

КИРИЛОВИЧ ВАЛЕРІЙ

Державний університет "Житомирська політехніка"

ORCID ID: [0000-0002-4412-1344](https://orcid.org/0000-0002-4412-1344)e-mail: [kiril\\_va@ztu.edu.ua](mailto:kiril_va@ztu.edu.ua)

КРАВЧУК АНТОН

Державний університет "Житомирська політехніка"

ORCID ID: [0000-0002-8305-2492](https://orcid.org/0000-0002-8305-2492)e-mail: [anton\\_aikt@ztu.edu.ua](mailto:anton_aikt@ztu.edu.ua)

## ТРИРІВНЕВИЙ ПІДХІД ДО ПОЧАТКОВИХ ЕТАПІВ ПРОЄКТУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сучасні автоматизовані виробництва широко застосовують промислові роботи (ПР), які зарекомендували себе як надійне, продуктивне та ефективне технологічне обладнання. Проте існують випадки, коли використання ПР є неможливим або небезпечним, що призводить до застосування людської праці. Завдяки постійному розвитку технологій мікропроцесорної техніки, апаратних компонентів та програмному забезпеченню з'явився новий вид промислових роботів, а саме колаборативні промислові роботи (КПР). Відмінною характеристикою КПР від ПР є функціональна можливість реагувати та взаємодіяти з людьми, і відповідно виконувати спільні технологічні операції. Не зважаючи на ряд переваг КПР над ПР, існують проблемні питання, що пов'язані з недостатніми напрацюваннями над теоретичними основами технологічної підготовки колаборативних роботизованих технологій (КРТ) на виробництвах, що передбачують системність та комплексність. Вищевказане підкреслює відсутність єдиних підходів щодо технологічної підготовки КРТ. В даній статті висвітлено запропонований трирівневий підхід реалізації початкових етапів проєктування КРТ, що комплексно розглядає та вирішує питання можливості застосування КПР на виробництві, розподілу завдань між людиною та КПР, визначення виду взаємодії компонентів технологічної системи людина-КПР. Висвітлено запропонований підхід щодо системного прийняття технологічних рішень при вирішенні вище вказаних проблем як задачі нечіткої багатокритеріальної оптимізації, що розв'язується з комплексним використанням методів аналізу ієрархій (МАІ) та нечіткого багатокритеріального вибору альтернатив (НБВА). Виконано аналіз доступних інформаційних джерел щодо досліджень та особливостей застосування КПР на виробництвах, який вказав на актуальність, важливість та перспективність подальшого розвитку колаборативної робототехніки.

Ключові слова: промисловий робот, колаборативна робототехніка, автоматизація, безпека.

KYRYLOVYCH VALERII

Zhytomyr Polytechnic State University

KRAVCHUK ANTON

Zhytomyr Polytechnic State University

### A THREE-TIERED APPROACH TO THE INITIAL STAGES OF DESIGN OF COLLABORATIVE ROBOTIC TECHNOLOGIES

Modern automated production facilities widely use industrial robots (IRs), which have proven to be reliable, productive and efficient technological equipment. However, there are cases when the use of industrial robots is impossible or dangerous, which leads to the use of human labour. Due to the continuous development of microprocessor technology, hardware components and software, a new type of industrial robots has emerged, namely collaborative industrial robots (CIRs). The distinctive feature of CIRs from IRs is the functional ability to respond and interact with people, and thus perform joint technological operations. Despite a number of advantages of CIRs over IRs, there are problematic issues related to insufficient developments in the theoretical foundations of technological training of collaborative robotic technologies (CRTs) in production facilities that involve systematic and complexity. The above emphasises the lack of unified approaches to technological training of CRT, namely, the issues of distribution of tasks between humans and CIR in CRT, as well as the lack of approaches to determining the feasibility of using CRT in general. The above emphasises the lack of unified approaches to the technological preparation of CRT. This article highlights the proposed three-tiered approach to the implementation of the initial stages of CRT design, which comprehensively and systematically takes into account the essence of collaborative technologies and CIR. This approach systematically and comprehensively considers and resolves the issues of the possibility of using CRT in production, the distribution of tasks between humans and CIRs, and the definition of the type of human-CIR interaction. The proposed approach to systematic technological decision-making in solving the above problems as a problem of fuzzy multicriteria optimisation, which is solved with the integrated use of analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy multicriteria selection of alternatives (FMSA) methods, is highlighted. An analysis of the available information sources on research and peculiarities of application of CIR in production is carried out, which indicates the relevance, importance and prospects for further development of collaborative robotics.

Keywords: industrial robot, collaborative robotics, automation, safety

### Постановка проблеми

Сучасна промислова робототехніка є невід'ємною складовою автоматизованого виробництва, яке відповідає вимогам концепції Industry 4.0. Промислові роботи (ПР), які сьогодні використовуються на різногалузевих виробництвах, зарекомендували себе як надійне та ефективне технологічне обладнання, особливістю якого є можливість переналаштуватися під мінливі вимоги виробництв. Але існують технології і виробництва, де використання «класичних» ПР є неможливим, неефективним або небезпечним для людини через особливості виконання технологічного процесу. Вищевказана проблема призвела до появи нового напрямку промислової робототехніки, а саме колаборативної промислової робототехніки. На сьогодні

відокремлюють новий вид ПР, який призначений для спільної роботи або взаємодії з людиною, що називається колаборативний промисловий робот (КПР). Колаборативна робототехніка з кожним роком збільшує обсяги КПР на виробництвах у всьому світі [1], що пояснюється функціональними та апаратними можливостями останніх.

Не зважаючи на вищесказане, на сьогодні відсутні теоретичні основи технологічної підготовки колаборативних роботизованих технологій (КРТ), які б враховувала системність та комплексність. Існуючі напрацювання в «класичних» роботизованих технологіях можуть лише фрагментарно вирішити проблеми, які виникають при проектуванні КРТ.

Вищевказане формує ряд проблемних питань щодо технологічної підготовки КРТ, що особливо важливо на її початкових етапах. На сьогодні не існує єдиного підходу щодо розподілу завдань між людиною та КПР в КРТ, рівно як і не існує підходів щодо визначення доцільності використання КРТ в цілому.

### Аналіз останніх джерел

Застосування КПР на сучасних виробництвах є одним із характерних проявів розвитку концепції 4-ої промислової революції, тобто Industry 4.0. Робота [2] розглядає застосування сучасних технологій, в тому числі і штучний інтелект, для підвищення ефективності застосування КПР на виробництвах. Вищевказане підкреслює широкий ареал застосування колаборативних технологій в різноманітних технічних та інженерних сферах, а також їх актуальність на сьогодні.

Роботи [3-6] висвітлюють теперішній стан колаборативної робототехніки у виробничій сфері та прогнозують її подальший розвиток у коротко- та довгострокову перспективу. В статтях акцентується увага на активному застосуванні колаборативних технологій у виробництвах на сьогодні, особливо у складальних виробництвах. Також автори зазначають збільшення обсягів застосування КПР з кожним роком у всьому світі. Останнє забезпечується стрімким розвитком мікропроцесорної техніки, технологій штучного інтелекту, програмного забезпечення тощо. Тому дослідники прогнозують подальший приріст обсягів виробництва та застосування КПР у різногалузевих виробництвах, що теоретично підвищить ефективність роботи та безпеку людей на виробництві завдяки специфіці функціональних можливостей КПР.

Статті [7-11] висвітлюють різноманітність застосування колаборативних технологій, а саме застосування КПР, у різних галузях сучасного виробництва. Наприклад, робота [7] вказує на можливість використання КПР у технологічних процесах пакування на складах поштових компаній, а також на їх ефективність та перспективу розвитку в даному напрямку.

Одна із «класичних» сфер застосування як ПР, так і КПР є автомобільна індустрія, яка висвітлюється у статті [8]. Стаття присвячена огляду можливостей використання ПР та КПР в автомобільній промисловості, яка на сьогоднішній день займає значну частину ринку, де використовується робототехніка. В даній роботі виконано огляд застосування КПР, який вказав, що складання, переміщення та зварювання на сьогодні є найбільш поширеними операціями, які виконують КПР на виробництвах. Також автори вбачають подальші перспективи розвитку колаборативних технологій в автомобільній індустрії.

Відомі випадки коли КПР застосовується у сфері виготовлення продуктів харчування, які висвітлюються в статті [9], що вказує на так би мовити функціональну гнучкість колаборативних технологій в цілому. У цій роботі досліджується вплив впровадження КПР у сферу громадського харчування на прикладі дослідження, розробленого для лінії виробничої системи громадського харчування. Автори запропонували узагальнену методологію для підтримки дослідження технічної та економічної доцільності впровадження такої технології, а також висвітлили майбутні перспективи розвитку в даному напрямку.

Робота [10] висвітлює проблемні питання, які виникають на етапі проектування автоматизованих гнучких ліній для складання виробів з використанням КПР. Автори вказують на важливість встановлення правильного розподілу завдань між людиною та КПР, щоб поєднати продуктивність роботи з гнучкістю людини. В даній роботі акцентується увага на спільній праці людини та КПР, а саме на проблемні питання, способи їх вирішення та перспективи в подальших розробках.

У статті [11] представлено огляд ролі людей і КПР на сучасних "розумних" виробництвах, їх зв'язок з базисами Industry 4.0 та прогресу, якого вони досягають у застосуванні відповідних технологій. У цій роботі автори дають визначення "розумних заводів" і "розумного виробництва" в контексті використання колаборативних технологій та визначення ролі людей і КПР. Виконано огляд окремих технологій, що застосовуються на "розумних заводах" та розглянуто майбутні перспективи розвитку даного напрямку.

Колаборація людини та КПР відіграє ключову роль у сучасній промисловості, підтримуючи розробку все більш прогресивних технологій на виробництвах. Але однією з перешкод щодо широкого застосування КРТ є питання безпеки. Робота [12] вказує на важливість забезпечення та дотримання безпеки в КРТ. В цьому огляді надається оновлена інформація про стандарти і підходи до впровадження, представлені в новітній літературі, щоб відобразити сучасний стан цієї важливої дослідницької теми. Автори висвітлюють складні питання і перспективи майбутнього розвитку безпеки КРТ, щоб надати рекомендації, які слід враховувати при розробці промислових систем, що використовують КПР.

Також існує ряд публікацій [13-18] щодо дослідження актуальних питань, які розглянуті в Україні, а саме: проблеми термінології колаборативної робототехніки, проблеми структурованості розуміння колаборативної робототехніки, проблеми безпеки КРТ, проблеми програмної складової в колаборативних технологіях, щодо розподілу задач між людиною та КПР на виробництві тощо.

Проведений стислий аналіз доступних інформаційних джерел підкреслює актуальність, важливість та перспективність досліджень в сфері колаборативної робототехніки в різногалузевих виробництвах, а також відсутність структурованих, системних напрацювань щодо первинних етапів проектування КРТ.

**Метою роботи** є висвітлення нового підходу, який системно розглядає початкові етапи проектування КРТ та може розглядатися як складова технологічної підготовки КРТ машино- та приладобудування.

### Виклад основного матеріалу

Сучасні КРТ, які застосовуються на виробництві, передбачають постійну або фрагментарну взаємодію людини та КПП при виконанні технологічних операцій [15, 16, 19]. Співпраця між людиною і роботом (human-robot collaboration) зазвичай передбачає роботу без захисного огороження та інших захисних пристосувань, що кардинально відрізняє КРТ від «класичних» роботизованих технологій. Вищевказана відмінність КПП від ПР реалізується за допомогою апаратних та програмних технічних рішень, які забезпечують функціональні можливості КПП щодо реагування на зміну зовнішнього середовища та відпрацювання закладених алгоритмів взаємодії з людиною. Тому спільні операції, які виконують люди і КПП, об'єднані в єдиному спільному робочому просторі (SW – shared workspace) (див. рис. 1), що визначається площею перетину робочого простору маніпуляційної системи КПП (RW – robot workspace) та робочого простору людини (WW – worker workspace) [19]. Вищевказане висвітлює нову роль людини як невід'ємної та обов'язкової складової КРТ, а її функціонування забезпечується як роботою КПП, так і активною участю людини.

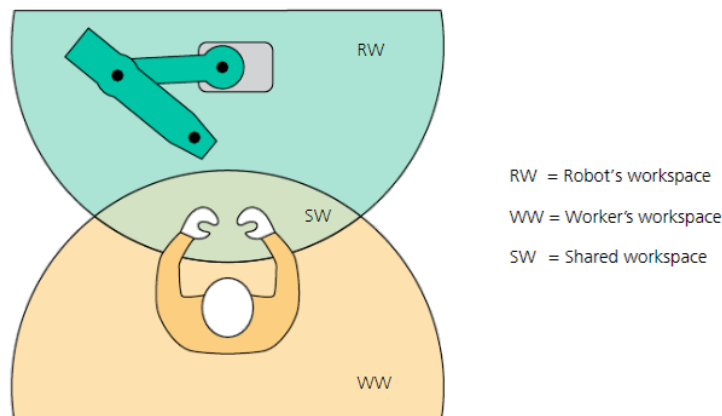


Рис. 1. Робочі простори людини та КПП [19]

В залежності від типу взаємодії людей та КПП з об'єктами на сьогодні існують наступні види взаємодії людина-КПП: coexistence, synchronized, cooperation та collaboration [20].

Вид взаємодії coexistence, або співіснування, передбачає таку організацію спільної роботи людини та КПП, коли вони працюють поруч один з одним, але не мають спільного робочого простору (SW).

Синхронізація (synchronized) передбачає роботу людини і КПП в спільному робочий просторі, де присутня тільки людина, або присутній тільки КПП в конкретний проміжок часу, або, простіше кажучи, робота в спільному робочому просторі виконується по черзі.

Співпраця (cooperation) передбачає такий вид взаємодії, коли людина та КПП виконують роботу в спільному робочому просторі, але не працюють одночасно над одним об'єктом.

Одночасна робота та/або контакт людини і КПП з одним об'єктом – це класичне представлення колаборації (collaboration) в КРТ [21].

На сьогодні найпоширенішими видами взаємодії людина-КПП є співіснування та синхронізація, які вважаються надійними, безпечними та ефективними з огляду на вимоги сучасної промисловості. Проте більш перспективними залишаються види взаємодії кооперація та колаборація, які є більш гнучкими, мають вищий рівень безпеки та апіорі ефективніші загалом [22].

На сьогодні одними з актуальних та невирішених питань колаборативної робототехніки є визначення можливості та доцільності застосування КПП на виробництві, розподіл завдань між людиною і КПП та визначення виду взаємодії людина-КПП. У даній статті автори продовжують розвиток попередніх досліджень та напрацювань щодо системного та комплексного вирішення вищевказаних проблемних питань [13-18]. Пропонований підхід реалізує початкові етапи проектування КРТ, що комплексно враховує сутність колаборативних технологій, конструктивно-технологічні особливості КПП, конструктивно-технологічні властивості об'єктів виробництва тощо. Основою вищевказаного є процедура системного прийняття технологічних рішень при визначенні доцільності застосування КРТ як задачі нечіткої багатокритеріальної оптимізації, що розв'язується з комплексним використанням методів аналізу ієрархій (MAI) та нечіткого багатокритеріального вибору альтернатив (НБВА).

Метод аналізу ієрархій (MAI) – це математичний інструмент системного підходу до вирішення складних проблем прийняття рішень, який заснований на математиці та психології. Він являє собою точний

підхід для визначення кількісної оцінки ваги критеріїв прийняття рішень. Основне застосування методу полягає в підтримці прийнятті рішень за допомогою ієрархічної композиції та рейтингування альтернативних рішень. Рейтингування виконується за допомогою парних порівнянь локальних критеріїв окремими експертами [23].

НБВА передбачає використання системного підходу щодо структурування і вирішення комплексних проблем прийняття рішень і планування, що включають кінцеву множину критеріїв. Цінність даного методу полягає в підтримці осіб, які приймають рішення, що стикаються з такими комплексними задачами. Як правило, не існує єдиного оптимального рішення для таких проблем, і необхідно використовувати переваги осіб, які приймають рішення, для розрізнення або ранжування рішень [24].

Представлення пропонованого системного підходу у вигляді сегментованої піраміди (рис. 2) виникла на основі існуючого представлення структури автоматизованого виробництва ISA 95 [25].

Графічна інтерпретація пропонованого системного підходу представлена 3 рівнями:

1. Стратегічний рівень L1.
2. Тактичний рівень L2.1 та L2.2.
3. Виконавський рівень L3.

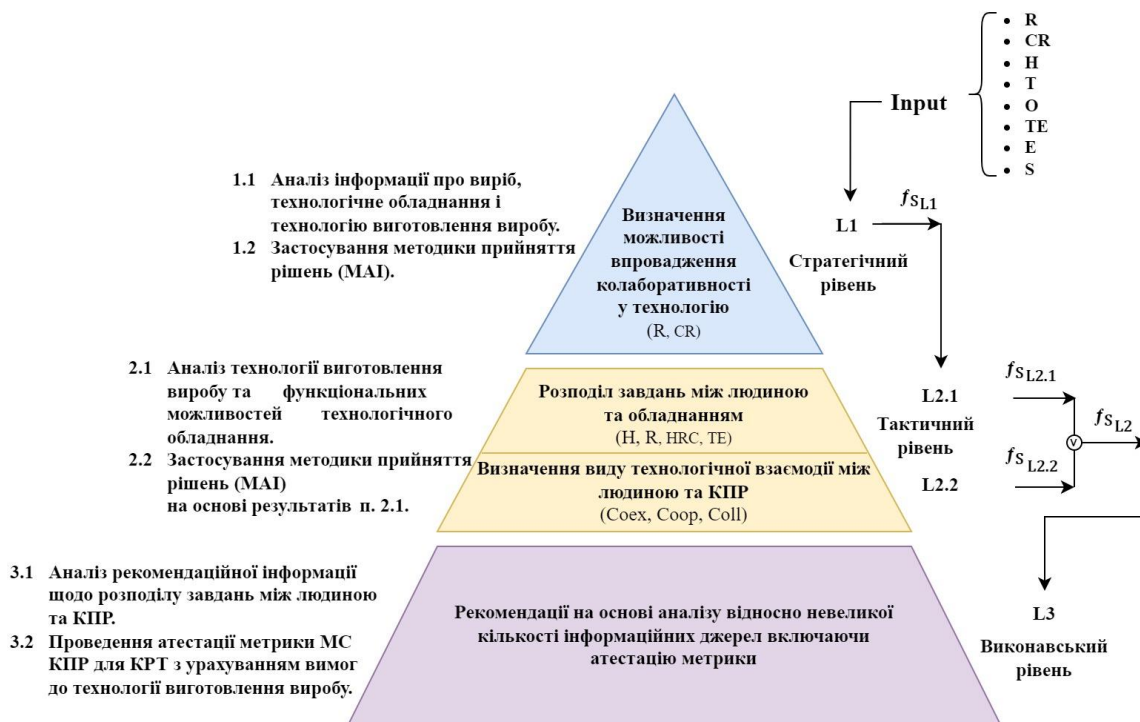


Рис. 2. Ілюстрація пропонованих рівнів взаємодії між людиною і КПП

Стратегічний рівень L1 передбачає визначення можливості впровадження КРТ у виробництво в цілому, що забезпечується аналізом вхідної інформації та застосування MAI. Вхідна інформація вміщає дані про R – ПР, CR – КПП, H – людину, T – технологію, O – об'єкт, TE – технологічне обладнання, E – множину експертів для MAI та S – множину локальних критеріїв прийняття рішень для MAI. В даному випадку за допомогою експертних оцінок досліджуваної множини локальних критеріїв (S) приймається рішення про застосування «класичних» ПР (R), або КПП (CR) в тих чи інших технологіях.

Тактичний рівень поділяється на підрівні L2.1 та L2.2. На підрівні L2.1 визначається розподіл завдань між людиною та КПП за допомогою аналізу технології виготовлення виробу, технічних характеристик та функціональних можливостей технологічного обладнання. В результаті експертного анкетування за обраними критеріями для використання MAI, де альтернативами вирішення поставленої задачі розподілу завдань в КРТ є людина (H), КПП (R), технологічне обладнання (TE) та взаємодія людина-робот (HRC).

На підрівні L2.2 визначається вид взаємодії між людиною та роботом. В даному випадку альтернативами вирішення поставленої задачі визначається видом взаємодії між людиною та роботом є співіснування (Coex), кооперація (Coop) та колаборація (Coll). Вищевказана отримана інформація з стратегічного рівня (L1) і тактичного рівня (L2.1 та L2.2) системно розглядає деякі основні питання, які виникають на початкових етапах проектування КРТ, наприклад, можливість провадження КРТ з розподілом завдань між людиною та КПП.

Найбільше досліджень та напрацювань як за кордоном, так і в Україні направлені на розв'язування задач виконавського рівня L3. Прикладом цього є напрацювання щодо визначення робочої зони ПР, яка досліджується оригінальним підходом атестації метрики маніпуляційної системи ПР [17], що може бути використана і для КПП. При цьому визначаються робочі зони ПР із збереженням орієнтації в просторі затисненого пристрою з об'єктом маніпулювання, або без об'єкту за допомогою атестації метрики

маніпуляційної системи ПР. Отримана таким чином інформація дозволяє розробити рекомендації щодо застосування КПП разом з людиною в КРТ на виконавському рівні.

Описаний пропонуваній тривірневий підхід комплексно та системно відтворює послідовність виконання операцій на кожному з рівнів, їх залежності та очікувані результати на виході з кожного рівня.

Формалізоване представлення вищевказаного тривірневого підходу за рис. 2 на високому рівні абстрагування описує змістовну інформацію кожного із рівнів пропонуваного підходу та послідовність їх виконання. Вказане формально представлено наступним чином:

$$\begin{array}{ccccccc}
 f: (\text{In}) & \rightarrow & \langle \text{R}, \text{CR} \rangle & \rightarrow & \langle \text{CR}^k \rangle & \rightarrow & \langle \text{Rec}, \text{AM ect} \rangle \\
 & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\
 & & f_{S_{L1}} & & f_{S_{L2}} & & f_{S_{L3}}
 \end{array} , \tag{1}$$

В даному випадку Input – це вхідна інформація про ПР (R), КПП (CR), людину (H), об’єкт (O), технологічне обладнання (TE), технологію виготовлення продукції (T), множину експертів (E) та множину локальних критеріїв прийняття рішень (S):

$$(\text{In}) = (\text{R}, \text{CR}, \text{H}, \text{O}, \text{TE}, \text{T}, \text{E}, \text{S}), \tag{2}$$

Ці дані використовуються як основа для прийняття рішень за допомогою МАІ та оцінок експертів щодо можливості застосування КРТ в конкретній роботизованій технології. Альтернативи для поставленої задачі визначення можливості впровадження КРТ у виробництво це R – ПР та CR – КПП у формалізованому представленні (1).

Результатом виконання функції прийняття рішень на першому рівні  $f_{S_{L1}}$  є упорядкована множина нечітких оцінок щодо переваг R та CR: тобто  $\langle \text{R}, \text{CR} \rangle$ . У випадку, коли нечітка оцінка має пріоритет щодо R, то виконуються відомі підходи та методики проектування/синтезу «класичних» роботизованих технологій, наприклад [26]. Якщо пріоритет має CR, тоді виконується перехід до рівня. Математичною основою реалізації рівня L1, тобто  $f_{S_{L1}}$ , є вищезгадані методи МАІ та НБВА. При цьому передбачено використання інформації або від одного експерта, або від їх кінцевої множини E. Останнє саме і передбачає використання НБВА.

Тактичний рівень, тобто рівень L2, системних технологічних рішень пропонується представити двома підрівнями L2.1 та L2.2, кожен з яких характеризується змістом та розв’язуванням кінцевої множини задач. Змістом підрівня L2.1 є визначення пріоритетів при розподілі завдань між людиною та обладнанням, що визначається на множині (H, R, HCR, TE). Вказані пріоритети є вхідними даними для визначення виду технологічної взаємодії між людиною та КПП. Тобто визначається нечітка оцінка між видами колаборації з наданням пріоритетів одному з них, що може бути представлено нижче наведеним кортежем:

$$\langle \text{CR}^k | k \in (\text{Coex}, \text{Coop}, \text{Coll}) \rangle. \tag{3}$$

Змістом рівня L3 є узагальнення існуючих напрацювань, наприклад, [1-20] щодо випрацювання відповідних рекомендацій для виконання та розв’язування задач цього виконавського рівня.

Системність та комплексність пропонуваного тривірневого підходу забезпечується в тому числі визначеною послідовністю процедур  $f_{S_{L1}}$ ,  $f_{S_{L2}}$  та  $f_{S_{L3}}$ , що загалом визначається нижче наведеним кортежем:

$$f = \langle f_{S_{L1}}, f_{S_{L2}}, f_{S_{L3}} \rangle, \tag{4}$$

Дана упорядкована послідовність не заперечує тривірневому пірамідальному представленню пропонуваного підходу та системно доповнює загальну картину системності. Кожен із елементів кортежу в (4) може трактуватись як такий, що системно описує відповідні функції системних технологічних рішень на кожному із рівнів пропонуваного підходу.

Таким чином розкриття сутності та залежностей для кожного з технологічних функцій  $f_{S_{L1}}$ ,  $f_{S_{L2}}$  та  $f_{S_{L3}}$  є науково-методичним обґрунтуванням початкових етапів технологічної підготовки КРТ як невід’ємної складової автоматизованої системи технологічної підготовки КРТ. Саме останнє автори розглядають як перспективний напрямок наукових досліджень.

Описаний тривірневий підхід можна трактувати як такий, що на певному рівні абстрагування комплексно та системно дозволяє розв’язувати ряд проблемних задач на початкових етапах проектування технологічної підготовки КРТ, що передбачає визначення можливості впровадження КРТ у виробництво, розподіл завдань між людиною, обладнанням, КПП або взаємодія людини та КПП та визначення виду взаємодії між людиною та КПП. В даному варіанті прийняття технологічних рішень базується на експертних оцінках при застосуванні МАІ, що дає нечітку оцінку в комплексних питаннях, на які на разі одностайних рішень та відповідей не існує не тільки у дослідників з України, але й у дослідників всього світу.

Вищевказане акцентує актуальність та перспективність подібних досліджень та науково-практичну важливість отримуваних напрацювань в сфері такої відносно молоді галузі промислової робототехніки, якою є колаборативна робототехніка.

### Висновки

В роботі проведено стислий аналіз доступних інформаційних джерел щодо застосування колаборативної робототехніки та її проблемних науково-виробничих питань, який вказав на актуальність, важливість та перспективність КРТ.

На основі вищевказаного аналізу інформаційних джерел попередніх досліджень і напрацювань авторами цієї статті запропоновано трирівневий підхід реалізації початкових етапів проектування КРТ машино- та приладобудування, що комплексно враховує сутність колаборативних технологій, конструктивно-технологічні особливості КТР, конструктивно-технологічні властивості об'єктів виробництва. Даний підхід системно та комплексно розглядає та вирішує питання можливості застосування КТР на виробництві, розподілу завдань між людиною та КТР, визначення виду взаємодії людина-КТР тощо.

Висвітлено пропонуваній підхід щодо системного прийняття технологічних рішень при формалізації вирішенні таких важливих для колаборативної робототехніки проблем як задачі нечіткої багатокритеріальної оптимізації, що розв'язується з комплексним використанням методів аналізу ієрархій (МАІ) та нечіткого багатокритеріального вибору альтернатив (НБВА).

Вищевказане має особливу цінність в контексті того, що розглядається авторами як основна, або базова інформація, яка використовується на початкових етапах проектування КРТ і тому є необхідною складовою технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв машино- та приладобудування.

### Література

1. The International Federation of Robotics. Market presentation World Robotics – 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ifr.org/freedownloads/>
2. Aydin Azizi, "Applications of Artificial Intelligence Techniques to Enhance Sustainability of Industry 4.0: Design of an Artificial Neural Network Model as Dynamic Behavior Optimizer of Robotic Arms", Complexity, vol. 2020, Article ID 8564140, 10 pages, 2020. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8564140>
3. Grau, M. Indri, L. Lo Bello and T. Sauter, "Robots in Industry: The Past, Present, and Future of a Growing Collaboration With Humans," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 15, no. 1, pp. 50-61, March 2021, . – DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.3008136>.
4. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Парадигма розвитку роботизованих колаборативних технологій. Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційно-комп'ютерні технології - 2023", 30-31 березня 2023 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/198.pdf>
5. K. H. Tantawi, A. Sokolov and O. Tantawi, "Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration," 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 1-4, – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIMES-iCON47539.2019.9024658>.
6. Li Liu, Fu Guo, Zishuai Zou & Vincent G. Duffy (2022) Application, Development and Future Opportunities of Collaborative Robots (Cobots) in Manufacturing: A Literature Review, International Journal of Human-Computer Interaction, – DOI: <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2041907>
7. Vismanis O, Arents J, Freivalds K, Ahluwalia V, Ozols K. Robotic System for Post Office Package Handling. Applied Sciences. 2023; 13(13):7643. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137643>
8. Michal Bartoš, Vladimír Bulej, Martin Bohušik, Ján Stanček, Vitalii Ivanov, Peter Macek, An overview of robot applications in automotive industry, Transportation Research Procedia, Volume 55, 2021, Pages 837-844, ISSN 2352-1465, – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.052>.
9. R. Accorsi, A. Tufano, A. Gallo, F.G. Galizia, G. Cocchi, M. Ronzoni, A. Abbate, R. Manzini, An application of collaborative robots in a food production facility, Procedia Manufacturing, Volume 38, 2019, Pages 341-348, ISSN 2351-9789, – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.044>.
10. Michela Dalle Mura, Gino Dini, Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach, CIRP Annals, Volume 68, Issue 1, 2019, Pages 1-4, ISSN 0007-8506, – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.006>.
11. Evjemo, L.D., Gjerstad, T., Grøtli, E.I. et al. Trends in Smart Manufacturing: Role of Humans and Industrial Robots in Smart Factories. Curr Robot Rep 1, 35–41 (2020). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00006-5>
12. Li, W., Hu, Y., Zhou, Y. et al. Safe human-robot collaboration for industrial settings: a survey. J Intell Manuf (2023). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02159-4>
13. Кирилович В.А., Мельничук П.П., Кравчук А.Р., Яновський В.А. Термінологічний та змістовний аспекти колаборативної робототехніки: аналіз та рекомендації. Державний університет "Житомирська політехніка". Технічна інженерія. 2022. №2 (90). С. 13-22. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ten.ztu.edu.ua/article/view/268008>
14. Kyrylovych V.A., Kravchuk A.R., Dimitrov L.V., Melnychuk P.P., Mohelnytska L.F. System and Structural Approach to Interaction of Components in Collaborative Flexible Production Systems. Proceedings of the Technical University of Sofia. Vol. 72, No. 3, 2022. P. 10-14. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://proceedings.tu-sofia.bg/>

15. В.А. Кирилович, А.Р. Кравчук, Проблеми промислової колаборативної робототехніки в гнучких механоскладальних виробництвах. Тези Всеукраїнської науково-практичної он-лайн конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки 16–20, 26 травня 2022 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/konferentsiya-prysvyachena-dnyu-nauky-16-20-26-travnya-2022-r/>

16. Кирилович В.А., Кравчук А.Р., «Проблеми розподілу завдань між людиною та роботом у колаборативних механоскладальних технологіях», тези конференції, Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 15, 26 травня 2023 року. Житомир : "Житомирська політехніка", 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/3-tendentsiyi-rozvytku-tekhnologiy-v-avtomatyzatsiyi.pdf>

17. Kyrylovych, V., Kravchuk, A., Melnychuk, P., Mohelnyska, L. (2021). Automated Attestation of Metrics for Industrial Robots' Manipulation Systems. In: Tonkonogyi, V., et al. Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_79](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_79)

18. Кравчук, А. Р. Аналіз мовної складової в програмних продуктах колаборативної робототехніки для вирішення технологічних завдань. Технічна інженерія, (2023). (1(91)), 50–56. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-50-56](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-50-56)

19. Wilhelm Bauer, Manfred Bender, Martin Braun, Peter Rally, Oliver Scholtz, Lightweight robots in manual assembly – best to start simply! Examining companies' initial experiences with lightweight robots. (2016). [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

[https://www.researchgate.net/publication/327744724\\_Lightweight\\_robots\\_in\\_manual\\_assembly\\_-\\_best\\_to\\_start\\_simply\\_Examining\\_companies'\\_initial\\_experiences\\_with\\_lightweight\\_robots](https://www.researchgate.net/publication/327744724_Lightweight_robots_in_manual_assembly_-_best_to_start_simply_Examining_companies'_initial_experiences_with_lightweight_robots)

20. The International Federation of Robotics. Positioning Paper. Demystifying Collaborative Industrial Robots 2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://web.archive.org/web/20190823143255/https://ifr.org/downloads/papers/IFR\\_Demystifying\\_Collaborative\\_Robots.pdf](https://web.archive.org/web/20190823143255/https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf)

21. Yamaguchi, K., Inaba, K. (2023). Intelligent and Collaborative Robots. In: Nof, S.Y. (eds) Springer Handbook of Automation. Springer Handbooks. Springer, Cham. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96729-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96729-1_15)

22. Dong, J., Kang, D., Nam, SW. (2023). Development of Interactive Teaching Device for Difficult Teaching of Collaborative Robot. In: Stephanidis, C., Antona, M., Ntoa, S., Salvendy, G. (eds) HCI International 2023 Posters. HCII 2023. Communications in Computer and Information Science, vol 1834. Springer, Cham. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35998-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35998-9_8)

23. Saaty, Thomas L. Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World (1982). Belmont, California: Wadsworth. ISBN 0-534-97959-9; Paperback, Pittsburgh: RWS. ISBN 0-9620317-0-4. «Focuses on practical application of the AHP; briefly covers theory.»

24. Steuer R.E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application. — New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986.

25. Edwin Mauricio, Martinez, Pedro Ponce, Israel Macias, Arturo Molina, “Automation Pyramid as Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study: A Didactic Manufacturing System”, Sensors, Volume 21, Issue 14, 7 July 2021, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4656/html>

26. Кирилович В.А. Автоматизований синтез роботизованих механоскладальних технологій: автореф. дис. д-ра. техн. наук: 05.02.08 – «Технологія машинобудування». В.А. Кирилович. — Київ, 2015. — 48 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://rada.kpi.ua/files/aref\\_Kyrylovych\\_V.A.pdf](http://rada.kpi.ua/files/aref_Kyrylovych_V.A.pdf)

## References

1. The International Federation of Robotics. Market presentation World Robotics – 2022. [[Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://ifr.org/freedownloads/>

2. Aydin Azizi, "Applications of Artificial Intelligence Techniques to Enhance Sustainability of Industry 4.0: Design of an Artificial Neural Network Model as Dynamic Behavior Optimizer of Robotic Arms", Complexity, vol. 2020, Article ID 8564140, 10 pages, 2020. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8564140>

3. Grau, M. Indri, L. Lo Bello and T. Sauter, "Robots in Industry: The Past, Present, and Future of a Growing Collaboration With Humans," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 15, no. 1, pp. 50–61, March 2021, . – DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.3008136>.

4. Kyrylovych V.A., Kravchuk A.R. Paradyhma rozvytku robotyzovanykh kolaboratyvnykh tekhnologiy. Tezy dopovidei KhIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Informatsiino-kompiuterni tekhnologii - 2023", 30-31 bereznia 2023 roku. Zhytomyr: «Zhytomyrska politekhnika», 2023. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/198.pdf>

5. K. H. Tantawi, A. Sokolov and O. Tantawi, "Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration," 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-ICON), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 1-4, – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIMES-ICON47539.2019.9024658>.

6. Li Liu, Fu Guo, Zishuai Zou & Vincent G. Duffy (2022) Application, Development and Future Opportunities of Collaborative Robots (Cobots) in Manufacturing: A Literature Review, International Journal of Human-Computer Interaction, – DOI: <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2041907>

7. Vismanis O, Arents J, Freivalds K, Ahluwalia V, Ozols K. Robotic System for Post Office Package Handling. Applied Sciences. 2023; 13(13):7643. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137643>

8. Michal Bartoš, Vladimír Bulej, Martin Bohušík, Ján Stanček, Vitalii Ivanov, Peter Macek, An overview of robot applications in automotive industry, Transportation Research Procedia, Volume 55, 2021, Pages 837-844, ISSN 2352-1465, – DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.052>.

9. R. Accorsi, A. Tufano, A. Gallo, F.G. Galizia, G. Cocchi, M. Ronzoni, A. Abbate, R. Manzini, An application of collaborative robots in a food production facility, *Procedia Manufacturing*, Volume 38, 2019, Pages 341-348, ISSN 2351-9789, – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.044>.

10. Michela Dalle Mura, Gino Dini, Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach, *CIRP Annals*, Volume 68, Issue 1, 2019, Pages 1-4, ISSN 0007-8506, – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.006>.

11. Evjemo, L.D., Gjerstad, T., Grøtli, E.I. et al. Trends in Smart Manufacturing: Role of Humans and Industrial Robots in Smart Factories. *Curr Robot Rep* 1, 35–41 (2020). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00006-5>

12. Li, W., Hu, Y., Zhou, Y. et al. Safe human–robot collaboration for industrial settings: a survey. *J Intell Manuf* (2023). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02159-4>

13. Kyrylovych V.A., Melnychuk P.P., Kravchuk A.R., Yanovskyi V.A. Terminolohichniy ta zmistovnyi aspekty kolaboratyvnoi robototekhniki: analiz ta rekomendatsii. *Derzhavnyi universytet "Zhytomyrska politekhnika". Tekhnichna inzheneria*. 2022. №2 (90). S. 13-22. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://ten.ztu.edu.ua/article/view/268008>

14. Kyrylovych V.A., Kravchuk A.R., Dimitrov L.V., Melnychuk P.P., Mohelnytska L.F. System and Structural Approach to Interaction of Components in Collaborative Flexible Production Systems. *Proceedings of the Technical University of Sofia*. Vol. 72, No. 3, 2022. P. 10-14. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://proceedings.tu-sofia.bg/>

15. V.A. Kyrylovych, A.R. Kravchuk, Problemy promyslovoi kolaboratyvnoi robototekhniki v hnuchkykh mekhanoskladalnykh vyrobnystvakh. Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, prysviachenoj Dniu nauky 16–20, 26 travnia 2022 r. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/konferentsiya-prysvyachena-dnyu-nauky-16-20-26-travnja-2022-r/>

16. Kyrylovych V.A., Kravchuk A.R., «Problemy rozpodilu zavdan mizh liudynoiu ta robotom u kolaboratyvnykh mekhanoskladalnykh tekhnolohiiakh», tezy konferentsii, Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi onlain-konferentsii vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, prysviachenoj Dniu nauky, 15, 26 travnia 2023 roku. Zhytomyr : "Zhytomyrska politekhnika", 2023. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/3-tendentsiyi-rozvytku-tekhnohii-v-avtomatyzatsiyi.pdf>

17. Kyrylovych, V., Kravchuk, A., Melnychuk, P., Mohelnytska, L. (2021). Automated Attestation of Metrics for Industrial Robots' Manipulation Systems. In: Tonkonogyi, V., et al. *Advanced Manufacturing Processes II*. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_79](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_79)

18. Kravchuk, A. R. Analiz movnoi skladovoi v prohramnykh produktakh kolaboratyvnoi robototekhniki dlia vyrishennia tekhnolohichnykh zavdan. *Tekhnichna inzheneria*, (2023). (1(91)), 50–56. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-50-56](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-50-56)

19. Wilhelm Bauer, Manfred Bender, Martin Braun, Peter Rally, Oliver Scholtz, Lightweight robots in manual assembly – best to start simply! Examining companies' initial experiences with lightweight robots. (2016). [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: [https://www.researchgate.net/publication/327744724\\_Lightweight\\_robots\\_in\\_manual\\_assembly\\_-\\_best\\_to\\_start\\_simply\\_Examining\\_companies'\\_initial\\_experiences\\_with\\_lightweight\\_robots](https://www.researchgate.net/publication/327744724_Lightweight_robots_in_manual_assembly_-_best_to_start_simply_Examining_companies'_initial_experiences_with_lightweight_robots)

20. The International Federation of Robotics. Positioning Paper. Demystifying Collaborative Industrial Robots 2018 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: [https://web.archive.org/web/20190823143255/https://ifr.org/downloads/papers/IFR\\_Demystifying\\_Collaborative\\_Robots.pdf](https://web.archive.org/web/20190823143255/https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf)

21. Yamaguchi, K., Inaba, K. (2023). Intelligent and Collaborative Robots. In: Nof, S.Y. (eds) *Springer Handbook of Automation*. Springer Handbooks. Springer, Cham. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96729-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96729-1_15)

22. Dong, J., Kang, D., Nam, SW. (2023). Development of Interactive Teaching Device for Difficult Teaching of Collaborative Robot. In: Stephanidis, C., Antona, M., Ntoa, S., Salvendy, G. (eds) *HCI International 2023 Posters*. HCII 2023. Communications in Computer and Information Science, vol 1834. Springer, Cham. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35998-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35998-9_8)

23. Saaty, Thomas L. *Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World* (1982). Belmont, California: Wadsworth. ISBN 0-534-97959-9; Paperback, Pittsburgh: RWS. ISBN 0-9620317-0-4. «Focuses on practical application of the AHP; briefly covers theory.»

24. Steuer R.E. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application*. — NewYork: John Wiley & Sons, Inc., 1986.

25. Edwin Mauricio, Martinez, Pedro Ponce, Israel Macias, Arturo Molina, "Automation Pyramid as Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study: A Didactic Manufacturing System", *Sensors*, Volume 21, Issue 14, 7 July 2021, [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4656/htm>

26. Kyrylovych V.A. Avtomatyzovanyi syntez robotyzovanykh mekhanoskladalnykh tekhnolohii: avtoref. dys. d-ra. tekhn. nauk: 05.02.08 – «Tekhnolohiiia mashynobuduvannia». V.A. Kyrylovych. — Kyiv, 2015. — 48 s. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: [http://rada.kpi.ua/files/aref\\_Kyrylovych\\_V.A.pdf](http://rada.kpi.ua/files/aref_Kyrylovych_V.A.pdf)