні перешкоди або стрибки в джерелі енергії.	33 (помірний)	Передбачити випрямовувачі току та напруги.
Робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A			
7	Рух частин робота	36 (помірний)	Обмежити доступ оператора в зоні дії робота, передбачити кінцеві вимикачі на вході в зону дії робота та запровадити біркову систему.
8	Контакт з струмоведучими частинами або з'єднаннями	51 (суттєвий)	Забезпечити працівника діелектричними засобами індивідуального захисту. Перевіряти стан джерел струму та ізолюючих частин. Систематично проводити навчання з електробезпеки.
9	Гарячі поверхні, пов'язані з кінцевим ефектором; або пов'язане обладнання чи деталь	45 (суттєвий)	Забезпечити працівника термостійкими та іскростійкими рукавицями.
10	Під впливом технологічного випромінювання, наприклад дугового зварювання, лазера	40 (помірний)	Забезпечити працівника захисним шоломом чи маскою для зварювання.

Було розроблено заходи для зменшення чи усунення ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами, що є важливим кром для безпеки людей та робіт на підприємствах машинобудування. Використання розробленої методики оцінки ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами дає можливість визначити рівень ризику на відповідних робочих місцях та впровадити заходи для зниження їх рівня.

8. Обговорення результатів досліджень з підвищення рівня безпеки робіт та маніпуляторів

За результатами оцінки професійних ризиків, розробленою методикою під час роботи з роботами та маніпуляторами, деяких, найбільш значимих професійних ризиків контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis (рис. 2), було встановлено, що негативна дія переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі може призвести до рівня ризику 22, який є помірним, при цьому тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки дорівнює 2, а можливість виникнення цієї шкоди 3. Тому з метою зменшення або усунення ризику та попередження виникнення можливих наслідків було запропоновано запровадити запобіжні та захисні заходи, провести навчання щодо безпечної експлуатації, знаків безпеки, зменшити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту. Аналогічно при комбінованій небезпеці, специфічній небезпеці застосування, рівень ризику складає 42 має суттєве значення, тому необхідно негайно вжити заходи зі зменшення вагового навантаження на руку контролера, обмежити доступ до місць затискання та удару.



а)



б)

Рис. 4. Робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A: а – зварювальний робот; б – роботизований зварювальний комплекс

Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 є більш небезпечним ніж контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis (рис. 3). Бо координатно-вимірювальна машина може управлятися самим контролером, або працювати самостійно, що може призвести до непередбачувальних різких рухів, що може призвести до затискання кінцівок між рухомими та нерухомими частинами, удару контролера чи інших працівників які знаходяться в зоні дії машини, можливо потрапляння в очі сторонніх предметів, а також ураження електричним струмом. Дана робота характерна підвищеною напругою, під час концентрації уваги в процесі налаштування, калібрування та вимірювання, що може призвести до передчасної втоми контролера.

Найбільш небезпечним робочим місцем є робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A (рис. 4), бо він зіштовхується з механічними, термічними, електричними, ергономічними, комбінованими небезпека та небезпе-

кою випромінювання, найбільше значення має ризик при контакті оператора з струмоведучими частинами або з'єднаннями, що складає 51 (суттєвий), який може призвести не тільки до опіків, але й зупинки серцебиття та дихання, смерті оператора, тому забезпечити працівника діелектричними засобами індивідуального захисту, необхідно періодично перевіряти стан джерел струму та ізолюючих частин, систематично проводити навчання з електробезпеки, роботизований комплекс повинен бути заземленим.

Отримані результати пояснюються тим, що для робочих місць: контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 та оператор зварювального робота ABB IRB 1400 M94A характерні специфічні шкідливі та небезпечні умови праці, що обумовлене конструктивними та технологічними особливостями роботів і маніпуляторів, які призводять до виникнення небезпечних ситуацій та професійних ризиків, але запровадження заходів з безпеки праці надає можливість зменшити їх рівні або усунути взагалі.

Забезпечення безпеки роботів та маніпуляторів направлено на оцінку ризиків за існуючими методиками, які є загальними та неадаптованими до особливостей різних типів роботів, не враховують вимоги міжнародних стандартів. Тому розроблена методика оцінки ризиків при роботі з роботами та маніпуляторами надає можливість врахувати важкість шкоди до якої може призвести конкретна небезпека та можливість виникнення цієї шкоди, масштаб поширювання шкоди на кілька осіб, нараження осіб на небезпеку, надійність обладнання, хронічку шкоди для здоров'я та нещасних випадків, порівняння ризиків, можливість усунення чи обмеження шкоди, швидкість настання шкоди та людський чинник. Крім того дана методика надає можливість оцінити ризики, які спричинені не тільки механічними, електричними, термічними небезпеками, утворюваним шумом, спричиненими вібрацією, випромінюванням, матеріалами, речовинами, радіаційними, ергономічними небезпеками, які пов'язані з середовищем у якому використовується роботи і маніпулятори, а також комбінацією небезпек, а також враховує не тільки ризики на певному робочому місці, але для самих роботів та маніпуляторів, а також небезпеки, які виникають при взаємодії з іншими пристроями та системами, то б то небезпеки до оточуючого середовища роботів та маніпуляторів, крім людини. Дана методика має анкету визначення типу або групи небезпек під час роботи з роботами та маніпуляторами, походження небезпек та їх потенційні наслідки (табл. 3), матрицю визначення рівня професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами (табл. 4) та чек-лист для визначення величини професійного ризику (табл. 1), які дозволяють спростити процедуру оцінки та отримати більш точний результат.

До обмежень, які притаманні цим дослідженням можливо віднести те, що випробування розробленої методики оцінки ризиків проводили тільки на одному машинобудівному підприємстві, але було обрано три робочих місця, які мають різну специфіку роботи, небезпеки та професійні ризики.

До недоліків даного дослідження можливо відзначити те, що не враховує вимог стандарту ДСТУ EN ISO 13482:2019 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності роботів особистого догляду (EN ISO 13482:2014, IDT; ISO 13482:2014, IDT) [50]. Тому у зв'язку тим, що в побуті для вирішення соціальних проблем використовують роботи та роботизовані пристрої, для забезпечення без-

пеки роботів особистого догляду необхідно врахувати вимоги даного стандарту та удосконалити дану методику, що стане розвитком даного дослідження.

9. Висновки

1. Було розроблено методику оцінки ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами, яка дозволяє враховувати такі аспекти, як ступінь важкості потенційної шкоди, ймовірність її виникнення, масштаб поширення шкоди на кількох осіб, рівень нараження людей на небезпеку, надійність обладнання, хронічний вплив на здоров'я та нещасні випадки. Також методика враховує можливість усунення або обмеження шкоди, швидкість її настання та вплив людського фактора.

Крім цього, методика оцінює ризики, пов'язані не лише з механічними, електричними, термічними небезпеками, шумом, вібрацією, випромінюванням, матеріалами, речовинами, радіаційними та ергономічними факторами, а й з умовами середовища, у якому використовуються роботи й маніпулятори. Вона враховує комбіновані небезпеки, а також ризики не лише на конкретному робочому місці, але й для самих роботів та маніпуляторів. Крім того, методика аналізує загрози, що виникають під час взаємодії з іншими пристроями та системами, а також потенційні небезпеки для навколишнього середовища роботів та маніпуляторів, окрім ризиків для людини.

2. Апробація (випробування) розробленої методики під час оцінки деяких, значущих ризиків, контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05, оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A та розробка заходів з їх зменшення або усунення показали, що на машинобудівному підприємстві помірні та суттєві рівні професійних ризиків від 20 до 51. За результатами оцінки під час роботи з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis встановлено, що негативна дія переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі може призвести до рівня ризику 22, який є помірним. Тяжкість шкоди дорівнює 2, можливість виникнення – 3. Для зменшення або усунення ризику запропоновано запровадити запобіжні та захисні заходи, провести навчання щодо безпечної експлуатації, знаків безпеки, зменшити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту. При комбінованій небезпеці, специфічній небезпеці застосування, рівень ризику складає 42, що має суттєве значення. Тому необхідно негайно вжити заходи зі зменшення вагового навантаження на руку контролера, обмежити доступ до місць затискання та удару. Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05, є більш небезпечним, ніж у випадку з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis. Координатно-вимірювальна машина може управлятися самим контролером або працювати самостійно, що може призвести до непередбачуваних різких рухів, затискання кінцівок між рухомими та нерухомими частинами, удару контролера чи інших працівників, які знаходяться в зоні дії машини, потрапляння в очі сторонніх предметів та ураження електричним струмом. Дана робота характерна підвищеною напругою, під час концентрації уваги в процесі налаштування, калібрування та вимірювання, що може призвести до передчасної втоми контролера. Найбільш небезпечним є робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A, оскільки він зіштовхується з механічними, термічними, електричними, ергономічними, комбінованими небезпеками та небезпекою випромінювання. Найбільше значення має ризик при контакті

оператора зі струмоведучими частинами або з'єднаннями, що складає 51 (суттєвий), який може призвести не тільки до опіків, але й зупинки серцебиття та дихання, смерті оператора. Тому необхідно забезпечити працівника діелектричними засобами індивідуального захисту, періодично перевіряти стан джерел струму та ізолюючих частин, систематично проводити навчання з електробезпеки, роботизований комплекс повинен бути заземленим.

Отже, розробка заходів для зменшення та усунення ризиків є важливою задачею для забезпечення безпеки праці під час роботи з роботами та маніпуляторами. Використання розробленої методики оцінки ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами може допомогти визначити рівень ризику на робочому місці та вжити необхідні заходи для зниження ризику до прийнятного рівня або його усунення.

Література

1. Industrial robots, workers' safety, and health / R. Gihleb et al. *Labour economics*. 2022. Vol. 78. P. 102205. doi: 10.1016/j.labeco.2022.102205
2. Caiazza C., Nestić S., Savković M. A systematic classification of key performance indicators in human-robot collaboration. *Sustainable business management and digital transformation: challenges and opportunities in the post-covid era*. Cham. 2022. P. 479–489. doi: 10.1007/978-3-031-18645-5_30
3. Yetkin B. N., Ulutas B. H. A Literature Review on Human-robot Collaborative Environments Considering Ergonomics. *Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*. Cham. 2022. P. 49–60. doi: 10.1007/978-3-031-08782-0_5
4. Operations management issues in design and control of hybrid human-robot collaborative manufacturing systems: a survey / S. E. Hashemi-Petroodi et al. *Annual reviews in control*. 2020. Vol. 49. P. 264–276. doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.04.009
5. Gualtieri L., Rauch E., Vidoni R. Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: a systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021. Vol. 67. P. 101998. doi: 10.1016/j.rcim.2020.101998
6. Olsen T. L., Tomlin B. Industry 4.0: opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing & service operations management*. 2020. Vol. 22. № 1. P. 113–122. doi: 10.1287/msom.2019.0796
7. Physical ergonomic improvement and safe design of an assembly workstation through collaborative robotics / A. Colim et al. *Safety*. 2021. Vol. 7. № 1. P. 14. doi: 10.3390/safety7010014
8. Safety, ergonomics and efficiency in human-robot collaborative assembly: design guidelines and requirements / L. Gualtieri et al. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 91. P. 367–372. doi: 10.1016/j.procir.2020.02.188
9. A human-robot collaboration framework for improving ergonomics during dexterous operation of power tools / W. Kim et al. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2021. Vol. 68. P. 102084. doi: 10.1016/j.rcim.2020.102084
10. Chutima P. Research trends and outlooks in assembly line balancing problems. *Engineering journal*. 2020. Vol. 24. № 5. P. 93–134. doi: 10.4186/ej.2020.24.5.93
11. Balancing of assembly lines with collaborative robots / C. Weckenborg et al. *Business research*. 2019. Vol. 13. № 1. P. 93–132. doi: 10.1007/s40685-019-0101-y
12. Ergonomics and safety in the design of industrial collaborative robotics / S. Pinheiro et al. *Studies in systems, decision and control*. Cham. 2021. P. 465–478. doi: 10.1007/978-3-030-89617-1_42

13. Srivatsan H., Myagerimath A. V., Duffy V. G. A systematic review of collaborative robots in ergonomics. *Digital human modeling and applications in health, safety, ergonomics and risk management*. Cham. 2024. P. 282–297. doi: 10.1007/978-3-031-61066-0_17
14. Ergonomic human-robot collaboration in industry: a review / M. Lorenzini et al. *Frontiers in robotics and AI*. 2023. Vol. 9. doi: 10.3389/frobt.2022.813907
15. Handbook of human factors and ergonomics / ed. by G. Salvendy, W. Karwowski. Wiley. 2021. doi: 10.1002/9781119636113
16. Teaming with industrial cobots: a socio-technical perspective on safety analysis / A. Adriaensen et al. *Human factors and ergonomics in manufacturing & service industries*. 2021. Vol. 32. № 2. P. 173–198. doi: 10.1002/hfm.20939
17. Redefining safety in light of human-robot interaction: a critical review of current standards and regulations / A. Martinetti et al. *Frontiers in chemical engineering*. 2021. Vol. 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237
18. Human robot collaboration in industrial environments / G. Michalos et al. *The 21st century industrial robot: when tools become collaborators*. Cham. 2021. P. 17–39. doi: 10.1007/978-3-030-78513-0_2
19. Seamless human–robot collaboration in industrial applications / S. Makris et al. *Lecture notes in mechanical engineering*. Cham. 2024. P. 39–73. doi: 10.1007/978-3-031-54034-9_2
20. Human-Centered approach for the design of a collaborative robotics workstation / A. Colim et al. *Occupational and environmental safety and health II*. Cham. 2020. P. 379–387. doi: 10.1007/978-3-030-41486-3_41
21. Kopp T., Baumgartner M., Kinkel S. Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice: an empirically driven framework. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2020. doi: 10.1007/s00170-020-06398-0
22. Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda / A. Keshvarparast et al. *Journal of intelligent manufacturing*. 2024. Vol. 35. P. 2065–2118. doi: 10.1007/s10845-023-02137-w
23. Multimodal perception-fusion-control and human–robot collaboration in manufacturing: a review / J. Duan et al. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2024. doi: 10.1007/s00170-024-13385-2
24. Redefining safety in light of human-robot interaction: a critical review of current standards and regulations / A. Martinetti et al. *Frontiers in chemical engineering*. 2021. Vol. 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237 (date of access: 29.12.2024)
25. Keeping workers safe in the automation revolution. Brookings. URL: <https://www.brookings.edu/articles/keeping-workers-safe-in-the-automation-revolution/>
26. Liang C.-J., Cheng M. H. Trends in robotics research in occupational safety and health: a scientometric doi: analysis and review. *International journal of environmental research and public health*. 2023. Vol. 20. № 10. P. 5904. doi: 10.3390/ijerph20105904
27. Editorial: safety in close human-robot interaction / M. Valori et al. *Frontiers in robotics and AI*. 2023. Vol. 10. doi: 10.3389/frobt.2023.1288713.
28. Human–Robot collaboration trends and safety aspects: a systematic review / J. Arents et al. *Journal of sensor and actuator networks*. 2021. Vol. 10. № 3. P. 48. doi: 10.3390/jsan10030048
29. A taxonomy of factors influencing perceived safety in human–robot interaction / N. Akalin et al. *International journal of social robotics*. 2023. doi: 10.1007/s12369-023-01027-8

30. Examining profiles for robotic risk assessment / T. Bridgwater et al. HRI '20: ACM/IEEE international conference on human-robot interaction, Cambridge United Kingdom. New York, NY, USA, 2020. doi: 10.1145/3319502.3374804
31. Vecellio Segate R., Daly A. Encoding the enforcement of safety standards into smart robots to harness their computing sophistication and collaborative potential: a legal risk assessment for european union policymakers. *European journal of risk regulation*. 2023. P. 1–40. doi: 10.1017/err.2023.72
32. Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda / A. Keshvarparast et al. *Journal of intelligent manufacturing*. 2024. Vol. 35. P. 2065–2118. doi: 10.1007/s10845-023-02137-w
33. Risk assessment tools for industrial human-robot collaboration: novel approaches and practical needs / T. P. Huck et al. *Safety science*. 2021. Vol. 141. P. 105288. doi: 10.1016/j.ssci.2021.105288
34. BS EN ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction (ISO 12100:2010). Effective from 2010-10-09. Official edition. Brussels : BSI, 2011. 77 p. URL: <https://nobelcert.com/DataFiles/FreeUpload/BS%20EN%20ISO%2012100-2010.pdf>
35. Lee K., Shin J., Lim J.-Y. Critical hazard factors in the risk assessments of industrial robots: causal analysis and case studies. *Safety and health at work*. 2021. doi: 10.1016/j.shaw.2021.07.010
36. A SafeML extension for a unified risk assessment to diverse service robots / T. Miyoshi et al. *ROBOMECH journal*. 2023. Vol. 10. № 1. doi: 10.1186/s40648-023-00245-z
37. Novel approach using risk analysis component to continuously update collaborative robotics applications in the smart, connected factory model / M. Pantano et al. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12. № 11. P. 5639. doi: 10.3390/app12115639
38. Safe human-robot collaboration: a systematic review of risk assessment methods with AI integration and standardization considerations / M. J. Alenjareghi et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. doi: 10.1007/s00170-024-13948-3
39. Safety assessment of human-robot collaborations using failure mode and effects analysis and bow-tie analysis / A. Haggy et al. 21st international conference on informatics in control, automation and robotics, Porto, Portugal, 18–20 November 2024. 2024. P. 432–439. doi: 10.5220/0013017500003822
40. Hazard identification and risk assessment of intelligent robots based on virtual reality / X. Liu et al. *Frontiers in artificial intelligence and applications*. 2023. doi: 10.3233/faia230801
41. Towards safe human robot collaboration – Risk assessment of intelligent automation / A. Hanna et al. 2020 25th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA), Vienna, Austria, 8–11 September 2020. 2020. doi: 10.1109/etfa46521.2020.9212127
42. Safety assessment review of a dressing assistance robot / D. Delgado Bellamy et al. *Frontiers in robotics and AI*. 2021. Vol. 8. doi: 10.3389/frobt.2021.667316
43. Internal state-based risk assessment for robots in hazardous environment / J. David et al. *Towards autonomous robotic systems*. Cham. 2022. P. 137–152. doi: 10.1007/978-3-031-15908-4_12
44. Yavorska O., Khudolii S., Cheberiachko Y., Mamaikin O., Khorolskyi A. Assessment of the risk of a dangerous event of a human collision with a remote-controlled robot. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 567. P. 01018. doi: 10.1051/e3sconf/202456701018

45. Aichaoui N. E. Y., Kovács T. A. Risk assessment of industrial collaborative welding robots: a critical review of methodologies and limitations. *Advanced sciences and technologies for security applications*. Cham. 2024. P. 149–159. doi: 10.1007/978-3-031-47990-8_14
46. Robots and human interaction in a furniture manufacturing industry – risk assessment / A. Colim et al. *Advances in intelligent systems and computing*. Cham. 2020. P. 81–90. doi: 10.1007/978-3-030-20497-6_8
47. ДСТУ EN ISO 10218-1:2018. Роботи та роботизовані пристрої. вимоги щодо безпечності промислових роботів. частина 1. роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT). На заміну ДСТУ EN ISO 10218-1:2014 ; чинний від 2020-01-01. Вид. офіц. 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81561
48. ДСТУ EN ISO 10218-2:2018. Роботи та роботизовані пристрої. вимоги щодо безпечності промислових роботів. частина 2. роботизовані системи та їхні поєднання (EN ISO 10218-2:2011, IDT; ISO 10218-2:2011, IDT). На заміну ДСТУ EN ISO 10218-2:2014 ; чинний від 2020-01-01. Вид. офіц. 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81746
49. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT). На заміну ДСТУ EN 292-1-2001, ДСТУ EN 292-2-2001, ДСТУ EN 1050:2003, ДСТУ EN ISO 12100:2014 ; чинний від 2018-07-01. Вид. офіц. 2016. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71627
50. ДСТУ EN ISO 13482:2019. Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності роботів особистого догляду (EN ISO 13482:2014, IDT; ISO 13482:2014, IDT). На заміну ДСТУ EN ISO 13482:2014 ; чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88307

B. Tsymbal¹, DSc, Associate Professor, Professor of the Department

E. Rybka¹, DSc, Professor, Professor of the Department

P. Svirzhevskiy¹, Student

O. Rybalova¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

A. Petryshchev², PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

¹*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

²*National University «Zaporizhzhya Polytechnic», Zaporozhye, Ukraine*

IMPROVING THE SAFETY LEVEL OF ROBOTS AND MANIPULATORS

The research focuses on developing a methodology to improve the safety of robots and manipulators in industrial environments. Robotic systems effectively perform complex and dangerous tasks, but at the same time create new risks for workers, which requires systematic assessment and management. An analysis of the main factors affecting the safety of robotic systems was conducted, in particular mechanical, ergonomic, thermal and electrical hazards. Based on this, a universal methodology for assessing occupational risks was developed, which takes into account the severity of possible injuries, the probability of their occurrence, personnel qualifications, the speed of danger onset and the level of awareness of workers. The methodology includes developed checklists, risk assessment matrices and questionnaires for identifying hazardous factors and determining the level of risks. To verify its effectiveness, a test was conducted at a machine-building enterprise, where the risks for employees working with the Absolute Arm 7-Axis measuring arm, the GLOBAL S GREEN 05.07.05 coordinate measuring machine and the ABB IRB 1400 M94A welding robot were assessed. It was found that the most dangerous workplace is the workplace of the ABB IRB 1400 M94A welding robot operator, because he is faced with mechanical, thermal, electrical, ergonomic, combined hazards and radiation hazards, the most important is the risk when the operator contacts live parts or connections, which is 51 (significant). The results showed the key risks at the workplaces, as well as the effectiveness

of the developed measures to minimize them. Personnel training, restriction of access to hazardous areas and the use of personal protective equipment were introduced. The methodology can be applied to identify risks and implement safety measures at enterprises in various industries.

Keywords: occupational risks, occupational safety, cobots, robots, manipulators, artificial intelligence

References

1. Gihleb, R., Giuntella, O., Stella, L., Wang, T. (2022). Industrial robots, workers' safety, and health. *Labour Economics*, 78, 102205. doi: 10.1016/j.labeco.2022.102205
2. Caiazzo, C., Nestić, S., Savković, M. (2022). A systematic classification of key performance indicators in human-robot collaboration. In *Sustainable business management and digital transformation: Challenges and opportunities in the post-covid era*, 479–489. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-18645-5_30
3. Yetkin, B. N., Ulutas, B. H. (2022). A Literature Review on Human-robot Collaborative Environments Considering Ergonomics. In *Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*, 49–60. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-08782-0_5
4. Hashemi-Petroodi, S. E., Thevenin, S., Kovalev, S., Dolgui, A. (2020). Operations management issues in design and control of hybrid human-robot collaborative manufacturing systems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 49, 264–276. doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.04.009
5. Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R. (2021). Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 101998. doi: 10.1016/j.rcim.2020.101998
6. Olsen, T. L., Tomlin, B. (2020). Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(1), 113–122. doi: 10.1287/msom.2019.0796
7. Colim, A., Faria, C., Cunha, J., Oliveira, J., Sousa, N., Rocha, L. A. (2021). Physical ergonomic improvement and safe design of an assembly workstation through collaborative robotics. *Safety*, 7(1), 14. doi: 10.3390/safety7010014
8. Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R., Matt, D. T. (2020). Safety, ergonomics and efficiency in human-robot collaborative assembly: Design guidelines and requirements. *Procedia CIRP*, 91, 367–372. doi: 10.1016/j.procir.2020.02.188
9. Kim, W., Peternel, L., Lorenzini, M., Babič, J., Ajoudani, A. (2021). A human-robot collaboration framework for improving ergonomics during dexterous operation of power tools. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 102084. doi: 10.1016/j.rcim.2020.102084
10. Chutima, P. (2020). Research trends and outlooks in assembly line balancing problems. *Engineering Journal*, 24(5), 93–134. doi: 10.4186/ej.2020.24.5.93
11. Weckenborg, C., Kieckhäfer, K., Müller, C., Grunewald, M., Spengler, T. S. (2019). Balancing of assembly lines with collaborative robots. *Business Research*, 13(1), 93–132. doi: 10.1007/s40685-019-0101-y
12. Pinheiro, S., Correia Simões, A., Pinto, A., Van Acker, B. B., Bombeke, K., Romero, D., Vaz, M., Santos, J. (2021). Ergonomics and safety in the design of industrial collaborative robotics. In *Studies in systems, decision and control*. Springer International Publishing, 465–478. doi: 10.1007/978-3-030-89617-1_42
13. Srivatsan, H., Myagerimath, A. V., Duffy, V. G. (2024). A systematic review of collaborative robots in ergonomics. In *Digital human modeling and applications in*

health, safety, ergonomics and risk management, 282–297. Springer Nature Switzerland. doi: 10.1007/978-3-031-61066-0_17

14. Lorenzini, M., Lagomarsino, M., Fortini, L., Gholami, S., Ajoudani, A. (2023). Ergonomic human-robot collaboration in industry: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, 9. doi: 10.3389/frobt.2022.813907

15. Salvendy, G., Karwowski, W. (2021). *Handbook of human factors and ergonomics*. Wiley. doi: 10.1002/9781119636113

16. Adriaensen, A., Costantino, F., Di Gravio, G., Patriarca, R. (2021). Teaming with industrial cobots: A socio-technical perspective on safety analysis. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 32(2), 173–198. doi: 10.1002/hfm.20939

17. Martinetti, A., Chemweno, P. K., Nizam, K., Fosch-Villaronga, E. (2021). Redefining safety in light of human-robot interaction: A critical review of current standards and regulations. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237

18. Michalos, G., Karagiannis, P., Dimitropoulos, N., Andronas, D., Makris, S. (2021). Human robot collaboration in industrial environments. In *The 21st century industrial robot: When tools become collaborators*, 17–39. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-78513-0_2

19. Makris, S., Michalos, G., Dimitropoulos, N., Krueger, J., Haninger, K. (2024). Seamless human–robot collaboration in industrial applications. In *Lecture notes in mechanical engineering*, 39–73. Springer Nature Switzerland. doi: 10.1007/978-3-031-54034-9_2

20. Colim, A., Carneiro, P., Costa, N., Faria, C., Rocha, L., Sousa, N., Silva, M., Braga, A. C., Bicho, E., Monteiro, S., Arezes, P. M. (2020). Human-Centered approach for the design of a collaborative robotics workstation. In *Occupational and environmental safety and health II*, 379–387. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-41486-3_41

21. Kopp, T., Baumgartner, M., Kinkel, S. (2020). Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice: An empirically driven framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-020-06398-0

22. Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., Pirayesh, A. (2024). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: Literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35, 2065–2118. doi: 10.1007/s10845-023-02137-w

23. Duan, J., Zhuang, L., Zhang, Q., Zhou, Y., Qin, J. (2024). Multimodal perception-fusion-control and human–robot collaboration in manufacturing: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-024-13385-2

24. Martinetti, A., Chemweno, P. K., Nizam, K., Fosch-Villaronga, E. (2021). Redefining safety in light of human-robot interaction: A critical review of current standards and regulations. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237

25. Keeping workers safe in the automation revolution. (n.d.). Brookings. Available at: <https://www.brookings.edu/articles/keeping-workers-safe-in-the-automation-revolution/>

26. Liang, C.-J., Cheng, M. H. (2023). Trends in robotics research in occupational safety and health: A scientometric analysis and review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(10), 5904. doi: 10.3390/ijerph20105904

27. Valori, M., Prange-Lasonder, G., Saenz, J., Behrens, R., Bidard, C., Lucet, E., Civil Security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-1

Fassi, I. (2023). Editorial: Safety in close human-robot interaction. *Frontiers in Robotics and AI*, 10. doi: 10.3389/frobt.2023.1288713

28. Arents, J., Abolins, V., Judvaitis, J., Vismanis, O., Oraby, A., Ozols, K. (2021). Human–Robot collaboration trends and safety aspects: A systematic review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 10(3), 48. doi: 10.3390/jsan10030048

29. Akalin, N., Kiselev, A., Kristoffersson, A., Loutfi, A. (2023). A taxonomy of factors influencing perceived safety in human–robot interaction. *International Journal of Social Robotics*. doi: 10.1007/s12369-023-01027-8

30. Bridgwater, T., Giuliani, M., van Maris, A., Baker, G., Winfield, A., Pipe, T. (2020). Examining profiles for robotic risk assessment. In *HRI '20: ACM/IEEE international conference on human-robot interaction*. ACM. doi: 10.1145/3319502.3374804

31. Vecellio Segate, R., Daly, A. (2023). Encoding the enforcement of safety standards into smart robots to harness their computing sophistication and collaborative potential: A legal risk assessment for european union policymakers. *European Journal of Risk Regulation*, 1–40. doi: 10.1017/err.2023.72

32. Kaonain, T. E., Rahman, M. A. A., Ariff, M. H. M., Yahya, W. J., Mondal, K. (2021). Collaborative robot safety for human-robot interaction in domestic simulated environments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012029. doi: 10.1088/1757-899x/1096/1/012029

33. Huck, T. P., Münch, N., Hornung, L., Ledermann, C., Wurll, C. (2021). Risk assessment tools for industrial human-robot collaboration: Novel approaches and practical needs. *Safety Science*, 141, 105288. doi: 10.1016/j.ssci.2021.105288

34. BS EN ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction (ISO 12100:2010). Effective from 2010-10-09. Official edition. Brussels : BSI, 77. URL: <https://nobelcert.com/DataFiles/FreeUpload/BS%20EN%20ISO%2012100-2010.pdf>

35. Lee, K., Shin, J., Lim, J.-Y. (2021). Critical hazard factors in the risk assessments of industrial robots: Causal analysis and case studies. *Safety and Health at Work*. doi: 10.1016/j.shaw.2021.07.010

36. Miyoshi, T., Nakabo, Y., Fukui, H., Yashiro, M., Miyazawa, I., Sakamoto, T., Ando, N., Kuga, T., Kitamura, A., Ohara, K., Kimura, T. (2023). A SafeML extension for a unified risk assessment to diverse service robots. *ROBOMECH Journal*, 10(1). doi: 10.1186/s40648-023-00245-z

37. Pantano, M., Pavlovskiy, Y., Schulenburg, E., Traganos, K., Ahmadi, S., Regulín, D., Lee, D., Saenz, J. (2022). Novel approach using risk analysis component to continuously update collaborative robotics applications in the smart, connected factory model. *Applied Sciences*, 12(11), 5639. doi: 10.3390/app12115639

38. Alenjareghi, M. J., Keivanpour, S., Chinniah, Y. A., Jocelyn, S., Oulmane, A. (2024). Safe human-robot collaboration: A systematic review of risk assessment methods with AI integration and standardization considerations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-024-13948-3

39. Haggy, A., Philip, A., Jacob, S., Schneider, J., Anchukandan, M., Kranz, P., Daun, M. (2024). Safety assessment of human-robot collaborations using failure mode and effects analysis and bow-tie analysis. In *21st international conference on informatics in control, automation and robotics*. SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 432–439. doi: 10.5220/0013017500003822

40. Liu, X., Luo, H., Chen, Q., Wang, K. (2023). Hazard identification and risk assessment of intelligent robots based on virtual reality. In *Frontiers in artificial*

intelligence and applications. IOS Press. doi: 10.3233/faia230801

41. Hanna, A., Bengtsson, K., Gotvall, P.-L., Ekstrom, M. (2020). Towards safe human robot collaboration – Risk assessment of intelligent automation. In 2020 25th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA). IEEE. doi: 10.1109/etfa46521.2020.9212127

42. Delgado Bellamy, D., Chance, G., Caleb-Solly, P., Dogramadzi, S. (2021). Safety assessment review of a dressing assistance robot. *Frontiers in Robotics and AI*, 8. doi: 10.3389/frobt.2021.667316

43. David, J., Bridgwater, T., West, A., Lennox, B., Giuliani, M. (2022). Internal state-based risk assessment for robots in hazardous environment. In *Towards autonomous robotic systems*, 137–152. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-15908-4_12

44. Yavorska, O., Khudolii, S., Cheberiachko, Y., Mamaikin, O., Khorolskyi, A. (2024). Assessment of the risk of a dangerous event of a human collision with a remote-controlled robot. *E3S Web of Conferences*, 567, 01018. doi: 10.1051/e3sconf/202456701018

45. Aichaoui, N. E. Y., Kovács, T. A. (2024). Risk assessment of industrial collaborative welding robots: A critical review of methodologies and limitations. In *Advanced sciences and technologies for security applications/ Springer Nature Switzerland*, 149–159. doi: 10.1007/978-3-031-47990-8_14

46. Colim, A., Costa, S., Cardoso, A., Arezes, P., Silva, C. (2020). Robots and human interaction in a furniture manufacturing industry – risk assessment. In *Advances in intelligent systems and computing*, Springer International Publishing, 81–90. doi: 10.1007/978-3-030-20497-6_8

47. Roboty ta robotyzovani prystroyi. vymohy shchodo bezpechnosti promyslovykh robotiv. Chastyna 1. Roboty (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT) (DSTU EN ISO 10218-1:2018). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81561

48. Roboty ta robotyzovani prystroyi. vymohy shchodo bezpechnosti promyslovykh robotiv. Chastyna 2. Robotyzovani systemy ta yikhni poyednannya (EN ISO 10218-2:2011, IDT; ISO 10218-2:2011, IDT) (DSTU EN ISO 10218-2:2018). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81746

49. Bezpechnist' mashyn. zahal'ni pryntsypy proektuvannya. Otsinyuvannya ryzykiv ta zmenshennya ryzykiv (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT) (DSTU EN ISO 12100:2016). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71627

50. Roboty ta robotyzovani prystroyi. Vymohy shchodo bezpechnosti robotiv osobystoho dohlyadu (EN ISO 13482:2014, IDT; ISO 13482:2014, IDT) (DSTU EN ISO 13482:2019). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88307

Надійшла до редколегії: 20.02.2025

Прийнята до друку: 15.04.2025