

В.А. Кирилович, д.т.н., проф.
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.
А.Р. Кравчук, асистент
В.А. Яновський, доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Термінологічний та змістовний аспекти колаборативної робототехніки: аналіз та рекомендації

Розвиток промисловості до рівня Industry 4.0 та перехід до рівня 5.0 передбачає повністю автоматизовані виробництва, на яких керування всіма процесами здійснюється в режимі реального часу і з урахуванням мінливих зовнішніх умов. Це можливо завдяки автоматизації та роботизації виробничих процесів. Застосування колаборативних промислових роботів на сучасному виробництві ставить ряд проблемних питань не тільки з технічної сторони, а й пов'язаних зі змістовністю визначень та коректного тлумачення, тобто однозначності розуміння їх сутності, термінології у колаборативній робототехніці при проектуванні роботизованих технологій на етапі технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв машино- та приладобудування (при цьому обов'язкове дотримання виробничих стандартів ISO); при розробці управляючих програм із врахуванням вимог техніки безпеки тощо. Згадані вище проблеми не мають єдиного правильного варіанта вирішення, хоча не є новими у сфері виробництва та робототехніки. В роботі представлено стислий аналіз інформаційних джерел, які вказують на різноманітність підходів та методів досліджень у цьому напрямі, а також запропоновано змістовність тлумачення найпоширеніших термінів.

Ключові слова: колаборативна робототехніка; колаборативні роботи; стандарти ISO; безпека; технології.

Актуальність теми. Останніми роками обсяги застосування промислових роботів (ПР) на промислових та в інших виробництвах неухильно зростають [1]. Ефективність та економічна доцільність застосування ПР на сучасних виробничих секторах є очевидними завдяки розвитку апаратної бази мікропроцесорної техніки, що дозволяє застосовувати більш досконалі та гнучкі методи керування ПР. Сучасні тренди розвитку робототехніки в цілому вказують на значний приріст випуску та застосування особливого виду ПР на сучасних технологічних виробництвах, а саме колаборативних промислових роботів (КПР) [1]. КПР – це вид ПР, розроблений для виконання різноманітних технологічних завдань у колаборації (співпраці) з працівниками (людьми) у виробничих секторах [2]. КПР знайшли своє застосування не тільки у виробничих, а й у невиробничих сферах, наприклад, у медицині [3].

Різноманітність сфер застосування КПР породжує очевидну, на думку авторів, проблематику термінології та змістовності загальних визначень, правил безпеки під час експлуатації та методів програмування, що забезпечують безпечну взаємодію людини та КПР, виконання безпечних (неколізійних) траєкторій тощо. Проведений аналіз досліджень наявних інформаційних джерел, наприклад, стандартів ISO, не формує єдиної термінології та пропонує різні технічні рішення, які є вузьконаправленими для конкретних технологічних процесів та/або завдань. Зараз термінологія використання КПР та її змістовність не визначена і фактично вкрай рідко розглядається в Україні [4].

Враховуючи сказане вище, автори пропонують своє узагальнене бачення сучасного стану цієї проблеми на основі виконаного критичного аналізу доступних інформаційних джерел та системності щодо термінів, які визначають змістовну частину застосування КПР.

Мета роботи: узагальнити проведений аналіз доступних інформаційних джерел у частині проблематики термінології та змістовності сучасної колаборативної промислової робототехніки та надання рекомендацій щодо термінології останніх для її подальшого використання в наукових та навчальних дослідженнях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування КПР на сучасних промислових виробництвах є однією із характерних ознак рівня Industry 4.0 [5] та Industry 5.0 [6]. Застосування КПР на сучасному виробництві ставить ряд проблемних питань, пов'язаних зі змістовністю термінологічних визначень та їх коректного тлумачення. Нижче наведений стислий аналіз інформаційних джерел вказує на актуальність та релевантність змісту цього питання, а також на різноманітність підходів та методів досліджень у цьому напрямі.

Роботи [7–8] вказують на наявність проблематики застосування виробничих стандартів ISO на практиці у виробництві, у тому числі в сфері робототехніки. Через швидкий технологічний розвиток потрібні зрозумілі мости між технічною та юридичною сферами в колаборативних технологіях. Вказані

роботи акцентують увагу на тому, що з появою відносно нового для виробництва виду промислових робіт (КПР) з'являється ряд питань щодо однозначності термінів у різних стандартах та як правильно юридично трактувати вказане вище. У [8] висвітлюється ідентифікація та дослідження категорій у стандарті ISO [9]. Зміст публікації спрямований на те, щоб виробники робіт та мехатронних пристроїв усвідомили важливість чітких визначень згідно зі стандартами для дотримання законодавства в країнах, де вони експлуатуються. Зазначені роботи частково розглядають проблему, яку висвітлюють автори цієї статті, проте пропонують рішення лише в загальному понятті та в юридичному аспекті.

У [10–11] представлено новий підхід до контролю безпеки в колаборативній робототехніці для промислового застосування на основі вимог останніх стандартів безпеки. Вимоги безпеки перевіряються шляхом виконання тестів перетину між обмежувачими об'єктами, розміри яких обчислюються онлайн, на основі швидкості руху ланок маніпуляційної системи (МС) вздовж траєкторії до зупинки конструктивних елементів КПР. Цей підхід спрямований на подолання обмежень, які погіршують продуктивність КПР через застосування надмірно консервативних обмежень безпеки. Траєкторії зупинки для МС обчислюються в режимі онлайн і виконуються під час встановлення потенційних зіткнень. Ці траєкторії оптимізовані для мінімізації часу зупинки із врахуванням динаміки КПР та обмежень максимального крутного моменту на з'єднаннях ланок МС. Запропонований підхід дозволяє в режимі онлайн оцінити безпечні зони, яких вимагає технічна специфікація. Вказані роботи вирішують ряд проблемних питань колаборативної робототехніки, що передбачають дотримання вимог безпеки за стандартами ISO, але все ж в них повністю не дотримуються термінологічні визначення за відомими системами стандартів.

У [12] розглядаються вимоги щодо забезпечення безпечної роботи систем із використанням КПР, які згадуються в стандарті [13] для колаборативних робіт. Стандарт [13] пропонує рекомендації, які розробники та користувачі мають врахувати при впровадженні засобів захисту в системи з колаборативними пристроями. Але в цьому нормативному документі не передбачено чіткої орієнтації для розробників чи користувачів у виборі запобіжних заходів з усього переліку. У цій публікації висвітлено описані вище прогалини та недоліки і запропоновано фреймворк (програмна платформа), заснований на відомих стандартах [14], для орієнтування розробників та користувачів у переліку захисних заходів щодо застосування КПР на основі результатів аналізу небезпек та оцінки ризиків. Такі напрацювання сортують існуючі терміни та визначення за [13], що є корисним на практиці та частково вирішує проблему однозначності термінів, проте не пропонує нічого нового для зменшення неоднозначності термінологічних та змістовних прогалин.

Стаття [15] вказує на зростання потреби ПР з високою точністю позиціонування відповідно до вимог Industry 4.0 (I4.0). Стандарти [16] і [17] окреслюють вимоги до розрахунку точності ПР та визначають базовий елемент робота (robot base frame – RBF) як одну зі складових, яка впливає на кінцеву точність, що визначена геометричними характеристиками МС. Так званий RBF фактично є точним положенням ланки всередині конструкції ПР та КПР. Однак специфічний підхід чи процес його визначення не передбачено жодним стандартом. У [15] пропонується основа для універсального підходу щодо визначення RBF, який інтегрує метрологічне обладнання та проектування Design of Experiments (DOE). Підхід DOE досліджує, як різні фактори (використовувані осі робота, кількість використовуваних положень точок, їх положення тощо) впливають на повторюваність при встановленні RBF, вимірюючи положення точок, яких робот досягає. Встановлено, що запропонований підхід підвищує повторюваність встановлення початкової точки RBF на 93,4 % порівняно з попереднім методом на основі довільно обраних факторів.

У [18] стверджується, що стандарт [19] сприяє впровадженню гібридних виробничих систем, тобто виробничих систем, які характеризуються тісним взаємозв'язком між людьми-операторами та роботами у спільних завданнях. Гібридні системи «людина – робот» можуть мати велику економічну вигоду в дрібносерійному та середньосерійному виробництві, навіть якщо ця нова парадигма запровадить обов'язкові комплексні аспекти безпеки. Існують різноманітні вимоги до робочих просторів для колаборативної роботи, проте гарантія безпеки містить два різні прикладні рівні: алгоритми, що дозволяють безпечно розподіляти простір між людьми та роботами, і технології, що дозволяють отримувати дані з синтезу датчиків і аналізувати дані про навколишнє середовище. У цій роботі розглядаються обидві проблеми: стратегія уникнення зіткнень, що дозволяє онлайн перепланувати траєкторію руху робота, і безпечна мережа пристроїв як запропонована інфраструктура для досягнення функціональної безпеки. Також дослідники спираються на відомі стандарти в сфері колаборативної робототехніки, проте не стверджують однозначності змісту існуючих термінів або визначень.

Зміст дослідження [20] акцентує увагу на важливості встановлення правильного призначення завдання під час колаборації людини та робота для поєднання продуктивності робота з гнучкістю людини. У зв'язку з цим у цій роботі пропонується алгоритм підходу до проблеми балансування складальної лінії Assembly Line Balancing Problem (ALBP) щодо розподілу часу виконання певних технологічних завдань між H–R (Human – Robot collaboration) у випадку колаборативної роботи людини

(H) і робота (R). Вказана робота ставить за мету дослідити та досягти: 1) мінімізації вартості конвеєрної лінії, оціненої відповідно до кількості працівників та обладнання на лінії, враховуючи КПП; 2) мінімізації кількості кваліфікованих робітників на лінії; 3) мінімізації розподілення навантаження серед працівників на основі їх фізичних можливостей у контексті H–R. Останнє є новим як за змістом, так і за його якісною та кількісною оцінкою. Це дослідження є прикладом роботи, яка успішно вирішує специфічне завдання колаборативної робототехніки, але не враховує однозначність термінів та різні стандарти безпеки.

У [21] описуються структура динамічного розподілу завдань на основі фізичних властивостей компонентів, характеристики завдань та колаборативного робочого простору. Розроблені розподіли завдань досягаються за допомогою набору атрибутів механоскладального процесу з різними балами за часом циклу, адаптивності та безпеки. Робота ілюструється на прикладі колаборативного механоскладального процесу за участі людини і робота.

Дослідження впливу застосування колаборативних роботів у харчовій індустрії на прикладі розробленої для лінії виробництва системи громадського харчування є змістом статті [22]. Запропоновано узагальнюючу методологію для підтримки дослідження техніко-економічної доцільності впровадження такої технології. Ця методологія призначена для менеджерів харчової промисловості, які аналізують автоматизацію процесу і вимірюють продуктивність системи з точки зору пропускної здатності, ергономіки та економічних переваг, які є результатом впровадження колаборативних роботів.

У [23] пропонується алгоритм виявлення колізій без зовнішніх датчиків, які можуть виявляти потенційні зіткнення при взаємодії людини з роботом. Алгоритм заснований на модифікованому програмному спостерігачі відхилення імпульсу першого порядку, який також враховує тертя. Для перевірки алгоритму проведено моделювання та експеримент за допомогою експериментальної платформи колаборативного робота. Результати підтвердили, що зіткнення можна виявити, встановивши відповідні порогові значення сигналів зворотних зв'язків робота. Різні можливі реакції можуть бути імплементовані відповідно до різних стратегій реагування, причому остаточним обмежувачем є те, що сили зіткнення утримуються строго в звичайних межах людських фізичних можливостей (сила фізичного тиску тощо). Це гарантує збереження безпеки в процесах взаємодії системи «людина – робот», та торкається термінології у сфері колаборативної робототехніки.

Стаття [24] описує поточні потреби фінської промисловості з використанням коботів, інший термін щодо колаборативних роботів. Окрім пошуку нових способів спільної роботи з КПП, проблемою залишається безпека. При цьому наголошується на існуванні загальної проблеми щодо недостатності знань про коботи. Ця стаття допомагає зосередити дослідницькі зусилля для підтримки застосування коботів у виробничій галузі без акценту на терміни колаборативної робототехніки.

У [25] розглядається використання популярних ненормованих, тобто сленгових, термінів, пов'язаних із безпекою використання роботів, зокрема, «співіснування», «співпраця», «кооперація», «колаборативний робот», «кобот». Вказані вище терміни використовуються неоднозначно в інформаційних джерелах та на практиці. Порівняння термінів і докази невідповідності надані на основі останніх робіт про безпеку колаборативної робототехніки. Рекомендації щодо класифікації методів безпеки обговорюються відповідно до сучасних стратегій безпеки змішаних режимів роботи технологічної системи H–R. У цій роботі розглядаються терміни та визначення і встановлюється коректність деяких термінів та їх використання.

Узагальнення проведеного стислого аналізу наявних інформаційних джерел очевидним чином вказують на наявність нової технологічної системи, яка названа H–R, що певним чином функціонує та виконує колаборативні технології.

Зміст проаналізованих інформаційних джерел можна умовно розділити на такі, що, з однієї сторони, висвітлюють проблеми безпеки [7–11], відповідності міжнародним стандартам [12, 15, 18] та функціональності [20–25], а з іншої – функціонування колаборативних технологічних систем (КТС), що характеризуються кількісними оцінками колаборації H–R, що є здебільшого характерне для складальних виробництв.

Загальна тенденція розширення сфери застосування КПП на основі виконаного аналізу інформаційних джерел показала, по-перше, що тематика колаборативної робототехніки активно обговорюється та досліджується як в наукових колах, так і між інженерами-практиками різних галузей та виробництв; по-друге, що дослідники та інженери успішно розв'язують вузьконаправлені задачі на основі можливості своїх засобів та обладнання, але часто нехтують питанням термінології, змістовності визначень та недотримання тих або інших міжнародних стандартів; по-третє, публікації щодо колаборативної робототехніки в Україні майже відсутні, як і відсутні відповідні ДСТУ з цієї проблематики.

Викладення основного матеріалу. У статті автори продовжують розвиток попередніх вкрай рідких напрацювань в Україні в напрямі дослідження проблем змістовності термінології колаборації H–R [26]. Систематизовані авторами узагальнення проведеного аналізу доступних інформаційних джерел щодо існуючої термінології стисло представлено в таблиці 1.

Джерела та рекомендовані терміни промислової колаборативної робототехніки

Термін \ Джерело	ISO 10218-1:2011 [19]	ISO 10218-2:2011 [27]	ISO/TS 15066:2016 [13]	ISO 13482:2014 [9]	ISO 31000 [14]	Робота авторів [4]
Колаборативна робототехніка	●	●	●	●	●	●
Колаборативний робот (кобот)	●	●	●	●	●	●
Колаборація	●	●	●	○	○	●
Колаборативна операція	●	●	●	○	○	●
Колаборативна технологічна система (КТС)	○	○	○	○	○	●
Колабораційний робочий простір	●	●	●			○
Взаємодія людина – робот	●	●				●
Рівень колаборації	●	●	●			●
Співіснування (Coexistence)	●	●	●			○
Послідовна співпраця (Sequential Collaboration)	●	●	●			○
Співпраця (Cooperation)	●	●	●			○
Колаборація зі зворотним зв'язком (Responsive Collaboration)	●	●	●			○

Умовні позначення: ● – означає чітке визначення, або згадування, а ○ – неявне визначення або опосередковане згадування. Відсутність вказаних вище знаків означає, що термін у відповідних інформаційних джерелах не згадувався і тим паче не розкривався його зміст

Аналіз згадування термінів у стандартах показав, що спеціалізовані стандарти по колаборативній робототехніці [13, 19, 27] повністю або частково містять в собі базову інформацію про КПП та визначають фундаментальні положення щодо застосування та дотримання безпеки. Навпаки, неспеціалізовані стандарти [9, 14] частково несуть інформацію про колаборативну робототехніку в іншому аспекті, але чітко не дають визначення обраним термінам.

Вказане вище формує наступне основне твердження: тенденція застосування КПП та збільшення їх (КПП) в різних технічних сферах є очевидною. Але в деяких стандартах термінологія в сфері колаборативної робототехніки опосередковано згадується, але не формує опорних, базових визначень, а спеціалізовані стандарти пропонують терміни, які є універсальними, проте не можуть охопити всі технічні сфери.

На підставі викладеного вище в згаданих інформаційних джерелах [1–25] та за рідким виключенням за відсутності на сьогодні в Україні подібних досліджень та нормативних документів автори рекомендують використовувати з науковою та навчальною метою зазначену нижче термінологію в області колаборативної робототехніки.

Колаборативна робототехніка – це частина робототехніки, яка вивчає, досліджує та практикує застосування КПП у взаємодії (колаборації) з людиною під час виконання різноманітних технологічних операцій та виконання завдань.

Колаборативні роботи (коботи) – це роботи, призначені для прямої взаємодії H–R (людина – робот) в спільному робочому просторі або там, де люди та роботи знаходяться в безпосередньому контакті. Програми колаборативних робіт відрізняються від традиційних програм ПР, у яких роботи ізольовані від контакту з людьми [28]. Як визначено Міжнародною організацією стандартизації [13], *кобот* – це робот, який можна використовувати у колаборативних операціях, де роботи та люди працюють одночасно в межах визначеного робочого простору для виробничих операцій (це не враховує системи «робот і робот» або розміщених людей і роботів, які працюють у різний час).

Колаборація (в контексті промислової робототехніки) – це процес спільного виконання операції, дії чи роботи людиною та роботом для досягнення поставленої мети.

Колаборативні операції – це визначена послідовність дій між КПП та людиною, яка в результаті призводить до виконання конкретного завдання чи роботи.

Колаборативна технологічна система (КТС) – це технологічна система, в якій як універсальні гнучкі засоби автоматизації використовується КПП, з яким спільно працюють люди.

Колабораційний робочий простір – це спільний робочий простір людини та КПП, в якому виконуються колаборативні операції.

Взаємодія людина – робот (Human – Robot interaction HRI) – це процес взаємодії людей та роботів у різних аспектах життєдіяльності. Взаємодія людини з роботом – це багатодисциплінарна галузь, до якої входять взаємодії людини з комп'ютером, штучним інтелектом, робототехнікою.

Рівень колаборації – це умовне якісне визначення глибини співпраці людини та робота під час колаборативних операцій.

I^{FR} визначає чотири рівні колаборації між промисловими роботами та людьми [29], а саме:

– *співіснування* (Coexistence) – це рівень колаборації, коли людина та робот працюють поруч один з одним без захисної огорожі, але без спільного робочого простору;

– *послідовна співпраця* (Sequential Collaboration) – це рівень колаборації, коли людина та робот активні в спільному робочому просторі, але їх рухи є послідовними; вони не працюють над однією операцією одночасно;

– *співпраця* (Cooperation) – це рівень колаборації, коли робот і людина працюють над однією частиною одночасно і обидва знаходяться в русі;

– *колаборація зі зворотним зв'язком* (Responsive Collaboration) – це рівень колаборації, коли робот реагує в режимі реального часу на рух працівника.

Варто наголосити, що вказані вище терміни та їх зміст можуть бути прийнятими до використання до періоду формування усталеної, стійкої термінології в сфері колаборативної робо техніки.

Наразі або не існують, або недосконало та нечітко випрацьовані методи визначення рівня колаборації Н–R при виконанні різноманітних завдань. Проте у раніше згаданій роботі [21] запропоновано деякі методи, які частково визначають рівень колаборації Н–R у кількісних характеристиках. Наприклад, вимірювання конкретної дії складального процесу в КТС в умовних одиницях – балах «потенціалу». Ці бали комплексно, але суб'єктивно визначаються якісними та кількісними характеристиками, такими як: вага, крихкість, форма деталі / компонента; точність складання; відстань між компонентами у робочій зоні КПП; вид з'єднань тощо. Представлена методика створена для оцінки та розподілу технологічних складальних операцій між людиною і КПП. В цьому дослідженні всі операції може виконати людина, але при отриманні певного бала «потенціалу» операція може бути виконана КПП, що дає змогу виконати розподіл операцій процесу складання та опосередковано визначити «рівень» колаборації Н–R. Нижче вказані вирази є прикладом кінцевої оцінки відносного «потенціалу» HRC_{CP} для виконання певної частини технологічного процесу складання.

$$HRC_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^J CP}{4J} \times 100. \quad (1)$$

Рівняння (1) вираховує частину відносного «потенціалу» HRC (Human Robot Collaboration) конкретної операції технологічного процесу складання для визначеної деталі в контексті врахування фізичних властивостей матеріалу деталі. В (1) CP – це бали, що визначені фізичними характеристиками деталі (вага, твердість, форма тощо), а J – визначає кількість пов'язаних із деталлю атрибутів.

Така кількісна оцінка використовується в подальших розрахунках визначення доцільності використання КПП у аналізованому технологічному процесі складання:

$$HRC_{PART} = \frac{\sum AS}{\sum AF} \times 100. \quad (2)$$

Рівняння (2) вираховує загальний відносний «потенціал» HRC конкретної операції технологічного процесу складання для визначеної деталі HRC_{PART} , де AS – бали збірки / складання (assembly score) за кожний фактор, розглянутий для розподілу операцій між людиною та КПП; а AF – це сума всіх факторів, розглянутих для HRC_{PART} .

Відносний «потенціал» HRC всього технологічного процесу складання для конкретного виробу визначається таким рівнянням:

$$HRC_{PRODUCT} = \left[\frac{N}{n} + \frac{\sum AS}{\sum AF} \right] \log_2(N+1), \quad (3)$$

де N – загальна кількість усіх операцій з деталями, які використовуються при складанні; n – загальна кількість особливих операцій з деталями; $\log_2(N+1)$ – міра ентропії для представлення кількості інформації.

Виконаний аналіз інформаційних джерел показав актуальність існуючих на сьогодні проблем, що пов'язані з термінологією у сфері колаборативної робототехніки, з її змістовністю та кількісними оцінками. Автори цієї статті почали досліджувати вказані вище питання в контексті структурності та системності у раніше опублікованій роботі [4], де запропоновано внести додатковий (проміжний) рівень у систему піраміди автоматизації (за стандартом ISA 95 [30]). Додатковий введений підрівень деталізує з точки зору системності зв'язки між обладнанням; колаборативним роботом та людиною, що частково деталізує проблему їх взаємодії.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведено аналіз доступних інформаційних джерел у частині проблематики термінології та змістовності в сфері колаборативної промислової робототехніки. Виконано узагальнення та визначено змістовність поняття «колаборативність» у цьому контексті, його якісні та кількісні характеристики. Розглянуто найпоширеніші терміни в сфері колаборативної робототехніки у частині згадування їх у доступних інформаційних джерелах, в тому числі в міжнародних стандартах ISO.

На підставі аналізу інформаційних джерел надано рекомендації щодо термінології колаборативної робототехніки.

Висвітлено фрагмент однієї із малочисельних існуючих методик для визначення доцільності використання КІР у складальних технологічних процесах, що супроводжується визначенням відповідних кількісних оцінок.

У перспективі доцільно розглянути аналіз досліджень у частині розробки кількісних та якісних оцінок не тільки складальних, а й інших технологічних процесів колаборативної робототехніки.

Перспективною у подальшому автори також вбачають розробку інженерно-прикладної методики досліджень щодо визначення превентивної оцінки доцільності впровадження колаборативних технологій в різних галузях сучасних виробництв. Цей напрям варто розглядати як потенційну складову підвищення ефективності технологічної підготовки, в тому числі роботизованих механоскладальних виробництв.

Список використаної літератури:

1. The International Federation of Robotics. – 2022 [Electronic resource]. – Access mode : <https://ifr.org/free-downloads/>.
2. Privacy Policy / The International Federation of Robotics. – 2022 [Electronic resource]. – Access mode : <https://ifr.org/papers>.
3. *Su Y.-H.* Collaborative Robotics Toolkit (CRTK): Open Software Framework for Surgical Robotics Research / *Y.-H. Su, A.Munawar, A.Deguet* // Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), 24 December, 2020 [Electronic resource]. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9287933>. DOI: 10.1109/IRC.2020.00014.
4. *Kyrylovykh V.A.* System and Structural Approach to Interaction of Components in Collaborative Flexible Production Systems / *V.A. Kyrylovykh* // Proceedings of the Technical University of Sofia. – 2022. – Vol. 72, № 3 [Electronic resource]. – Access mode : <https://proceedings.tu-sofia.bg/>.
5. *Chunguang B.* Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective / *B.Chunguang* // International Journal of Production Economics. – 2020. – Vol. 229, November [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527320301559>.
6. Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications / *P.K.R. Maddikunta and other* // Journal of Industrial Information Integration. – 2022. – Vol. 26, March [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X21000558>.
7. *Inoue T.* Standardization of Assistive Products with Robotic Technology – From a Perspective of ISO/TC173 / *T.Inoue, S.Yamauchi, K.-E.Westman* // Harnessing the Power of Technology to Improve Lives : Studies in Health Technology and Informatics. – 2017. – Vol. 242 [Electronic resource]. – Access mode : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28873853/>.
8. *Villaronga Fosch Eduard* ISO 13482:2014 and Its Confusing Categories. Building a Bridge Between Law and Robotics / *Eduard Fosch Villaronga* // Mechanisms and Machine Science. – 2016. – Vol. 39 [Electronic resource]. – Access mode : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-30674-2_3.
9. Robots and Robotics Devices – Safety Requirements for Personal Care Robots : ISO 13482:2014 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.iso.org/standard/53820.html>.
10. Application of dynamically scaled safety zones based on the ISO/TS 15066:2016 for collaborative robotics / *L.Scalera, A.Giusti, V. di Cosmo, M.Riedl* // International Journal of Mechanics and Control. – 2020. – № 21 (1), June. – P. 41–50 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/ONEhphz>.
11. Collaborative Robotics Safety Control Application Using Dynamic Safety Zones Based on the ISO/TS 15066:2016 / *Vincenzo Di Cosmo and other* // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 980 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/pNEgbar>.
12. *Chemwenoa P.* Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment : A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems / *P.Chemwenoa, L.Pintelonb, W.Decreb* // Safety Science. – 2020. – Vol. 129, September [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753520302290>.
13. Robots and robotic devices – Collaborative robots : ISO/TS 15066:2016 / International Organisation of Standardisation [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.iso.org/standard/62996.html>.
14. Risk management : ISO 31000:2018 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.iso.org/ru/iso-31000-risk-management.html>.
15. *McGarry L.* Assessment of ISO Standardisation to Identify an Industrial Robot's Base Frame / *L.McGarry, J.Butterfield, A.Murphy* // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2022. – Vol. 74, April [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584521001551>.
16. BS EN ISO 9283:1998 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/nNEhk8J>.
17. ISO/TR 13309:1995 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.iso.org/standard/21679.html>.

18. Safe Human-Robot Cooperation in an Industrial Environment / *N.Pedrocchi, F.Vicentini, M.Matteo, L.Molinari Tosatti* // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2013. – Vol. 10, Issue 1 [Electronic resource]. – Access mode : <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.5772/53939>.
19. Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots (ISO 10218-1:2011) / International Organisation of Standardisation, 2011 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.iso.org/standard/51330.html>.
20. *Dalle Mura M.* Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach / *M. Dalle Mura, G.Dini* // *CIRP Annals*. – 2019. – Vol. 68, Issue 1 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850619300320>.
21. *Malik A.A.* Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution / *A.A. Malik, A.Bilberg* // *Procedia CIRP*. – 2019. – Vol. 81 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119304780>.
22. *Accorsi R.* An application of collaborative robots in a food production facility / *R.Accorsi* // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/yNEg21O>.
23. Collision detection algorithm for collaborative robots considering joint friction / *J.Xiao and other* // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2018. – Vol. 15, Issue 4 [Electronic resource]. – Access mode : <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/1729881418788992>.
24. *Aaltonena I.* Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: barriers and development needs / *I.Aaltonena, T.Salmi* // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920302055>.
25. *Vicentini F.* Terminology in safety of collaborative robotics / *F.Vicentini* // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2020. – Vol. 63 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584519300614>.
26. *Кирилович В.А.* Проблеми промислової колаборативної робототехніки в гнучких механоскладальних виробництвах / *В.А. Кирилович, А.Р. Кравчук* // *Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки 16–20, 26 травня, 2022* [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/INEhnXd>.
27. Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration (ISO 10218-2:2011) / International Organisation of Standardisation [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.iso.org/standard/41571.html>.
28. *Stieber Thilo I.* Cobot: Future collaboration of man and machine / *Thilo Stieber* // *The Manufacturer*. – 2016 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/eNEgPMY>.
29. Demystifying Collaborative Industrial Robots / International Federation of Robotics. – 2018 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/HNEgJYX>.
30. Automation Pyramid as Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study: A Didactic Manufacturing System / *E.Martinez, P.Ponce, I.Macias, A.Molina* // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, Issue 14 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4656/html>.

References:

1. The International Federation of Robotics (2022), [Online], available at: <https://ifr.org/free-downloads/>
2. The International Federation of Robotics (2022), *Privacy Policy*, [Online], available at: <https://ifr.org/papers>
3. Su, Y.-H., Munawar, A. and Deguet, A. (2020), *Collaborative Robotics Toolkit (CRTK): Open Software Framework for Surgical Robotics Research*, Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), 24 December, [Online], available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9287933>. DOI: 10.1109/IRC.2020.00014
4. Kyrlyovych, V.A. (2022), «System and Structural Approach to Interaction of Components in Collaborative Flexible Production Systems», *Proceedings of the Technical University of Sofia*, Vol. 72, No. 3, [Online], available at: <https://proceedings.tu-sofia.bg/>
5. Chunguang, B. (2020), «Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective», *International Journal of Production Economics*, Vol. 229, November, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527320301559>
6. Maddikunta, P.K.R. et al. (2022), «Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications», *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 26, March, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X21000558>
7. Inoue, T., Yamauchi, S. and Westman, K.-E. (2017), «Standardization of Assistive Products with Robotic Technology – From a Perspective of ISO/TC173», *Harnessing the Power of Technology to Improve Lives*, *Studies in Health Technology and Informatics*, Vol. 242, [Online], available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28873853/>
8. Villaronga, E.F. (2016), «ISO 13482:2014 and Its Confusing Categories. Building a Bridge Between Law and Robotics», *Mechanisms and Machine Science*, Vol. 39, [Online], available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-30674-2_3
9. *ISO 13482:2014 Robots and Robotics Devices – Safety Requirements for Personal Care Robots*, [Online], available at: <https://www.iso.org/standard/53820.html>
10. Scalara, L., Giusti, A., di Cosmo, V. and Riedl, M. (2020), «Application of dynamically scaled safety zones based on the ISO/TS 15066:2016 for collaborative robotics», *International Journal of Mechanics and Control*, No. 21 (1), June, pp. 41–50, [Online], available at: <https://cutt.ly/ONEhphz>

11. Cosmo, Vincenzo Di et al. (2019), «Collaborative Robotics Safety Control Application Using Dynamic Safety Zones Based on the ISO/TS 15066:2016», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 980, [Online], available at: <https://cutt.ly/pNEgbar>
12. Chemwenoa, P., Pintelonb, L. and Decreb, W. (2020), «Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment: A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems», *Safety Science*, September, Vol. 129, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753520302290>
13. International Organisation of Standardisation (2016), *Robots and robotic devices – Collaborative robots (ISO/TS 15066:2016)*, [Online], available at: <https://www.iso.org/standard/62996.html>
14. *ISO 31000 Risk management*, [Online], available at: <https://www.iso.org/ru/iso-31000-risk-management.html>
15. McGarry, L., Butterfield, J. and Murphy, A. (2022), «Assessment of ISO Standardisation to Identify an Industrial Robot's Base Frame», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, April, Vol. 74, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584521001551>
16. BS EN ISO 9283:1998, [Online], available at: <https://cutt.ly/nNEhk8J>
17. ISO/TR 13309:1995, [Online], available at: <https://www.iso.org/standard/21679.html>
18. Pedrocchi, N., Vicentini, F., Matteo, M. and Molinari Tosatti, L. (2013), «Safe Human-Robot Cooperation in an Industrial Environment», *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, Issue 1, [Online], available at: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.5772/53939>
19. International Organisation of Standardisation (2011), *Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots (ISO 10218-1:2011)*, [Online], available at: <https://www.iso.org/standard/51330.html>
20. Dalle Mura, M. and Dini, G. (2019), «Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach», *CIRP Annals*, Vol. 68, Issue 1, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850619300320>
21. Malik, A.A. and Bilberg, A. (2019), «Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution», *Procedia CIRP*, Vol. 81, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119304780>
22. Accorsi, R. (2019), «An application of collaborative robots in a food production facility», *Procedia Manufacturing*, Vol. 38, [Online], available at: <https://cutt.ly/yNEg21O>
23. Xiao, J. et al. (2018), «Collision detection algorithm for collaborative robots considering joint friction», *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 15, Issue 4, [Online], available at: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/1729881418788992>
24. Aaltonena, I. and Salmi, T. (2019), «Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: barriers and development needs», *Procedia Manufacturing*, Vol. 38, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920302055>
25. Vicentini, F. (2020), «Terminology in safety of collaborative robotics», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 63, [Online], available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584519300614>
26. Kyrylovych, V.A. and Kravchuk, A.R. (2022), «Problemy promyslovoi' kolaboratyvnoi' robototekhniki v gnuchkyh mehanoskladal'nyh vyrobnyctvah», *Tezy Vseukrai'ns'koi' naukovo-praktychnoi' on-line konferencii' zdobuvachiv vyshhoi' osvity i molodyh uchenykh, prysvjachenoj' Dnju nauky 16–20, 26 travnja*, [Online], available at: <https://cutt.ly/INEhnXd>
27. International Organisation of Standardisation (2011), *Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration (ISO 10218-2:2011)*, [Online], available at: <https://www.iso.org/standard/41571.html>
28. Stieber, T. (2016), «I, Cobot: Future collaboration of man and machine», *The Manufacturer*, [Online], available at: <https://cutt.ly/eNEgPMY>
29. International Federation of Robotics (2018), *Demystifying Collaborative Industrial Robots*, [Online], available at: <https://cutt.ly/HNEgJYX>
30. Martinez, E., Ponce, P., Macias, I. and Molina, A. (2021), «Automation Pyramid as Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study: A Didactic Manufacturing System», *Sensors*, Vol. 21, Issue 14, [Online], available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4656/html>

Кирилович Валерій Анатолійович – професор кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4412-1344>.

Наукові інтереси:

- технологічні аспекти робототехніки, в тому числі колаборативної;
- технологічна підготовка роботизованих механоскладальних виробництв;
- нечітка багатокритеріальна оптимізація.

Мельничук Петро Петрович – доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0361-756X>.

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- роботизовані технології.

Кравчук Антон Романович – асистент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотока на Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-8305-2492>.

Наукові інтереси:

- промислова та мобільна робототехніка;
- САПР;
- вбудовані системи.

Яновський Валерій Анатолійович – доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-1702-4282>.

Наукові інтереси:

- проектування технологічного оснащення;
- комп'ютерні технології проектування.

Kyrylovyh V.A., Melnychuk P.P., Kravchuk A.R., Yanovskyi V.A.

Terminological and substantive aspects of collaborative robotics: analysis and recommendations

The development of industry to the level of Industry 4.0 and the transition to level 5.0 involves fully automated production, where all processes are controlled in real time and taking into account changing external conditions. This is possible due to automation and robotization of production processes. The use of collaborative industrial robots in modern production poses a number of problematic issues not only from the technical side, but also related to the meaningfulness of definitions and correct interpretation, i.e. the unequivocal understanding of their essence, terminology in collaborative robotics when designing robotic technologies at the stage of technological preparation of robotic mechanical assembly production machine and instrument construction: in this case, compliance with ISO production standards is mandatory; in the development of control programs taking into account safety requirements, etc. The above problems do not have a single correct solution, although they are not new in the field of manufacturing and robotics. The work presents a concise analysis of information sources that indicate a variety of approaches and methods of research in this direction, as well as a meaningful interpretation of the most common terms.

Keywords: collaborative robotics; collaborative robots; ISO standards; safety; technology.

Стаття надійшла до редакції 16.06.2022.