

Кирилович В.А.  
Кравчук А.Р.  
Добржанський О.О.

**СИСТЕМОЛОГІЯ  
АВАНПРОЄКТУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИХ  
РОБОТИЗОВАНИХ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ**

Монографія

**КИЇВ \* НОВА ДУМКА \* 2026**

УДК 621.865.8  
С 34

Друкується за рішенням Вченої ради  
Державного університету “Житомирська політехніка”,  
протокол № 15 від 29.08.2025

РЕЦЕНЗЕНТИ: **Пасічник Віталій Анатолійович**, доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри конструювання машин,  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

**Пальчевський Богдан Олексійович**, доктор технічних наук,  
професор, професор кафедри автоматизації та комп’ютерно-  
інтегрованих технологій, Луцький Національний технічний  
університет, Відмінник освіти України,  
Заслужений діяч науки і техніки України

**Марушак Павло Орестович**, доктор технічних наук, професор,  
проректор з наукової роботи, Тернопільський Національний  
технічний університет імені Івана Пулюя

**Кирилович В.А., Кравчук А.Р., Добржанський О.О.**  
С34 Системологія аванпроекування колаборативних роботизованих  
механоскладальних технологій; за заг. ред В.А. Кириловича. Монографія.  
– Київ : ТОВ «Наукове видавництво "Нова думка"», 2026 – 168 с.

ISBN 978-617-8816-48-3

Дана робота є першим в Україні дослідженням, в якому комплексно та системно, з інтегрованим охопленням множини принципів та процедур системного підходу, яке загалом являє собою системологію, розглядаються питання початкових етапів проектування, що названо аванпроекуванням, колаборативних роботизованих механоскладальних технологій (КРМСТ). Останні реалізуються засобами колаборативних промислових роботів (КПР). Колаборація при цьому передбачає певну технологічну взаємодію людини та КПР. Аванпроекування реалізується запропонованим та методично обумовленим триетапним підходом. При цьому використовується метод аналізу ієрархій (МАІ), оригінальний програмний продукт FMCSA та авторська методика атестації маніпуляційних систем аналізованих КПР/ПР. Працездатність підходу проілюстрована на прикладі складання реального технічного вузла.

Дане дослідження може бути корисним науковцям, викладачам, аспірантам, студентам та інженерно-технічним працівникам, що займаються проблемами КРМСТ.

УДК 621.865.8

© В.А. Кирилович, 2026

© А.Р. Кравчук, 2026

© О.О. Добржанський, 2026

© ТОВ «Наукове видавництво  
"Нова думка"», видання, 2026

ISBN 978-617-8816-48-3

## Від авторів

*Немає нічого, на що б не дерзнуло людство.*  
Луcretій Кар Тит

Шановні читачі, всі, хто цікавиться промисловою робототехнікою взагалі та колаборативною промисловою робототехнікою особливо. Якщо ви тримаєте в руках дане дослідження, то це є свідченням того, що ви таки не байдужі до такого відносно нового напрямку сучасної автоматизації методами роботизації, яким є колаборативна робототехніка, і серйозно в цьому зацікавлені. Адже це дослідження є першим цілісним та комплексним, хоча і далеко не повним, дослідженням, що вперше виконано в Україні.

Як показує сучасна практика проектування та експлуатації різногалузевих роботизованих виробництв, на сьогодні суттєву роль відіграє на перший прогляд незвична технологічна система, а саме технологічна система *людина-робот*. Ця технологічна система визначена парадигмою розвитку колаборативних роботизованих механоскладальних технологій, для якої на відміну від всім відомих малолюдних гнучких (це значить роботизованих) технологій, характерним є збільшення ролі саме людини в процесі реалізації роботизованих технологій. Взаємодія між людиною та роботом в процесі виконання певних технологічних операцій і є основою колаборативних технологій та виробництв як таких.

Загалом цілісних системних, комплексних та науково обґрунтованих досліджень в сфері колаборативної робототехніки на сьогодні фактично не існує ні в Європі, ні в світі. В той же час часткові рішення щодо реалізації конкретних технологічних операцій, в основному складальних, мають місце. Рівно як і мають місце їх впровадження. Їх характерною особливістю є фрагментарність та частковість щодо системності та комплексності, що виконані на тлі фактичної відсутності науково обґрунтованих основ проектування/синтезу колаборативних роботизованих механоскладальних технологій.

Очевидним є те, що існуючі в основному практичні напрацювання в даній галузі підлягають глибокому та всебічному аналізу, виявленню, узагальненню та формалізації загальних закономірностей щодо генерування підходів, розробки теоретичних основ колаборативної робототехніки та проектування/синтезу колаборативних роботизованих механоскладальних технологій на їх основі. Тим паче, що колаборативні промислові роботи випускаються фірмами-виробниками вже не один рік.

В зв'язку з цим має місце певна невідповідність з однієї сторони між наявністю колаборативних промислових роботів та з іншої – відсутністю наукових основ проектування/синтезу колаборативних роботизованих механоскладальних технологій на їх (колаборативних промислових роботів) основі. Часткова, а в ідеалі повна, ліквідація вказаної невідповідності суттєво підвищить обґрунтованість та доцільність використання, а також підвищить ефективність впровадження та експлуатацію колаборативних роботизованих механоскладальних виробництв.

Змістовно дане дослідження є першою спробою щодо розробки теоретичних основ проектування колаборативних технологій саме на перших етапах такої розробки.

Автори вдячні усім, хто тією чи іншою мірою був, є та буде причетним до перспективних напрямків наявних та майбутніх досліджень в даній галузі автоматизації.

Особливу подяку автори висловлюють рецензентам *Пасічнику Віталію Анатолійовичу*, д.т.н., професору Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", *Пальчевському Богдану Олексійовичу*, доктору технічних наук, професору Луцького Національного технічного університету, *Маруцаку Павлу Орестовичу*, д.т.н., професору, проректору з наукової роботи Тернопільського Національного технічного університету ім. Івана Пулюя за кваліфіковану підтримку авторів при обговоренні змісту, форми подання матеріалу та видання рукопису даного дослідження.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
Перелік прийнятих скорочень .....	10
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОЛАБОРАТИВНИХ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....</b>	<b>11</b>
1.1. Аналіз сучасного стану розвитку колаборативних роботизованих технологій при технологічній підготовці роботизованих виробництв .....	11
1.1.1. Зміст, структура та місце колаборативних систем у промислових технологічних задачах та їх застосування .....	11
1.1.2. Прояви колаборативних технологій в різних галузях виробництв .....	17
1.1.3. Компоненти та структура технологічної підготовки роботизованих виробництв .....	19
1.1.4. Місце колаборативних роботизованих технологій в технологічній підготовці роботизованих виробництв .....	20
1.1.5. Аналіз інформаційних джерел щодо атестації метрики .....	26
1.2. Парадигма розвитку роботизованих технологій .....	30
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КОЛАБОРАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ РОБОТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ ЛЮДИНА-РОБОТ .....</b>	<b>34</b>
2.1. Загальне системне представлення послідовності розв'язування завдань .....	34
2.1.1. Пропонована багаторівнева схема системного підходу при аванпроектванні колаборативних роботизованих технологій .....	34
2.1.2. SADT-представлення загальної послідовності розв'язуваних завдань .....	42
2.2. Методика проведення експертного опитування методу МАІ для пропонованого трирівневого підходу .....	52
2.2.1. Загальні положення .....	52
2.2.2. Використання МАІ при аванпроектванні КРМСТ .....	54
2.3. Стисла методика використання НБВА .....	59
2.4. Розроблені методики атестації метрики маніпуляційних систем колаборативних промислових роботів .....	59
2.4.1. Загальні положення .....	59
2.4.2. Опис процедури атестації метрики маніпуляційних систем ПР/КПР з використанням програмних продуктів_RoboDK та SolidWork .....	65

**РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ  
КОЛАБОРАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ РОБОТИЗОВАНІЙ  
СИСТЕМІ ЛЮДИНА-РОБОТ**..... 75

3.1. Інформаційний базис розв’язування задач в технологічній колаборативній системі людина-робот.....	75
3.2. Методичне забезпечення як постійна складова інформаційного базису пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ .....	76
3.3. Змінна складова інформаційного базису пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ .....	78
3.4. Інформаційне забезпечення атестації метрики маніпуляційних систем КПП.....	80
3.5. Інформаційне забезпечення щодо рекомендаційної складової реалізації КРТ .....	81

**РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНЕ  
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ  
АВАНПРОЄКТУВАННІ КРМСТ** ..... 86

4.1. Алгоритмічне забезпечення пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ .....	86
4.1.1. Алгоритм прийняття рішень на основі МАІ .....	86
4.1.1.1. Стислий алгоритм роботи МАІ прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні КРМСТ .....	86
4.1.1.2. Узагальнений алгоритм роботи МАІ прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні КРМСТ .....	88
4.1.2. Узагальнений алгоритм НБВА при аванпроектуванні КРМСТ .....	96
4.1.3. Узагальнений алгоритм атестації метрики МС КПП .....	98
4.2. Програмне забезпечення реалізації пропонованого підходу .....	101
4.2.1. Програмна реалізація МАІ.....	101
4.2.2. Програмна реалізація НБВА .....	104
4.2.3. Програмна реалізація атестації метрики ПР та КПП .....	104
4.3. Перевірка працездатності функціонування пропонованої багаторівневої системи початкового проекткування КРМСТ .....	108
4.3.1. Загальне тлумачення отримуваних результатів МАІ .....	108
4.3.2. Загальне тлумачення отримуваних результатів при застосуванні НБВА .....	110

4.3.3. Результати застосування МАІ для пропонуваного тривісного підходу аванпроекування КРТ .....	117
4.3.4. Результати застосування атестації метрики для пропонуваного тривісного підходу при аванпроекуванні КРТ .....	123
4.3.4.1. Атестація метрики з використанням RoboDK та SolidWork .....	123
4.3.4.2. Автоматизована атестація метрики з використанням Matlab та CoppeliaSim та інтерпретація отриманих результатів .....	141
4.3.4.3. Особливості автоматизованої атестації метрики з використанням програмного продукту CoppeliaSim .....	147
4.3.4.3.1. Завантаження та розміщення моделі аналізованого КТР/ПР .....	147
4.3.4.3.2. Початкове налаштування моделі ПР .....	149
4.3.4.3.3. Складання скрипта програми на мові Lua .....	151
4.3.4.3.4. Безпосереднє виконання моделювання.....	154
<b>НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>158</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>159</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ....</b>	<b>161</b>

## ВСТУП

Зміст даного монографічного дослідження викладено у чотирьох розділах, в яких представлені мета, завдання та його основні наукові та практичні результати.

*Метою даного дослідження є підвищення ефективності роботизованих механоскладальних виробництв (РМСВ), що містять колаборативні промислові роботи (КПР), за рахунок підвищення обґрунтованості прийняття системних технологічних рішень, які базуються на розробці багаторівневого підходу початкових етапів проєктування (аванпроєктування) колаборативних роботизованих механоскладальних технологій (КРМСТ), інформаційно-методичному та алгоритмічно-програмному забезпеченні його (підходу) реалізації як складової технологічної підготовки (ТПг) колаборативних РМСВ (КРМСТ).*

Досягнення мети передбачає розв'язання наступних завдань:

1. Провести аналіз сутності та стану напрацювань щодо змісту та прояву КРМСТ.
2. Запропонувати багаторівневий підхід аванпроєктування КРМСТ, що системно враховує сутність колаборації, представлену парадигму розвитку колаборативних роботизованих технологій (КРТ) та конструктивно-технологічні особливості об'єктів виробництва.
3. Розробити інформаційно-методичне та алгоритмічно-програмне забезпечення, що реалізує запропонований багаторівневий підхід при аванпроєктуванні КРМСТ.
4. Запропонувати формалізоване представлення розробленого тривірневого підходу до ТПг КРМСВ, що системно відтворює його (підходу) структуру, зміст та особливості технологічної колаборації в роботизованих технологіях.
5. Розробити та програмно реалізувати алгоритм процедури атестації метрики КПР як складової ТПг КРМСТ та проілюструвати її (атестації) сутність.
6. Продемонструвати працездатність запропонованого тривірневого підходу при аванпроєктуванні КРМСВ на прикладі складання реального механічного вузла.
7. Впровадити результати досліджень у виробництво та навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка».

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та вказано поставлені завдання, описано методи дослідження, представлено інформацію про наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У *першому* розділі проведено аналіз сучасного стану колаборативних роботизованих технологій. Проаналізовано доступні інформаційні джерела щодо застосування колаборативних роботизованих технологій у виробництві. Висвітлено парадигму розвитку роботизованих технологій в частині їх переходу від «класичних» технологій до колаборативних.

У *другому* розділі розроблено методичне забезпечення системи визначення рівня колаборації у технологічних роботизованих системах людина-робот у вигляді трирівневого підходу, який складається з стратегічного рівня L1, тактичного рівня L2 і виконавського рівня L3. Пропонований трирівневий підхід описано за допомогою формалізованого представлення та SADT-діаграм, які подані відповідно в розділі 2 та розділі 3. Вказані алгоритми висвітлюють реалізацію стратегічного рівня L1, тактичного рівня L2 та виконавського рівня L3.

Висвітлено узагальнений алгоритм роботи МАІ для прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні колаборативних роботизованих механоскладальних технологій на основі існуючих методичних напрацювань, висвітлених в п. 2.2.1.

На базі запропонованого методичного забезпечення, описаного в розділі 2, висвітлено загальний алгоритм процесу атестації метрики маніпуляційної системи колаборативних промислових роботів як змістовної та необхідної складової реалізації виконавського рівня L3.

В даній роботі отримано наступні нові *наукові результати* дослідження:

- вперше з єдиних системних позицій запропоновано багаторівневий підхід реалізації початкових етапів проектування (аванпроекткування) КРМСТ машино- та приладобудування, що комплексно враховує сутність колаборативних технологій, конструктивно-технологічні особливості КІР, конструктивно-технологічні властивості об'єктів виробництва;

- набула подальшого розвитку процедура системного прийняття технологічних рішень при визначенні завдань КРТ як задач нечіткої багатокритеріальної оптимізації, що розв'язується з комплексним використанням методів аналізу ієрархій (МАІ) та нечіткого багатокритеріального вибору альтернатив (НБВА);

- вперше розроблено новий підхід щодо дослідження технологічних можливостей ПР/КІР за рахунок розробки та проведення автоматизованої атестації метрики МС ПР/КІР як невід'ємної складової ТПг КРМСВ, що підвищує ефективність та зменшує трудомісткість її (ТПг) виконання при проектуванні нових та/або модернізації існуючих гнучких виробничих комірок (ГВК) машино- та приладобудування, в тому числі з використанням КІР.

*Практична значимість* отриманих результатів визначається наступним:

– розроблено підхід, що може бути використаний в реальних виробничих умовах при розв'язуванні задач проектування КРМСТ на їх початкових етапах, який рекомендовано до використання в ГВК машино- та приладобудування, в тому числі з використанням КІР;

– розроблено інженерні методики реалізації процесу автоматизованої атестації ПР та КІР, що придатні до використання при ТПГ РМСВ, включаючи КРМСВ.

## Перелік прийнятих скорочень

Ас ТПг КРМСВ	– автоматизована система технологічної підготовки колаборативних роботизованих механоскладальних виробництв
ЗТО	– засоби технологічного оснащення
ГВК	– гнучка виробнича комірка
ГВС	– гнучка виробнича система
ЗП	– затискний пристрій
КПР	– колаборативний промисловий робот
КР	– колаборативна робототехніка
КРМСВ	– колаборативне роботизоване механоскладальне виробництво
КРМСТ	– колаборативна роботизована механоскладальна технологія
КТС	– колаборативна технологічна система
МАІ	– метод аналізу ієрархій
МС	– маніпуляційна система
НБВА	– нечіткий багатокритеріальний вибір альтернатив
ПР	– промисловий робот
ПП	– програмний продукт
РЗ	– робоча зона
РТК	– роботизований технологічний комплекс
СУ (СК)	– система управління (система керування)
ТПг	– технологічна підготовка
ТРК	– технологічний роботизований комплект
ТСС	– технологічна схема складання
ЧПУ (К)	– числове програмне управління (керування)
АНР	– Analytic Hierarchy Process (укр. МАІ)
Coexistence	– співіснування
Cooperation	– співпраця
Collaboration	– колаборація
FMCSA	– Fuzzy Multi-Criteria Selection of Alternatives
Robot Workspace	– робочий простір робота
SADT	– Structured Analysis and Design Technique
Synchronization	– синхронізація
Worker Workspace	– робочий простір працівника

# **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОЛАБОРАТИВНИХ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

## **1.1. Аналіз сучасного стану розвитку колаборативних роботизованих технологій при технологічній підготовці роботизованих виробництв**

### **1.1.1. Зміст, структура та місце колаборативних систем у промислових технологічних задачах та їх застосування**

Сучасні автоматизовані виробництва забезпечують високу продуктивність, гнучкість та безпеку, які частково забезпечуються прогресивними роботизованими технологіями, що набули широкого розвитку та застосування у різногалузевих виробництвах. Технічний розвиток призвів до появи різних напрямків робототехніки, один з яких відомий як колаборативна робототехніка, що є технологічним продовженням так званої «класичної» (традиційної) промислової робототехніки.

Колаборативна робототехніка – це частина робототехніки, яка вивчає, досліджує та практикує застосування колаборативних промислових роботів (КПР) у взаємодії (колаборації) з людиною при виконанні різноманітних технологічних операцій, переходів тощо [3]. Дана частина робототехніки спрямовує сучасні напрацювання і технології з автоматизації, програмування, мехатроніки, штучного інтелекту тощо на реалізацію колаборативності, а саме взаємодію людина та робота, яка забезпечує виконання конкретних виробничих та невиробничих технологічних завдань. Предметом досліджень даного напрямку робототехніки є колаборативні роботи в різних сферах застосування, в тому числі і в промисловості.

Колаборативний промисловий робот (КПР) також відомий як кобот (cobot) – це вид ПР, який призначений для взаємодії та виконання спільних технологічних операцій з людиною за рахунок його функціональних, апаратних та програмних можливостей [4]. Конструктивно КПР не відрізняється від сучасних ПР, наприклад, рух ланок маніпуляційної системи КПР забезпечується електромеханічними системами, як і в ПР. Різниця ПР та КПР полягає у функціональних можливостях останнього. КПР оснащений спеціальними датчиками та системами безпеки, які дозволяють сприймати та аналізувати оточуюче середовище, та реагувати на зовнішні чинники, наприклад, на дії та/або присутність людини. Вищевказане забезпечується різними технічними рішеннями, наприклад, апаратними комбінаціями з оптичних, звукових, електромагнітних, механічних датчиків, які дають змогу системі керування КПР розпізнавати оточення та мінімізувати ризики аварійних ситуацій, в тому числі нештатні ситуації спричинені людьми.

Забезпечення колаборативної функціональності КПП реалізується поєднанням апаратних та програмних складових, які тонко налаштовані один під одного. Одне з найпоширеніших апаратних технічних рішень для забезпечення функціональності КПП є використання різноманітних оптичних сенсорних систем, починаючи від інфрачервоних сенсорів наявності об'єктів в зоні досяжності КПП, закінчуючи оптичними системами з декількох камер високої роздільної здатності, які розпізнають компоненти навколишнього технологічного середовища, включаючи людей та їх рухи, за допомогою технічного зору та штучного інтелекту.

Інший поширений підхід забезпечення колаборативності є використання електромагнітних сенсорів в обмотках електромеханічних системах КПП, а саме в електроприводах, які вимірюють струми, напруги та потужності на обмотках приводів КПП, що дає змогу визначити наявність зовнішніх дій та/або колізій КПП із/без об'єктом маніпулювання в затиску пристрої КПП.

Вищевказані технічні рішення для забезпечення колаборативної функціональності КПП забезпечуються сучасними системами керування ПР та КПП, які базуються на розвинутих мовах програмування та відповідному програмному забезпеченні, а також використовують напрацювання зі сфери штучного інтелекту. На сьогодні розвинуті мови програмування високого рівня, а саме, C++, Java та Python забезпечують паралельну обробку великих масивів вхідних сигналів з датчиків та інших пристроїв для подальшого керування ланками маніпуляційної системи КПП. Зазвичай алгоритми забезпечують реакцію системи керування на так звані «події», або при перевищенні порогів допустимих значень з вхідних даних, проте використання сучасних технологій на кшталт штучного інтелекту та технічного зору. Таке гнучке керування збільшує варіативність поведінки КПП у різних нормальних та аварійних ситуаціях, починаючи від простої зупинки роботи КПП, закінчуючи уповільненням руху ланок маніпуляційної системи КПП та її обминанням виявлених потенційних перепон, наприклад, людини, компонентів технологічного обладнання, що динамічно рухаються та непередбачувано з'являються в робочій зоні ПР і є потенційною небезпекою як для людини, так і для технічних компонентів когнітивної робототехнічної системи тощо.

Найвідомішими представниками КПП є моделі лінійки UR компанії Universal Robots [5], моделі YuMi, GoFa та SWIFTI компанії ABB [6], модельний ряд CR компанії FANUC [7], моделі LBR iisy, KMR iisy, KMR iiwa та LBR Med компанії KUKA [8] тощо.



а) б)  
*Рис. 1.1 – Приклади КПП моделей:  
а) Universal Robots UR16e;  
б) ABB YuMi*

Колаборативна технологічна система (КТС) [4] (термін вводить вперше) – це технологічна система, в якій в якості універсальних гнучких засобів автоматизації використовується КПП, з яким спільно працюють люди. Тобто людина в даному випадку є невід’ємною складовою КТС, яка забезпечує її функціонування. Основним технологічним обладнанням в КТС є КПП. Зазвичай КТС складається з КПП, людини та спільного об’єкту маніпулювання, проте можливі варіації, де присутнє допоміжне технологічного обладнання.

Сучасні колаборативні роботизовані технології (КРТ) – це відносно новий вид роботизованих технологій, які передбачають технологічну співпрацю людини та КПП, і які в свою чергу базуються на оригінальних методиках, підходах, технічних рішеннях та інших напрацювання щодо проєктування, програмування, налаштування та реалізації поняття явища колаборативності в промисловій робототехніці. КРТ, які застосовуються на виробництвах, передбачають постійну або фрагментарну взаємодію людини та КПП при виконанні технологічних операцій [9-11]. Співпраця між людиною і роботом (human-robot collaboration) зазвичай передбачає роботу без захисного огороження [12] (рис. 1.2) та без інших захисних пристосувань, що кардинально відрізняє КРТ в частині безпеки від «класичних» роботизованих технологій.

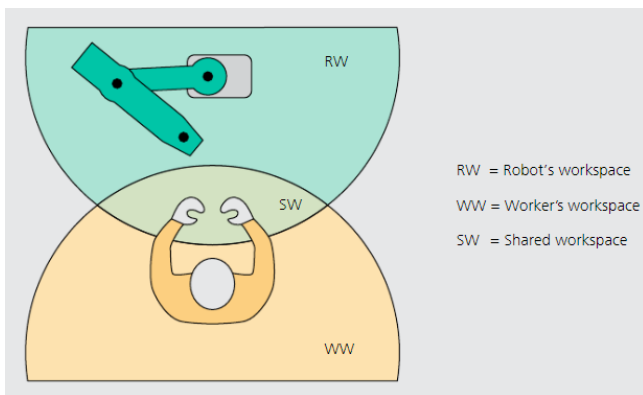
Вищевказана відмінність КПП від ПР реалізується за допомогою апаратних та програмних технічних рішень, які забезпечують функціональні можливості КПП щодо реагування на зміну зовнішнього середовища та відпрацьовування закладених алгоритмів взаємодії з людиною. Тому спільні операції, які виконують люди і КПП, об’єднані в єдиному спільному робочому просторі (SW – Shared Workspace) (див. рис. 1.3.), що визначається площею перетину робочого простору маніпуляційної системи КПП (RW – Robot Workspace) та робочого простору людини (WW – Worker Workspace) [11]. Вищевказане висвітлює нову роль людини як

невід'ємної та обов'язкової складової КРТ, а її функціонування забезпечується як роботою КТР, так і активною участю людини.



*Рис. 1.2 – Приклад захисного огородження (safeguard) [12]*

Вищевказана відмінність КТР від КТР реалізується за допомогою апаратних та програмних технічних рішень, які забезпечують функціональні можливості КТР щодо реагування на зміну зовнішнього середовища та відпрацьовування закладених алгоритмів взаємодії з людиною. Тому спільні операції, які виконують люди і КТР, об'єднані в єдиному спільному робочому просторі (SW – shared workspace) (див. рис. 1.3.), що визначається площею перетину робочого простору маніпуляційної системи КТР (RW – Robot Workspace) та робочого простору людини (WW – Worker Workspace) [11]. Вищевказане висвітлює нову роль людини як невід'ємної та обов'язкової складової КРТ, а її функціонування забезпечується як роботою КТР, так і активною участю людини.



*Рис. 1.3 – Робочі простори людини та КТР [11]*

На сьогодні існує декілька видів взаємодії між людьми і КТР, які визначаються різними типами взаємодії людей та роботів (в даному випадку коботів) з об'єктами. Завдання або операції, які виконують люди разом з КТР, усувають суворий поділ між ручною роботою людей і автоматизованою роботою КТР та визначають вид взаємодії між людьми та КТР. При цьому робочі зони КТР та працівників перетинаються, створюючи спільний робочий простір [11]. Визначено наступні види взаємодії людина-робот в спільному робочому просторі, що передбачають наявність комірки (Cell), коли КТР або КТР працює в середовищі із захисною сіткою (рис. 1.2):

1. *Coexistence (Співіснування)* – людина та робот працюють поруч один з одним, але не мають спільного робочого простору.

2. *Synchronized (Синхронізація)* – людина і робот мають спільний робочий простір, але тільки один з них присутній в робочому просторі в будь-який момент часу.

3. *Cooperation (Співпраця)* – людина та робот можуть мати завдання, які потрібно виконати одночасно в (спільному) робочому просторі, але вони не працюють одночасно над одним об'єктом.

4. *Collaboration (Колаборація)* – людина і робот одночасно працюють над одним об'єктом.

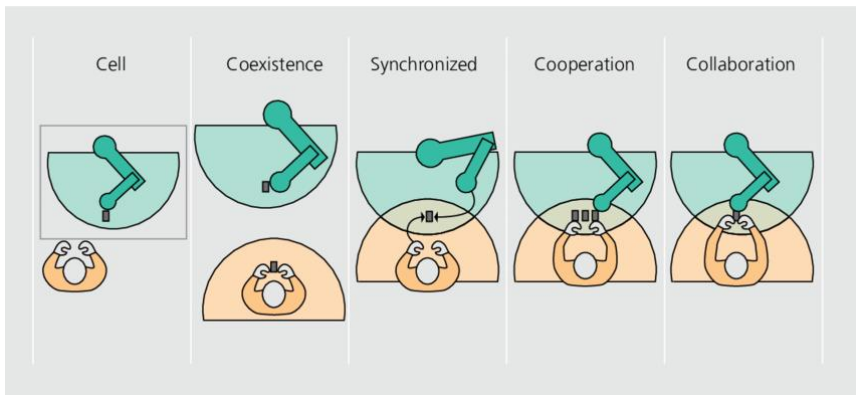


Рис. 1.4 – Ілюстрація видів взаємодії між людиною і КТР [11]

Вищевказане висвітлює видозмінену роль людини у КРТ, де вона виступає в ролі обов'язкової технологічної складової. Однак на сьогодні КРТ лише починають поширюватись на виробництвах, люди і КТР в основному працюють один з одним у формі співіснування (*Coexistence*), при якій нова колаборативна технологія є надійною, ефективною та безпечною. Використовуючи КТР на виробництвах, підприємства та компанії переслідують неочевидні на перший погляд цілі: покращення

ергономіки, випробування інноваційних технологій та підвищення безпеки для людини. Реалізація вищевказаного надає компаніям та підприємствам технологічну перевагу над конкурентами. Саме тому з кожним роком динаміка обсягів використання КІР на виробництвах зростає набагато сильніше, ніж обсяги використання «класичних» ІР [13].

Коллаборативні технології добре проявляють себе у тих випадках, коли класичні автоматизовані та роботизовані комплекси не забезпечують виконання технологічного процесу виготовлення продукції без прямої участі людини. В такому разі люди виконують основні або допоміжні операції виготовлення продукції, проте повністю замінити їх працю на роботу технологічного обладнання неможливо. З іншого боку існують такі небезпечні, неергономічні або складні технологічні операції, які виконують ІР або технологічне обладнання.

Вище описане вказує на існування таких технологій виготовлення продукції, де ні праця людей, ні робота технологічного обладнання повністю не задовольняє всі особливості технології виготовлення відповідної продукції. Результатом цього стають компроміси щодо якості та обсягів виготовлення продукції, або можливе збільшення вартості виробництва.

КІР є вирішенням даних компромісів, так як мають людську гнучкість та когнітивні можливості, а також продуктивність, надійність та потужність роботизованих технологій. Тобто КІР мають місце у випадках комплексних, складних процесах виготовлення, а також у випадках коли виробництво має бути гнучким та буде часто змінювати технологічні процеси виготовлення продукції (малосерійне виробництво). КІР є одним із варіантів сучасної реалізації гнучких виробничих комірок (ГВК), також відомих як *flexible manufacturing cell* (FMC).

Варто зазначити, що різними напрямками досліджень, що стосуються КІР в різний час займалися ряд вітчизняних та зарубіжних дослідників таких як Пилипенко О.М., Кирилович В.А., Мельничук П.П., Дімітров Л.В., Павленко І.І., Мажара В.А., W. Bauer, M. Bender, M. Braun, K. Tantawi, T. Stieber, R. Benotsmane, L. Dudás, Gy. Kovács, O. Vismanis, J. Arents, K. Freivalds, M. Bartoš, V. Bulej, M. Bohušik, P. Francesco, G. G. Paolo, V. Gusan, A. Titu, R. Accorsi, A. Tufano, A. Gallo, M. Dalle Mura, G. Dini, L. Evjemo, T. Gjerstad, E. Grøtli, G. Sziebig, L. Weidong, H. Yudie, P. Duc Truong, A.M. Bader, A.A. Maciejewski, S. Heydaryan, J. Suaza Bedolla, G. Belingardi, S. Blankemeyer, Rolf Wiemann, Uwe-Karsten Vett, Tobias Recker, Dennis Pischke, Annika Raatz, Lima, F., de Carvalho, C. N., Acardi, M. B, Rainer Müller, Matthias Vette, Aaron Geenen, Iina Aaltonen, Timo Salmi, Ilari Marstio, D. Marrone, Fabian Ranz та інші.

### 1.1.2. Прояви колаборативних технологій в різних галузях виробництв

Коботи застосовуються в різних галузях, наприклад, як інформаційні асистенти, які надають консультацію користувачам щодо розташування різних об'єктів в громадських установах, що є проявом сервісної робототехніки [11], або мобільними роботами, які забезпечують логістичні операції переміщення вантажу у складських приміщеннях тощо. Використання коботів, тобто КПП, на виробництві забезпечує автоматизацію неергономічних для працівників завдань, наприклад, допомагати людям переміщувати важкі об'єкти, або операції подачі деталей чи складання машини. Застосування КПП на сучасних виробництвах є одним із характерних проявів розвитку концепції 4-ої промислової революції, тобто Industry 4.0 [13]. Вищевказане підкреслює широкий ареал застосування колаборативних технологій в різноманітних технічних та інженерних сферах, а також їх актуальність на сьогодні.

Згідно з інформацією Interact Analysis [14] найпоширеніші сфери застосування КПП є електроніка, автомобільна індустрія та напівпровідникове мікропроцесорне виробництво (рис. 1.5).

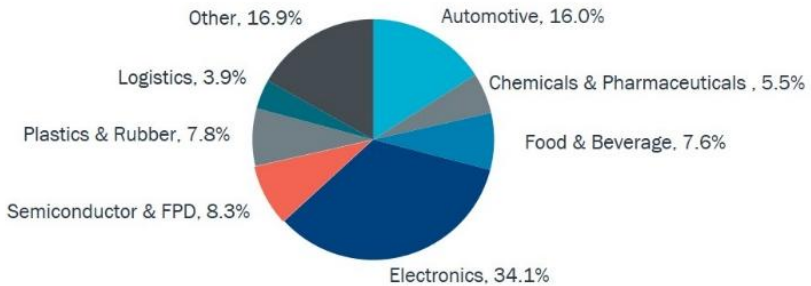


Рис. 1.5 – Розподіл застосування КПП за галузями [14]

Проведений аналіз доступних інформаційних джерел підтвердив вищевказану інформацію щодо використання КПП. Відомі роботи [15-19], які висвітлюють різноманітність застосування колаборативних технологій, а саме застосування КПП у різних галузях сучасного виробництва. Наприклад, робота [15] вказує на можливість використання КПП у технологічних процесах пакування та переміщення посилок 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 [16-18]. Використання ПР та КПР є невід'ємною складовою сучасної автомобільної промисловості, яка на сьогоднішній день займає значну частину ринку важкої промисловості за об'ємами виготовлення продукції. В роботі [15] виконано огляд застосування КПР, який вказав, що складання, переміщення та зварювання на сьогодні є найбільш поширеними операціями, які виконують КПР на виробництвах автомобільної галузі. Також автори вбачають подальші перспективи розвитку колаборативних технологій в автомобільній індустрії. Найпоширеніші операції, які виконують КПР на виробництві в автомобільній індустрії, це переміщення та утримання деталей та компонентів, складальні операції та зварювання.

Відомі випадки, коли КПР застосовується у сфері виготовлення продуктів харчування, які висвітлюються в статті [19], 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 КРТ в даному напрямку. В даному випадку основними операціями, які виконують КПР, є переміщення та пакування продукції. основними операціями, які виконують КПР, є переміщення та пакування продукції.

Робота [20] висвітлює проблемні питання, які виникають на етапі проєктування автоматизованих гнучких ліній для складання виробів з використанням КПР. Автори вказують на важливість встановлення правильного розподілу завдань між людиною та КПР для поєднання продуктивності роботів 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 [21] 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. Зміст роботи [22] вказує на важливість забезпечення та дотримання безпеки в КРТ. В цьому огляді надається

оновлена інформація про стандарти і підходи до впровадження, що представлені в останніх інформаційних джерелах, щоб відобразити сучасний стан цієї важливої дослідницької теми. Автори висвітлюють складні питання і перспективи майбутнього розвитку безпеки КРТ для надання рекомендацій, які слід враховувати при розробці промислових систем, що використовують КТР.

Також існує ряд публікацій [4, 23-25] 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 КТР на виробництві тощо.

Проведений вище стислий аналіз доступних інформаційних джерел вказує на найбільш поширені галузі сучасних автоматизованих виробництв, в яких використовуються КТР, а саме: автомобільна, електроніка, мікропроцесорна техніка.

Найпоширеніші операції, які виконують КТР на виробництвах, є переміщення та утримання продукції, складальні процеси та допоміжні процеси на кшталт пакування.

Крім того узагальнення вказують на актуальність, важливість та перспективність досліджень в сфері колаборативної робототехніки в різногалузевих виробництвах. Характерною особливістю наявних публікацій є відсутність структурованих, системних напрацювань щодо первинних етапів проектування КТР як обов'язкової складової технологічної підготовки (ТПГ) колаборативних роботизованих механоскладальних виробництв (КРМСВ).

### **1.1.3. Компоненти та структура технологічної підготовки роботизованих виробництв**

Найбільш відомим узагальненим визначенням терміну технологічна підготовка (ТПГ) виробництва є наступним: це сукупність заходів, які забезпечують повну технологічну готовність конкретного підприємства до випуску нового виробу при мінімальних трудових, матеріальних і часових витратах [26].

ТПГ того чи іншого виробництва певних виробів включає розробку комплексу технологічної документації і забезпечення виробництва засобами технологічного оснащення, що визначають як, чим, де і коли виготовити той чи інший виріб [26].

При ТПГ КРМСВ виділяють наступні етапи: технологічний аналіз виробництва, що реалізується; проектування транспортно-технологічних маршрутів; розцехування; розробка технологічної частини проекту; вибір складу засобів технічного та технологічного оснащення роботизованих систем; вибір структурно-компонувальної схеми роботизованої структури,

в тому числі за результатами імітаційного моделювання; проектування та виготовлення автоматизованого технологічного оснащення; закупівля матеріалів та комплектуючих виробів (за потреби); розробка календарних планів та проведення технологічних та організаційних заходів, необхідних для реалізації технологічного процесу (ТП); впровадження у виробництво розробленого роботизованого ТП (РТП), оснащення та обладнання з метою випуску нових виробів (див. рис. 1.6), де зеленим фоном відображено блок, що безпосередньо відноситься до розглянутих в даному дослідженні завдань.

Під АССТПГРМСВ (автоматизована система технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв) (див. рис. 1.7) розуміється сукупність методів, алгоритмів, програм математичного забезпечення, технічних та організаційних заходів, об'єднаних з метою автоматизації функціонування та управління обладнання, аналізу, проектування та технологічної підготовки роботизованого виробництва.

На етапі проектування роботизованих структур проявляються особливості ТПГ КРМСВ, особливо при проектуванні програмного забезпечення для роботизованої структури, систем управління та при моделюванні.

На рис. 1.7 за даними результатів цієї роботи зеленим кольором відображені блоки спеціального призначення, що можуть і мають бути внесені до АССТПГРМСВ, що визначені її «класичним» роботизованим змістом.

#### **1.1.4. Місце колаборативних роботизованих технологій в технологічній підготовці роботизованих виробництв**

В сучасних технічних інформаційних джерелах широко використовуються два фактично ідентичних терміни, а саме: РТК – роботизований технологічний комплекс та ГВК – гнучка виробнича комірка. Останній термін, тобто ГВК, в подальшому буде використовуватись як такий, що повною мірою відповідає сучасним вимогам гнучких виробництв.

Для створення ефективних ГВК необхідно здійснити ґрунтовний аналіз всіх структурних компонентів ГВК за такими ознаками:

- склад елементної бази (основне та допоміжне технологічне обладнання) ГВК;
- конструктивно-технологічні та функціональні особливості елементів ГВК;
- компоновальні розміщення технологічного обладнання в робочій зоні ПР та/або КПР;
- конструктивні, функціональні та інформаційні зв'язки між компонентами ГВК та виробничим оточенням.

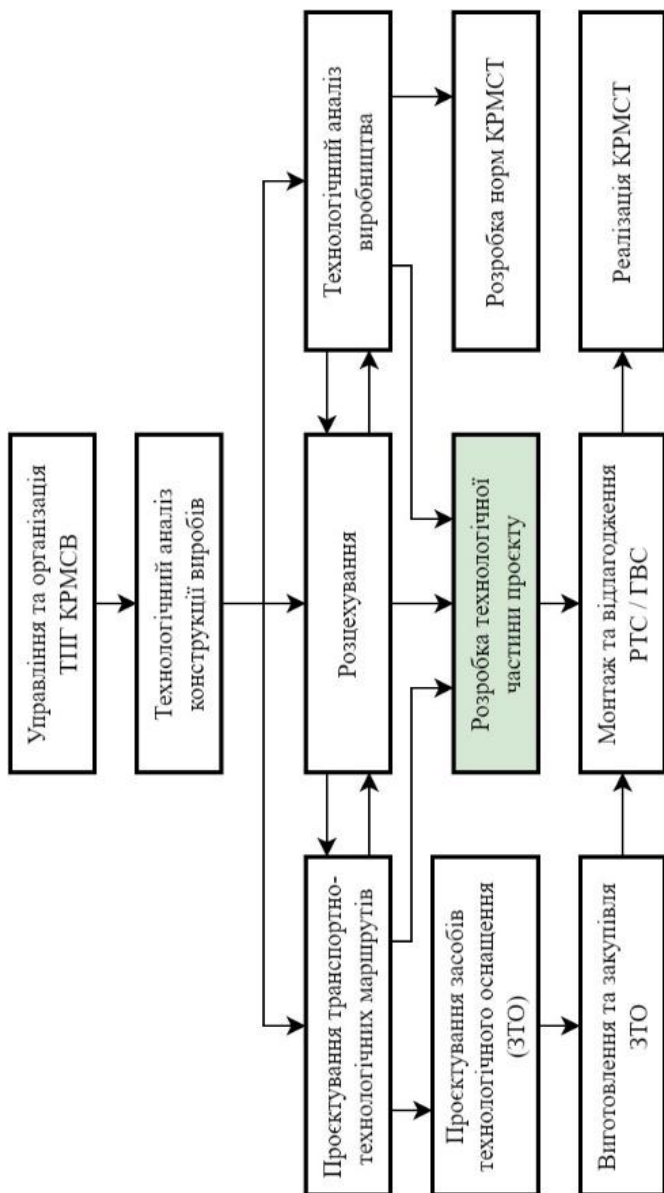


Рис. 1.6 – Спрощена схема основних етапів ТПГ КРМСВ

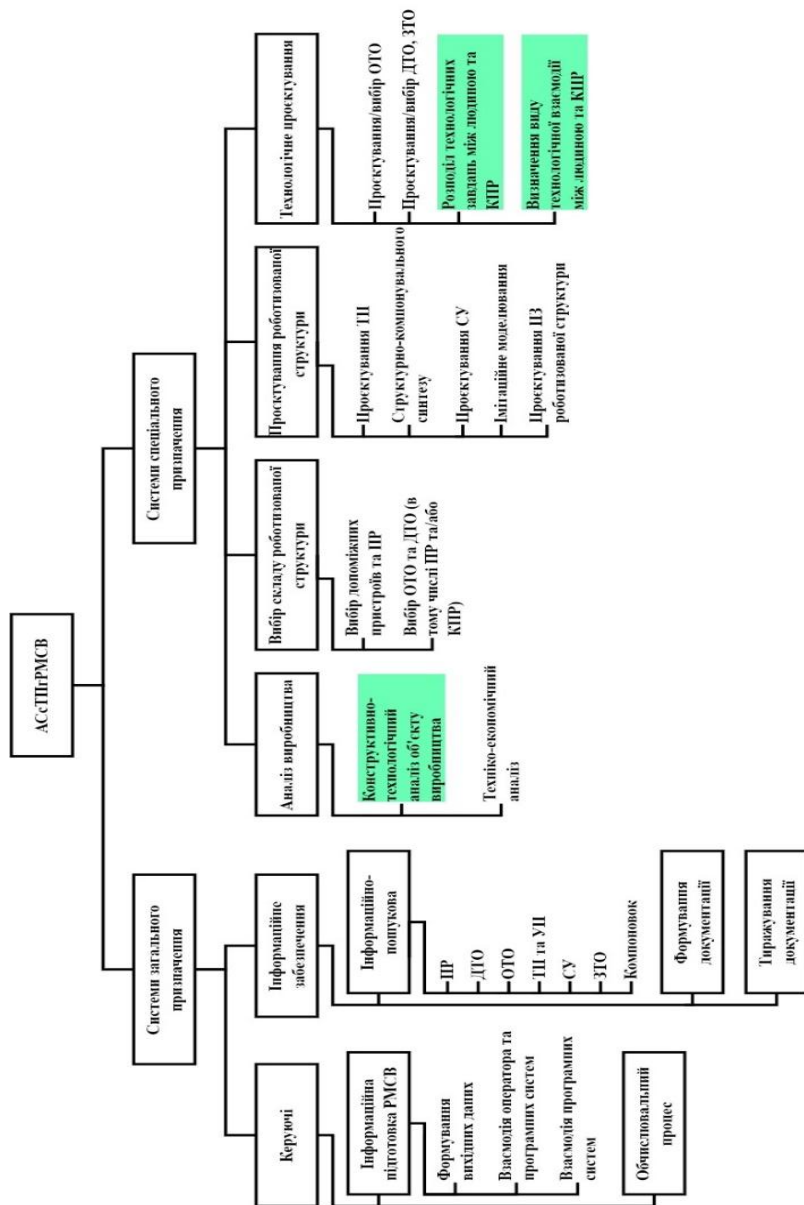


Рис. 1.7 – Структурна схема АСПТРСМВ

Оскільки варіантів ГВК може бути дуже багато, то для визначення із них найбільш доцільних виконань необхідно проаналізувати особливості будови та функціонування основного технологічного обладнання (ОТО), наприклад, металорізальних верстатів, ПР та/або КІР, допоміжного технологічного обладнання (ДТО) і комбінації їх компоновального розміщення.

Початково спрощену структуру далеко неповних варіантів будови ГВК представлено на рис. 1.8 [27].

Із вище наведених прикладів видно, що в ГВК може входити різна кількість основного та допоміжного технологічного обладнання. Так, можливий варіант, коли ГВК складається з одного ОТО, наприклад, металорізального верстату та одного ДТО (рис. 1.8, а); або одного ОТО та ДТО в кількості  $m$  одиниць обладнання (рис. 1.8, б).

Можливе також виконання ГВК з ОТО в кількості  $n$  і ДТО в кількості  $m$  одиниць обладнання (рис. 1.8, в). При цьому ДТО в ГВК можуть виконувати функції як подавально-приймальні, так і окремо подавальні та приймальні тощо.

Вказаний підхід справедливий для проектування/синтезу «класичних» роботизованих технологій без врахування явища колаборативності, що формально описані в [9].

З врахування рис. 1.4 та [10] можна констатувати наступне: показники та характеристики  $H$  (human – людина) характеризуються фізичними здібностями та можливими алгоритмами реакції при взаємодії  $H$  з CIR (Collaborative Industrial Robot – КІР), при встановленні та корегуванні траєкторних переміщень кінцевого елемента маніпуляційної системи, наприклад, затискного пристрою, шляхом відповідної реакції системи управління роботом на зовнішні подразники, що є, наприклад, колізійними тощо.

Розроблено графову схему функціонування елементів  $H$ , CIR, Intelligent Assist Devices (IAD) та Industrial Equipment (IE) як узагальнення структури роботизованої колаборативної системи HRCS та її функціональності [28]. На рис. 1.9 проілюстровано, що до HRCS входять два види складових: обов'язкові Mandatory Components (HRCSMC) та необов'язкові – Optional Components (HRCSOC).

До HRCSMC входять відомі компоненти  $H$  та CIR, а в HRCSOC включені такі складові як IAD та IE – інше технологічне (промислове) обладнання, наприклад, пристрої орієнтування тощо.

На рис. 1.9 символом  $(x)$  позначено Декартовий добуток відповідних компонентів при відтворенні їх взаємодії, а символами  $f^c$  та  $f$  – ті змістовні дослідження, що відповідають їх колаборативним та “традиційним” складовим відповідно.

При цьому з врахуванням певного рівня абстрагування виділено чотири основних напрямків досліджень для  $f^c$  (вирази (1.1), (1.2), (1.3),

(1.4)) та три для  $\alpha$  (вирази (1.5), (1.6), (1.7)). Останні напрямки є більш досліджені та практично реалізованими.

Більшу науково-практичну цікавість мають перші чотири напрямків досліджень.

$$f_1^c : (H \times CIR) \rightarrow (F_{\alpha_1}^c = [P, T, V, W, S, \dots]) \quad (1.1)$$

$$f_2^c : ((H \times CIR) \times IAD) \rightarrow (F_{\alpha_2}^c = [P, T, V, W, S, \dots]) \quad (1.2)$$

$$f_3^c : ((H \times CIR) \times IE) \rightarrow (F_{\alpha_3}^c = [P, T, V, W, S, \dots]) \quad (1.3)$$

$$f_4^c : ((H \times CIR) \times IAD \times IE) \rightarrow (F_{\alpha_4}^c = [P, T, V, W, S, \dots]) \quad (1.4)$$

$$f_5 : (IAD) \rightarrow (F_{\alpha_5} = [P, T, V, W, S, \dots]) \quad (1.5)$$

$$f_6 : (IE) \rightarrow (F_{\alpha_6} = [P, T, V, W, S, \dots]) \quad (1.6)$$

$$f_7 : (\alpha_5 \times \alpha_6) \rightarrow (F_{\alpha_7} = [P, T, V, W, S, \dots]) \quad (1.7)$$

Загалом на рис. 1.9 зміст символів  $f$  та  $f^c$  у виразах (1.1)-(1.7) означає певні процедури та/або методики досліджень, що виконуються на множинах певних компонентів та дають можливість отримати (символ  $\rightarrow$  як знак логічного слідування) певні результати  $F^c$  та  $F$  відповідно для колаборативної складової (верхній правий індекс  $c$ ) та традиційної складової автоматизованих технологій.

Формально кожен із запропонованих напрямків досліджень (1.1)-(1.7) являє собою біективне відображення виділених обов'язкової та необов'язкової складових HRCS на множину параметрів, що змістовно мають місце при реалізації виділеної виконавчо-апаратно-управлінської складової автоматизованих технологій.

Наприклад, для виразу (1.1) сама процедура  $f_1^c$  виконується на основі розгляду компонентів  $H$  та  $CIR$ , що формує (символ логічного слідування  $\rightarrow$ ) відповідну множину параметрів  $HRCS$ , а саме сили  $P$ , моменти  $T$ , швидкості  $V$ , потужності  $W$  та безпека  $S$  (safety). Саме ці параметри, наприклад, для електромеханічних приводів ланок ПР та/або КПР є складовими управлінського рівня. Вони формуються із врахуванням різноманітних сигналів сенсорів різної фізичної природи та походження та алгоритмів, наприклад, таких як розв'язування прямих та зворотних задач кінематики та динаміки для ланок маніпуляційних систем колаборативних

та звичайних ПР; алгоритмів розв'язування задач формування безколізійних траєкторій; алгоритмів безпечної кооперації перш за все для Human (людини); алгоритмів оптимального та/або раціонального розподілу технологічних завдань між  $H$  та  $CIR$  для забезпечення заданої продуктивності роботи  $HRCS$ , що визначається швидкодією та надійністю; алгоритмів для забезпечення працездатності  $HRCS$  як такої; алгоритмів для впровадження конкретних значень параметрів колаборативності роботи  $CIR$  при колізійних траєкторіях (очевидною є ймовірність колізійності), або при їх превентивному визначенні тощо.

Необхідно особливо наголосити, що вказане вище не протирічить основним проявам колаборативності  $CIR$  за ISO 10218 [29].

У виразах (1.1)-(1.7) дужки  $[]$  означають, що може бути визначено як один із параметрів, що знаходяться в цих дужках, так і їх множина в будь-якому поєднанні. Багато крапок вказує на можливість збільшення та внесення нових параметрів в процесі досліджень  $ac$  та  $a$ . Наприклад, критерієм може бути безпека функціонування компонентів  $HRCS$  тощо.

Очевидно, що вказані дослідження можуть бути використані як при дослідженні колаборативності вище вказаної КГВС, так і при дослідженні окремих її складових, наприклад, традиційних ГВС. В такому випадку останні можуть бути представлені колаборативними виробничими ділянками тощо.

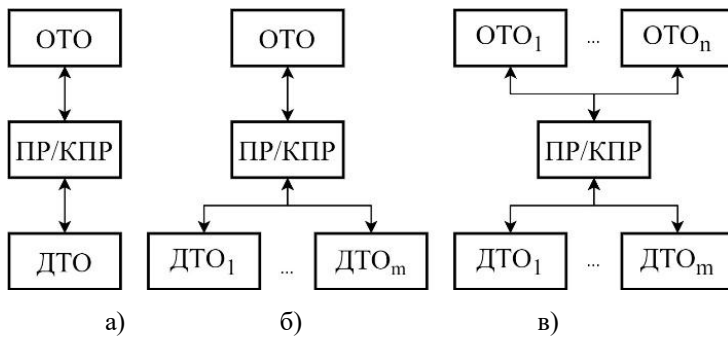


Рис. 1.8 – Приклади структур ГВК

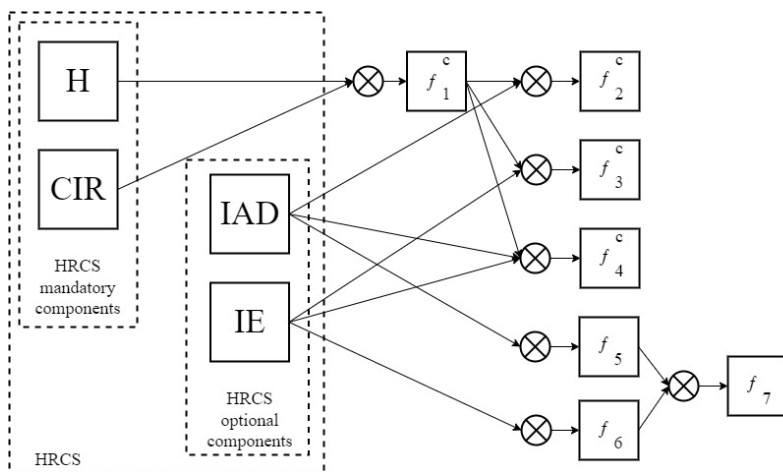


Рис. 1.9 – Структура та зв'язки графа, що ідентифікує HRCL

### 1.1.5. Аналіз інформаційних джерел щодо атестації метрики

Широке використання ПР і КПР в сучасних механоскладальних виробництвах машинобудування, приладобудування та в інших галузях є характерною рисою автоматизації цих виробництв. Проектування та експлуатація роботизованих технологічних структур, наприклад, гнучких виробничих комірок (ГВК), вимагає наявності технічної інформації, що апіорі полегшує та/або забезпечує розв'язування певних задач ТПг РМСВ та/або КРМСВ.

Вказане відноситься, наприклад, до необхідності мати інформацію щодо збереження певної орієнтації в системі координат (СК) ПР та КПР загискових пристроїв (ЗП) ПР та КПР незалежно від їх конструктивного виконання. Це відноситься насамперед до визначення геометричних характеристик робочих зон ПР, в яких ЗП зберігає свою певну орієнтацію, наприклад, вертикальну (певний конструктивний елемент ЗП певним чином орієнтований в системі координат (СК) ПР). При цьому аналізуються “одноруки” та “односхватні” роботи такі, що є найбільш поширеними в гамі ПР/КПР, що на сьогодні виготовляються.

Вказані задачі можуть бути розв'язувані певними засобами та підходами, що орієнтовані на підвищення ефективності розв'язування задач ТПг РМСВ. Один з таких підходів, що базується на так званій атестації метрики МС аналізованого ПР, і розглядається в даній роботі.

Метрика маніпуляційної системи (МС) ПР – це конструктивно-кінематичні характеристики ланок МСПР, а саме: геометричні розміри ланок, їх форма та об'єм, види та величини їх взаємних переміщень. Реалізація атестації метрики МСПР може бути застосована також і до КПР, тому що конструктивна реалізація ПР та КПР фактично є однаковою, а їх різниця полягає в апаратних, функціональних, безпекових тощо можливостях [30].

Під процесом атестації метрики маніпуляційної системи (МС) КПР/ПР в даному випадку розуміється визначення, а відтак і закріплення певних якісних та кількісних залежностей та закономірностей показників досліджуваних параметрів КПР, що обумовлене конструктивно-кінематичними характеристиками ланок МС досліджуваного КПР. В даному випадку досліджуваним параметром є орієнтація затискного пристрою (ЗП) з/без об'єкта маніпулювання (ОМ) в ньому в системі координат ПР. Тобто процес атестації метрики МС ПР зводиться до визначення певних кількісних та якісних параметрів геометричних характеристик робочих зон ПР, в яких забезпечується певний аналізований параметр ПР, а саме орієнтація ЗП з/без ОМ в ньому.

Під поняттям конструктивно-кінематичні характеристики слід розуміти розміри ланок, їх форму, вид та величини їх взаємних переміщень, що для компактності та стислості цього терміну і названо метрикою МСПР [24]. Для атестації метрики МС ПР необхідною є інформація щодо ПР та конструктивно-геометричних характеристик виду кінцевого елемента (end-effector), насамперед, ЗП чи інструменту, з врахуванням габаритних розмірів ОМ за його наявності, або відсутності в ЗП.

Процес атестації метрики ПР передбачає багаторазове розв'язування зворотної задачі кінематики на множині конструктивно-кінематичних характеристик та параметрів ланок МС ПР/КПР із збереженням певної орієнтації ЗП у СК ПР. Результатом атестації метрики ПР є якісні та кількісні параметри геометричних характеристик робочих зон ПР, де ЗП зберігає задану (досліджувану) користувачем орієнтацію в аналізованих точках робочих зон (РЗ) ПР, та візуалізоване представлення цих параметрів у вигляді частини об'ємної РЗ аналізованого ПР [31].

Передові компанії-виробники таких моделей ПР як Mitsubishi [32], ABB [33], Fanuc [34], KuKa [35] тощо в технічній документації не вказують означені вище параметри. Наявна ж інформація в технічній документації названих вище та інших ПР є недостатньою для розв'язування ряду завдань ТПг КРМСВ.

Таким чином, з однієї сторони підприємства-виробники ПР необхідної щодо поліпшення розв'язування задач ТПг КРМСВ інформації не надають, а з іншої – ні один існуючий нормативний документ ні в Україні, ні в інших країнах не передбачає її обов'язкової наявності. Це значно ускладнює розв'язування таких практичних задач ТПг КРМСВ що, як правило, є достатньо трудомісткою, як розміщення та планування

технологічного обладнання в робочих зонах ПР, визначення координат опорних точок траєкторій, синтез та планування самих траєкторій тощо.

Наведений нижче аналіз інформаційних джерел вказує на те, що загалом тема атестації як такої для ПР не є новою. При цьому в той чи інший спосіб висвітлюються подібні параметри, які розглядаються в даній роботі, або подібні процедури атестацій щодо подібних параметрів ПР та КПР. Значна кількість досліджень орієнтована на визначення тим чи іншим чином таких параметрів ПР як точність та геометричні характеристики робочих зон ПР та КПР [36–45]. Причому, в деяких з цих робіт має місце кореляція цих двох параметрів.

Відома робота [36], де параметром атестації є точність. Її використання можливе при ТПг КРМСВ з врахуванням різних значень параметра точності в різних частинах робочих зон ПР. Вона може бути використана для атестаційних процедур щодо параметра вектора підходу до аналізованої точки, при визначенні точності позиціонування ЗП в ній, але аж ніяк щодо атестації метрики МС ПР.

Результатом досліджень роботи [37] є визначені залежності точності позиціонування ЗП ПР та геометричних характеристик робочої зони аналізованого ПР, де забезпечується задана точність. Фрагментарність та відсутність параметра атестації як такого визначають неможливість використати цю роботу для проведення атестації метрики МС ПР.

В дослідженні [38] не прямо, а опосередковано використовуються елементи визначення метрики, які визначаються певними граничними переміщеннями ланок ПР, що неявним чином корелює з точністю. Але на це чітко не вказується та фактично не виконується атестація робочих зон ПР ні за метрикою МС ПР, ні за параметром точності. Тому цінність цієї роботи для використання в процедурі атестації метрики МС є сумнівною.

У роботі [39] висвітлюється моделювання засобами САД робочої області двох роботів з паралельною кінематикою і досліджується вплив різних конструктивних параметрів ПР на робочий простір дельта-робота. Структурно атестація робота віддалено схожа до розробленого в даній роботі процесу атестації як такого. Але не передбачає визначення певного параметра атестації навіть іншого змісту і тому є корисною тільки щодо її орієнтації для ПР типу дельта-робот.

Результатом дослідження [40] є швидке та автоматизоване визначення геометричних параметрів робочої зони медичного робота. Корисність цієї роботи визначається специфікою застосування роботів в хірургії та очевидному поєднанні робочої зони робота щодо його “співпраці” з хірургом в частині таких технологічних переходів як “подати інструмент”, “забрати інструмент” тощо. Очевидно, що отримані кінцеві результати є корисними для атестації метрики МС ПР.

У дослідженні [41] присутні геометричні параметри робочої зони ПР, де отримується задана точність поверхні за конкретних умов виконання технологічної операції фрезерування інструментом, що закріплений в ЗП

ПР. Проте дане дослідження не може бути використане для атестації метрики МС ПР в силу його орієнтації тільки на конкретну технологічну операцію різанням.

Вузька направленість досягнутих в роботі [42] результатів щодо аналізу певних робочих зон ПР з механізмами паралельної кінематики лише для орієнтації мобільних платформ робить результати цієї роботи неприйнятними для розв'язування задач атестації метрики МС ПР/КПР.

В роботі [43] розглядаються співвідношення робочого простору та місця встановлення паралельних роботів на основі аналізу робочого простору ПР згідно запропонованої авторами концепції. Зміст роботи передбачає фрагментарне використання методу атестації метрики ПР, але априорі вона не проводиться в запропонованій інтерпретації і тому ця робота не є придатною для розв'язування поставлених тут завдань.

Результатом роботи [44] є розроблений в ній підхід щодо методу оцінки наявності зворотної кінематики, що базується на моделі Денавіта-Хартенберга (ДН). Він не може бути використаний для розв'язування поставлених тут задач в силу того, що опис кінематики ПР матрицями ДН передбачає використання лише ниткових моделей ланок МС та кутів між ними з використанням напрям-них косинусів. Для проведення ж атестації метрики необхідною є наявність 3D-моделей ланок МС ПР.

Процес атестації метрики МС ПР в наведеному вище тлумаченні вперше розглянуто в [36, 40]. Але зміст цих робіт носить скоріше декларативний характер і детально та системно не описує методичну послідовність проведення автоматизованої атестації метрики МС ПР, на що і направлено зміст запропонованої тут роботи.

Наявні об'єктно-орієнтовані програмні продукти, а саме RoboMaster [45], ROS [46], RobotWorks [47], RobotExpert [48], RobotAnalyzer [49] безпосередньо не розв'язують подібних задач в даній постановці, але, як свідчить детальний аналіз їх можливостей, вони можуть бути використані як програмний інструментарій для подібних досліджень. Наприклад, програмний продукт RoboDK [50] загалом як один з найбільш універсальних симуляторів для ПР та їх offline програмування дозволяє інтегрувати 3D-модель реального аналізованого робота та моделювати в 3D-просторі процеси переміщення ланок МС.

З огляду на викладене вище та в контексті поставленої в даній роботі мети дослідження технологічних можливостей ПР за рахунок проведення автоматизованої атестації метрики МСПР є невід'ємною складовою ТПг КРМСВ, що підвищує ефективність та зменшує трудомісткість її (ТПг) виконання при проєктуванні нових та/або модернізації існуючих ГВК машино- та приладобудування.

## 1.2. Парадигма розвитку роботизованих технологій

За даними міжнародної федерації робототехніки (IFR) темпи щорічного збільшення випуску та впровадження у виробництво ПР в період з 2016 по 2021 становлять близько 14%, рис. 1.10. Також в період з 2020 по 2021 роки збільшилась кількість застосування КПР на виробництві на 33% [51].

Вище зазначене вказує на очевидну перспективність та актуальність розвитку промислової та колаборативної робототехніки як в науковій, так і в практичній сферах та визначає її подальший розвиток в різних галузях виробництв.

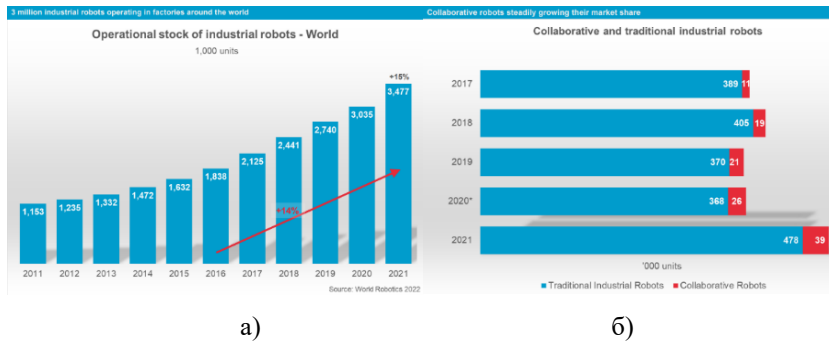


Рис. 1.10 – Інформація щодо росту застосування ПР та КПР:

- а) – світовий приріст виготовлення ПР;  
 б) – порівняння світового приросту використання ПР та КПР [51]

В контексті сказаного парадигму роботизованих колаборативних технологій можна трактувати як таку, що змінювалась від “ручних” технологій з активною та єдиною участю людини ( $H$  - human). В багатовіковому процесі розвитку науки, техніки та технологій, зменшувалась роль  $H$ , підвищувалась роль механізації та автоматизації до моменту підвищення ролі  $H$ , які є характерним для сучасного етапу розвитку автоматизованих технологій, що очевидним чином проявляється в роботизованих колаборативних технологіях.

Схематично сказане можна представити наступним процесійно-подійним ланцюжком за виразом (1.8):

$$H \rightarrow M \rightarrow A \rightarrow R \rightarrow FM \rightarrow CR (Coe(H+R)) \rightarrow Coo(H+R) \rightarrow Col(H+R)). \quad (1.8)$$

Тут:

*H* – характеризує повністю ручну працю, що виконує людина, починаючи із мисливства із камінними знаряддями праці до використання металевих та інших знарядь праці, що вимагало “своїх” технологій для їх виготовлення. При цьому людина була самою активною та фактично єдиною складовою тодішньої технологічної системи (термін умовний);

*M* – технології, які характеризуються використанням механізованих знарядь праці, що значно змінило технологічно-виробничу активність людини в процесі виробництва. З часом роль людини почала зменшуватись, але її наявність була все ще необхідною. Активний розвиток технологій як таких почався на етапі механізації в машинно-ручних процесах, коли вплив на предмет праці проводився за допомогою механізмів та/або машин, але за обов'язкової участі людини;

*A* – автоматизовані технології з фактично досить незначною, але необхідною участю в них людини. Людина в основному була пасивним учасником реалізації технологій. Наприклад, виконувала допоміжні технологічні функції типу завантаження заготовок – розвантаження деталей в/з технологічного обладнання тощо. Класична автоматизація механоскладального виробництва є логічним продовженням вище вказаного. Вона в тому числі заснована на числовому програмному управлінні (ЧПУ) різним технологічним обладнанням без обов'язкової участі людини, що забезпечує ефективність виробничих процесів в різних її проявах. Проте вона (*A*) має свої обмеження, зокрема, у гнучкості та можливостях переналагодження для виготовлення нових виробів тощо;

*R* – промислова робототехніка дозволила вирішити технологічні проблеми, які були характерними для класичної автоматизації в різних типах виробництв, дозволяючи використанням ПР як гнучких засобів виробничої автоматизації при реалізації різних технологій. Вона забезпечує більшу гнучкість та можливості переналагоджування, але часто потребує складних систем програмування та їх інтеграції з іншими виробничими процесами, в тому числі, як і для випадку *A* із (1.8), за рахунок використанням CAD/CAM/CAE та CALS-технологій;

*FM* – гнучке виробництво, яке на різних рівнях його організації відоме такими технологічно-організаційними структурами як ГВК (гнучка виробнича комірка), ГВД (гнучка виробнича ділянка), ГВЦ (гнучкий виробничий цех), ГВС (гнучка виробнича система), ГКІВС (гнучка комп'ютерно-інтегрована система) характеризується перш за все використанням ПР, здатністю до оптимального переналагодження роботизованої технологічної системи на випуск іншої продукції тощо. Теоретичною основою вказаного є групова технологія. *FM* характеризується так званою “малолюдною” технологією, коли людина приймає активну участь лише при обслуговуванні технологічного обладнання, наприклад, при підготовці управляючих програм (УП) для

металообробного обладнання, ПР, їх програмуванні, займається проблемами гідро- пневмоавтоматики тощо;

*CR* – колаборативна робототехніка – є невід’ємною складовою сучасної промислової робототехніки. Метою її застосування є збільшення гнучкості та продуктивності виробництва, зменшення ризику травмування працівників та спрощення процесу програмування ПР, КПР та іншого технологічного обладнання.

Відмітною особливістю колаборативної робототехніки є те, що вона передбачає в тому чи іншому прояві обов’язкову взаємодію між КПР та людиною. Це забезпечує ефективну реалізацію певних технологій, особливо в частині гнучкості, тобто здатності ефективно за певним критерієм переналагоджуватись на випуск продукції іншої номенклатури, підвищення безпеки працюючих, оскільки в такій технологічній системі контролює процес як людина, так і система управління КПР.

При цьому ПР певних конструктивних виконань (що і робить їх колаборативними – КПР) можуть використовуватись не тільки як автономне технологічне обладнання, так і як таке, що функціонально взаємодіє з людиною у режимі їх спільної (*H+R*) роботи при реалізації певних технологій.

Вказана вище взаємодія (*H+R*) за виразом (1.8) має наступні прояви:

- *CoeCR* – *Coexistence Collaborative Robotics*, що трактується як співіснування людини та КПР, які реалізують технологію виготовлення однієї і тієї ж продукції. При цьому і *H*, і КПР не мають загальної робочої зони і не контактують безпосередньо та одночасно з об’єктом виробництва;

- *CooCR* – *Cooperative Collaborative Robotics*, означає таку взаємодію *H* та КПР, яка характеризується виготовленням продукції за однією технологією. Але при цьому і *H*, і КПР мають загальну частину їх робочих зон, проте не контактують безпосередньо та одночасно з об’єктом виробництва;

- *ColCR* – *Collaborative Robotics*, що змістовно означає класичне розуміння терміну “колаборація”. Тобто при цьому при єдиній технології виготовлення продукції і *H*, і КПР мають загальну частину їх робочих зон та можуть при виконанні певних технологічних операцій контактувати безпосередньо та одночасно з об’єктом виробництва.

Вказане для колаборативних технологій дозволяє ввести нове поняття, а саме “колаборативна роботизована технологічна система” (КРТС) та в зв’язку із обов’язковою технологічною активністю людини дозволяє трактувати *H* як невід’ємну складову КТС.

Тому парадигма процесу розвитку колаборативних технологій в частині участі людини *H* в певних технологіях може бути сформульована як така, що стисло та умовно характеризується наступною схемою:

- *max* (активна участь людини в процесі реалізації “примітивних” технологій, змістовний символ *H* у виразі (1.8));

– *max-min* (поступове зменшення участі людини в технологіях, змістовний символ  $M$  в (1.8));

– *min* (змістовні символи  $A$ ,  $FM$  в (1.8), що вказують на неактивну участь  $H$  при реалізації основних технологічних операцій та переходів);

– *min-max* (змістовні символи  $CoeCR$ ,  $CooCR$  та  $ColCR$  в (1.8), вказують на суттєве зростання ролі людини в аналізованих технологіях).

Більш глобальний аналіз сутності описаної вище парадигми означає, що на шляху до широкого впровадження колаборативної робототехніки мають місце проблеми, пов'язані з її інтеграцією з іншими виробничими процесами, програмуванням, навчанням працівників тощо

Враховуючи ці проблеми та можливості їх вирішення, колаборативна робототехніка в недалекому майбутньому стане одним із ключових елементів реалізації багатьох актуальних на той час технологій.

## **РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КОЛАБОРАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ РОБОТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ ЛЮДИНА-РОБОТ**

### **2.1. Загальне системне представлення послідовності розв'язування завдань**

#### **2.1.1. Пропонована багаторівнева схема системного підходу при аванпроектуванні колаборативних роботизованих технологій**

На сьогодні одними з актуальних та невирішених питань колаборативної робототехніки є визначення можливості та доцільності застосування КПР на виробництві, розподіл завдань між людиною і КПР та визначення виду взаємодії людина-КПР. Дослідження та напрацювання, які виконані в даному розділі, продовжують розвиток попередніх досліджень та напрацювань щодо системного та комплексного розв'язування вищевказаних проблемних питань [4, 9, 10, 23, 24, 25]. Пропонований та описаний нижче підхід реалізує початкові етапи проектування КРТ, що комплексно враховує сутність колаборативних технологій, конструктивно-технологічні особливості КПР, 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 (МАІ) та нечіткого багатокритеріального вибору альтернатив (НБВА).

Метод аналізу ієрархій (МАІ), англ. Analytic Hierarchy Process (АНР) – це математичний інструмент системного підходу до вирішення складних проблем прийняття рішень, який заснований на математиці та психології. Він являє собою точний підхід з використанням експертних оцінок 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 [52].

НБВА передбачає використання системного підходу щодо структурування і вирішення комплексних проблем прийняття рішень, 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 [52].

Представлення пропонуваного системного підходу у вигляді сегментованої піраміди (рис. 2.1) виконано на основі існуючого представлення структури автоматизованого виробництва ISA 95 [53].

Графічна інтерпретація пропонуваного системного підходу представлена 3 рівнями:

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

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

*Тактичний рівень L2* 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 попередньо обраними критеріями для використання МАІ, де альтернативами розв'язування 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 ( $Coll$ ) (див. п. 1.1.1). 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 тощо.

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 параметрів робочої зони PR, яка досліджується оригінальним підходом атестації метрики маніпуляційних систем PR [24], що може бути використана і для КПП. При цьому визначаються робочі зони PR із збереженням орієнтації в просторі затискного пристрою з/без об'єкта маніпулювання за допомогою атестації метрики маніпуляційної системи PR. Отримана таким чином інформація дозволяє розробити рекомендації щодо застосування КПП разом з людиною в КРТ на виконавському рівні L3.

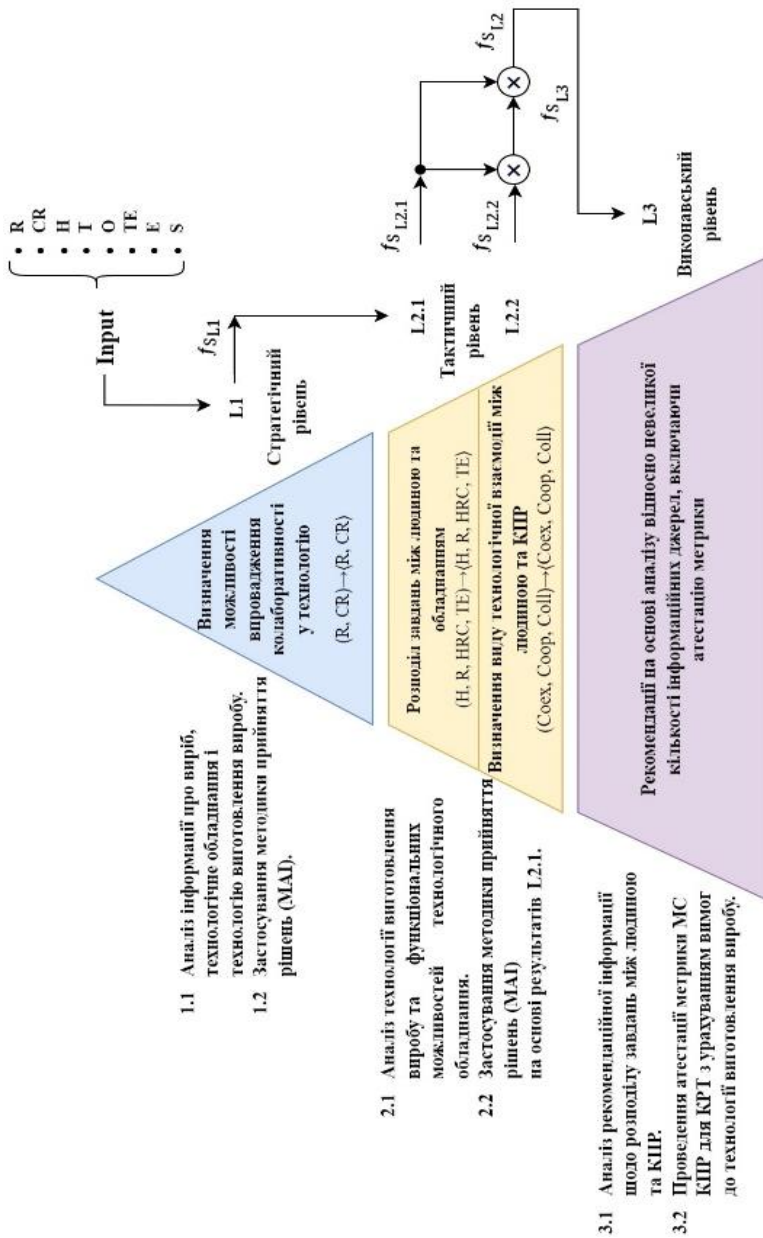


Рис. 2.1 – Спрощена схема запропонованого системного підходу при аванпроектванні КРІ

Описаний пропонований трирівневий підхід комплексно та системно відтворює послідовність виконання операцій на кожному з рівнів, їх взаємозалежності та очікувані результати реалізації кожного із рівнів.

Формалізоване представлення вищевказаного трирівневого підходу за рис. 2.1 на високому рівні абстрагування описує змістовну інформацію кожного із рівнів пропонованого підходу та послідовність їх виконання. Вказане формально представлено наступним чином:

$$\begin{array}{ccccccc}
 f:(In) & \rightarrow & \langle R, CR \rangle & \rightarrow & \langle CR^k \rangle & \rightarrow & \langle Rec, AMect \rangle \\
 & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\
 & & f_{S_{L1}} & & f_{S_{L2}} & & f_{S_{L3}}
 \end{array}, \quad (2.1)$$

Реалізація пропонованого трирівневого підходу забезпечується виконанням функцій  $f_{S_{L1}}$ ,  $f_{S_{L2}}$  та  $f_{S_{L3}}$ , що в даній роботі трактуються як функції прийняття рішень, та послідовності виконання пропонованого підходу, тобто послідовності реалізації визначення функцій. В даному випадку неупорядкована множина  $In$  – це вхідна інформація про ПР ( $R$ ), КПР ( $CR$ ), людину ( $H$ ), об'єкт ( $O$ ), технологічне обладнання ( $TE$ ), технологію виготовлення продукції ( $T$ ), множину експертів ( $E$ ) та множину локальних критеріїв прийняття рішень ( $S$ ):

$$(In) = (R, CR, H, O, TE, T, E, S), \quad (2.2)$$

Ці дані використовуються як основа для прийняття рішень за допомогою МАІ та оцінок експертів щодо можливості застосування КРТ в конкретній роботизованій технології. На основі вищевказаної інформації створюється схема ієрархії для МАІ, що визначає мету, критерії та/або атрибути оцінювання і альтернативи, що формально є вирішенням поставленої проблеми або задачі. Альтернативи для поставленої задачі в даному випадку для стратегічного рівня L1 (див. 2.1.), а саме функції  $f_{S_{L1}}$  є визначення можливості впровадження КРТ у виробництво, тобто це  $R$  – ПР та  $CR$  – КПР у формалізованому представленні (2.1).

Результатом виконання функції прийняття рішень на першому рівні  $f_{S_{L1}}$  є упорядкована множина нечітких оцінок щодо переваг  $R$  та  $CR$ , тобто  $\langle R, CR \rangle$  (див. вираз (2.3)). Функція прийняття рішень  $f_{S_{L1}}$  передбачає виконання ряду математичних операцій та поділяється на дві функції: перша, де кількість експертів  $|E| > 1$  та друга, де кількість  $|E|=1$ .

У функції, де кількість експертів  $|E| > 1$ , отримані результати анкетування експертів, тобто результати тих чи інших оцінок альтернатив за МАІ, ці результати обробляються методами НБВА за допомогою оригінального програмного продукту FMCSA, що вже зарекомендував себе як працездатно діючим. Обробка отриманих результатів передбачає обробку отриманих результатів у вигляді неупорядкованої множини за

методами середнього арифметичного (Middle Method Solution Arithmetic Method – MMS), найкращого випадку (Quasi-Best Method Solution – QBMS), найгіршого випадку (Worst Method Solution – WMS). Результатами вищевказаної обробки отриманих результатів є впорядкована множина  $\langle R, CR \rangle$ , що отримана за вказаними вище методами.

У функції, де кількість експертів  $|E|=I$ , вищевказана обробка НБВА за допомогою програмного продукту FMCSA не виконується, а результати одного експерта щодо  $\langle R, CR \rangle$  є кінцевими.

У випадку, коли нечітка оцінка має пріоритет щодо  $R$ , то виконуються відомі підходи та методики проектування/синтезу «класичних» роботизованих технологій, наприклад [54].

Якщо пріоритет має  $CR$ , що є результатом функції прийняття рішень одним експертом, або оброблені НБВА результати групи експертів, при  $|E| > I$ , то обирають КПП і виконується перехід до рівня L2. Математичною основою реалізації рівня L1, тобто  $f_{S_{L1}}$ , є математичні та матричні операції у вищезгаданих методах MAI та НБВА. При цьому передбачено використання інформації або від одного експерта  $|E|=I$ , або від їх кінцевої множини  $|E| > I$ .

Формалізований вигляд вище вказаного виражається наступною залежністю:

$$\begin{array}{c}
 f_{S_{L1}} : \left( \langle R \times CR \rangle \times (E_i | i = \overline{1, n_E}) \times (S_{L1} | i = \overline{1, n_{S_{L1}}}) \right) \rightarrow \nabla \\
 \begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} \text{АНР} \\ \downarrow \\ \nabla \left[ \begin{array}{l} |E| > 1 \\ |E| = 1 \end{array} \right. \\ \uparrow \\ \text{АНР} \end{array} & \begin{array}{c} \left( \langle (R_i, CR_i) | i = \overline{1, n_E} \rangle \right) \xrightarrow{\text{FMCSA } \forall i = \overline{1, n_E}} \left( \langle R, CR \rangle \right)_{|E| > 1} \\ \rightarrow \\ \left( \langle R, CR \rangle \right)_{|E| = 1} \end{array} & \begin{array}{c} \rightarrow \\ \left. \right\} \langle R, CR \rangle \end{array}
 \end{array}
 \end{array} \quad (2.3)$$

Тут та далі кількість  $n_E$  – кількість експертів;  $n_{S_{L1}}$  – кількість критеріїв, що визначаються на рівні L1;  $\nabla$  – математичний знак роздільної диз'юнкції; АНР – англословне позначення MAI;  $\rightarrow$  – символ наступного слідкування;  $\langle \rangle$  – позначення узгоджуваної множини;  $\times$  – символ Декартового добутку.

Після визначення пріоритету  $CR$  на стратегічному рівні L1 наступним кроком реалізації запропонованого трирівневого підходу (див. рис. 2.1) є виконання змістовних процедур L2 тактичного рівня. 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 ( $H$  - людина,  $R$  – ПР,  $HRC$  – колаборація людина-робот,  $TE$  – технологічне обладнання).

Вказане формалізовано представлено наступним чином:

$$\begin{array}{c}
 \left[ f_{S_{L2.1}} : \left( CR \times (E_i | i = \overline{1, n_E}) \times (S_{L2.1} | i = \overline{1, n_{S_{L2.1}}}) \right) \rightarrow \nabla \right. \\
 \left. \begin{array}{l}
 \begin{array}{c}
 \text{AHP} \\
 \downarrow \\
 \langle (H_i, R_i, HRC_i, TE_i) | i = \overline{1, n_E} \rangle \\
 \text{FMCSA } \forall i = \overline{1, n_E} \\
 \downarrow \\
 \langle H, R, HRC, TE \rangle_{|E|>1}
 \end{array} \\
 \begin{array}{c}
 \text{AHP} \\
 \uparrow \\
 \langle H, R, HRC, TE \rangle_{|E|=1}
 \end{array}
 \end{array} \right] \rightarrow \langle H, R, HRC, TE \rangle \quad (2.4)
 \end{array}$$

Функція прийняття рішень  $f_{S_{L2.1}}$  передбачає виконання ряду математичних операцій та за аналогією з  $f_{S_{L1}}$  поділяється на дві функції: перша, де кількість експертів  $|E| > 1$ , та друга з  $|E|=1$ . У функції, де кількість експертів  $|E| > 1$ , отримані результати анкетування експертів, тобто результати тих чи інших оцінок альтернатив за МАІ, обробляються методами НБВА за допомогою згаданого вище оригінального програмного продукту FMCSA. Обробка отриманих результатів виконується аналогічно як і для функції прийнятті рішень  $f_{S_{L1}}$ . Результатами вищевказаної обробки отриманих результатів є впорядкована множина  $\langle H, R, HRC, TE \rangle$ , отриманих різними методами НБВА (див. вище). У функції, де кількість експертів  $|E|=1$  вищевказана обробка НБВА за допомогою програмного продукту FMCSA не виконується, а результати одного експерта  $|E|=1$  щодо  $\langle H, R, HRC, TE \rangle$  є кінцевими.

Вказані пріоритети є вхідними даними для визначення виду технологічної взаємодії між людиною та КПП. Відповідно при визначенні пріоритетів  $HRC$  у розроблюваній роботизованій технології необхідно визначити вид технологічної взаємодії між людиною та КПП, а саме співіснування, кооперацію та колаборацію. Формалізований вираз вказаного є наступним:

Функція прийняття рішень  $f_{S_{L2.2}}$  передбачає виконання ряду математичних операцій та аналогічно  $f_{S_{L2.1}}$  поділяється на дві функції: перша, де множина кількості експертів  $|E| > 1$ , та друга, де кількість експертів  $|E|=1$ .

$$\begin{array}{c}
 \left[ f_{S_{L2.2}} : \left( HRC \times (E_i | i = \overline{1, n_E}) \times (S_{L2.2} | i = \overline{1, n_{S_{L2.2}}}) \right) \rightarrow \nabla \right. \\
 \left. \begin{array}{l}
 \begin{array}{c}
 \text{AHP} \\
 \downarrow \\
 \langle (CR^k_i) | i = \overline{1, n_E} \rangle \\
 \text{FMCSA } \forall i = \overline{1, n_E} \\
 \downarrow \\
 \langle CR^k \rangle_{|E|>1}
 \end{array} \\
 \begin{array}{c}
 \text{AHP} \\
 \uparrow \\
 \langle CR^k \rangle_{|E|=1}
 \end{array}
 \end{array} \right] \rightarrow \langle CR^k \rangle \quad (2.5)
 \end{array}$$

У функції, де кількість експертів  $|E| > 1$ , отримані результати анкетування експертів, тобто результати тих чи інших оцінок альтернатив за МАІ, проходять обробку методами НБВА за допомогою програмного продукту FMCSA. Обробка отриманих результатів виконується аналогічно, як і для функції прийнятті рішень  $f_{SL2.1}$ . Результатами вищевказаної обробки отриманих результатів є впорядкована множина видів технологічної взаємодії, тобто видів колаборації,  $\langle Coex, Coop, Coll \rangle$  за різними методами НБВА вказаними вище.

У функції, де кількість експертів  $|E|=1$ , вищевказана обробка НБВА за допомогою програмного продукту FMCSA не виконується, а результати одного експерта щодо  $\langle Coex, Coop, Coll \rangle$  є кінцевими. Тобто визначається нечітка оцінка між видами колаборації з наданням пріоритетів одному з них, що може бути представлено нижче наведеним кортежем (2.6):

$$\langle CR^k | k \in (Coex, Coop, Coll) \rangle. \quad (2.6)$$

Змістом рівня L3 є узагальнення існуючих напрацювань, наприклад, [4, 9-25] щодо випрацювання відповідних рекомендацій для виконання (розв'язування задач) цього виконавського рівня.

Одним із напрямків реалізації рівня L3 є проведення процедури атестації метрики маніпуляційної системи ПР або КПР. Проведення даної процедури полягає у багаторазовому розв'язуванні задач зворотної кінематики на множині ланок маніпуляційної системи аналізованих ПР або КПР із збереженням орієнтації кінцевого елемента маніпуляційної системи, наприклад, затискного пристрою (ЗП). Формалізоване представлення процесу атестації метрики маніпуляційної системи (МС) КПР висвітлено нижче наведеним виразом (2.7):

$$(f_{L3k} | k = \overline{1, n_{L3}}) : \left( (l_i | i = \overline{1, n_l}) \times (q_j | j = \overline{1, n_q}) \right) | n_i \geq n_q \rightarrow \\ (P = WAV_P; V_P(V, H)). \quad (2.7)$$

Процес атестації метрики, що представлений виразом (2.7), визначається наступними параметрами:

- $l_i$  – це позначення кожної  $i$ -ої ланки МС КПР, тому відповідно  $n_l$  – це загальна кількість ланок МС КПР;
- $q_j$  – це символ узагальненої координати (УК), тому відповідно  $n_q$  – це загальна кількість УК (ступенів рухомості) МСПР;
- символом  $n_q$  позначено кількість УК, що задіяні при атестації.

З огляду на зміст та сутність процесу атестації метрики МС ПР розв'язування задач автоматизованої атестації метрики МСПР зводиться до

реалізації множини обчислювальних процедур  $(f_{L3k} | k = \overline{1, n_{L3}})$  загальною кількістю  $n_{L3}$ , що перетворює параметри метрики МС ПР множини ланок  $(l_i | i = \overline{1, n_l})$  загальною кількістю  $n_l$ , множини узагальнених координат  $(q_j | j = \overline{1, n_j})$  загальною кількістю  $n_j$ , причому  $n_i > n_q$ , в параметр атестації  $P$ . В даному випадку  $P$  – це вектор  $V_p$  параметра  $P$ , який аналізується щодо його положення в робочій зоні (WA) ПР, тобто в СК ПР.  $V_p$  може бути направленим і тому дослідженим під будь-яким кутом щодо вертикалі  $V$  та/або горизонталі  $H$ , тобто  $VH$ .

Математична модель процесу атестації метрики МСПР (вираз (2.7)) в термінах теорії множин представляється сюр'єктивним відображенням (символ  $\rightarrow$ ) декартового добутку (символ  $\times$ ) вказаних вище параметрів метрики МС ПР  $(l_i)$  та  $(q_j)$  на досліджуваний параметр атестації  $P$ .

Досліджуваний параметр  $P$  у виразі (2.7) визначається як інформація про робочу зону  $WAV_p$  із збереженням вектору параметра  $V$  (вертикальна вісь), або  $H$  (горизонтальна вісь). В даному представленні для спрощення розуміння процесу атестації метрики МС КПР та візуалізації отриманих результатів висвітлено два варіанти збереження орієнтації ЗП у просторі, а саме у вертикальній орієнтації  $V$  та у горизонтальній орієнтації  $H$ . Детальне застосування та результати атестації метрики МС КПР див. далі.

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

$$f = \langle f_{S_{L1}}, f_{S_{L2}}, f_{S_{L3}} \rangle, \quad (2.8)$$

Дана упорядкована послідовність не заперечує тривірневному пірамідальному представленню пропонованого підходу та системно доповнює загальну картину системності. Кожен із елементів кортежу в (2.8) може трактуватись як такий, що системно описує відповідні функції системних технологічних рішень на кожному із рівнів пропонованого 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 аванпроекування КРТ як невід'ємної складової автоматизованої системи технологічної підготовки КРМСВ.

Запропонований вище 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 КРМСВ, що дозволяє визначити

можливість впровадження КРТ у виробництво, визначати розподіл завдань між людиною, обладнанням, КІП або взаємодію людини та КІП та визначати вид технологічної взаємодії між людиною та КІП. 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 у сфері такої відносно молодій галузі промислової робототехніки, якою є колаборативна робототехніка.

### **2.1.2. SADT-представлення загальної послідовності розв'язуваних завдань**

Вищезгаданий трирівневий системний підхід при аванпроектуванні КРТ передбачає виконання певної визначеної послідовності дій, які починаються з формування інформаційного базису та закінчуються вихідною обробленою та сформованою для представлення інформацією, яка є необхідною для ТПІг КРТ на початкових етапах. Послідовність, а також потоки вхідних та вихідних даних пропонується представити за допомогою SADT-діаграм, що комплексно та в повній мірі відобразить принцип роботи пропонованого системного трирівневого підходу.

SADT (Structured Analysis and Design Technique) – це сукупність методів, правил і процедур, призначених для побудови функціональної моделі об'єкта будь-якої предметної області. В основі цього методу моделювання систем лежить опис системи, створюваного за допомогою природної мови, що дозволяє вільно описати функціонування моделі, що моделюється. На основі графічних засобів SADT дескриптивний опис системи забезпечується зображенням її моделі, яке практично повністю усуває можливу неоднозначність семантичного опису. Іншими словами SADT – це методологія, розроблена спеціально для того, щоб полегшити опис та розуміння штучної системи середньої складності та її середовища до визначення вимог до програмного забезпечення або чогось іншого [55].

SADT використовується як схематична нотація в концептуальному проектуванні програмного забезпечення та системної інженерії для ескізу програм [56], для більш детального структурного аналізу, для визначення вимог [57] і структурованого проектування тощо.

Застосування SADT-методології засноване на формалізованому процесі створення системи при розбитті його на наступні фази:

1. Аналіз – визначення того, що система буде робити.
2. Проектування – визначення підсистем та їх взаємодія.
3. Реалізація – розробка кожної із підсистем окремо.
4. Об'єднання – з'єднання підсистем в єдине ціле.

5. Тестування – перевірка роботи системи.
6. Установка – введення системи в дію.
7. Функціонування – використання системи.

SADT-модель – це точний, повний і адекватний текстовий і графічний опис системи, що має конкретне призначення, виконане у вигляді ієрархічно організованої сукупності діаграм, створених на основі стандартного представлення даних. Це опис системи, у якій є єдиний суб'єкт, мета і одна точка зору за допомогою SADT-методології. Така модель являє собою сукупність ієрархічно впорядкованих та взаємопов'язаних діаграм, організованих у вигляді деревоподібної структури, де верхня діаграма є найбільш загальною, а найнижчі найбільш деталізовані.

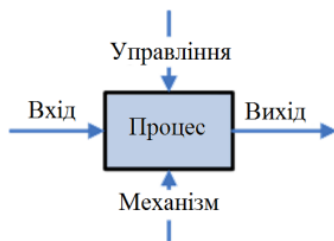
У SADT-моделях використовуються як природна, так і графічна мови. Для передачі інформації про конкретну систему джерелом природної мови служать люди, що описують систему, а джерелом графічної мови – сама методологія SADT. Графічна мова SADT забезпечує структуру та точну передачу моделі семантики природної мови. Графічна мова SADT організує природну мову цілком певним і однозначним чином, завдяки чому SADT дозволяє описувати системи, які донедавна не піддавалися адекватному уявленню. В основі методології SADT лежать два основні принципи, а саме: SADT-блоки та декомпозиція.

На основі SADT-блоків створюється ієрархічна багаторівнева модульна система, кожен рівень якої являє собою закінчену систему (блок), що підтримується та контролюється системою (блоком), що знаходиться над нею.

Використання декомпозиції дозволяє розділити кожен блок, який розуміється як єдине ціле, на свої складові, що описуються на більш детальній діаграмі. Процес декомпозиції проводиться до досягнення необхідного рівня подробиці опису. Діаграма обмежується 3-6 блоками для того, щоб деталізація здійснювалася поступово. Замість однієї громіздкої моделі використовується кілька невеликих взаємозалежних моделей, значення яких взаємно доповнюють одна одну, роблячи зрозумілою структуру складного об'єкта.

На рис. 2.2. зображено розташування розглянутих елементів методу SADT [55].

Діаграми – це головні компоненти моделі, всі функції інформаційної системи та інтерфейси на них представлені як блоки і дуги. Місце з'єднання дуги з блоком визначає тип інтерфейсу. Керуюча інформація входить в блок зверху, в той час як інформація, яка піддається обробці, показана з лівого боку блоку, а результати виходу показані з правого боку (див. рис. 2.2). Механізм (людина або автоматизована система), який здійснює операцію, представляється дугою, що входить в блок знизу.



*Рис. 2.2 – Елементарний функціональний блок SADT та інтерфейсні дуги, що ілюструють його системність [55]*

Діяльність можна описати за допомогою так званих ICOMs компонентів (Inputs, Outputs, Controls, and Mechanisms) – її входів (Inputs), виходів (Outputs), елементів керування (Controls) та механізмів (Mechanisms).

Проведені дослідження щодо початкових етапів ТПг КРМСВ за пропонованим системним тривірневим підходом цього процесу (рис. 2.1) проілюстровано за допомогою SADT-представлення (рис. 2.3). Доцільно наголосити, що кольори палітри блоків кожного з рівнів пропонованого тривірневого підходу на рис. 2.1 мають відповідність до кольорів на рис. 2.3, рис. 2.4, рис. 2.5, рис. 2.6 та рис. 2.7 щодо змісту та виконуваних обчислювальних процедур прийняття технологічних рішень.

Загалом проведені дослідження відтворюють запропоновану послідовність реалізації тривірневого підходу (рис. 2.1), яка передбачає виконання відповідних процедур прийняття технологічних рішень на описаних вище рівнях L1, L2, L3.

Так, стратегічний рівень L1 представлено блоком A2L1, для підрівнів тактичного рівня L2.1 та L2.2 – відповідно блоками A3L2.1 та A3L2.2, а виконавський рівень L3 – блоком A4L3 (рис. 2.3).

SADT-діаграма змісту блоку A1 (рис. 2.4) відображена блоками A1.1-A1.5, які відображають деталізовану інформацію про 3D-модель об'єкта виробництва (A1.1), технологічне обладнання (A1.2), про виріб (A1.3), про ТСС (A1.4) та узагальнення інформації для використання відповідної методики прийняття рішень (A1.5).

В блоці A1.1 (рис. 2.4) вхідною інформацією є конструкторська документація, де, наприклад, для складальних технологій керуючою інформацією є розміри деталі, кількість елементів деталі та види з'єднань між деталями, а механізмом обробки вищевказаних даних є CAD-системи, наприклад, Solidworks.

Вихідними даними з блоку A1.1 є частина необхідної інформації про виріб (O), яка в першу чергу відображає геометричні особливості форми технологічного об'єкта.

В блоці A1.2 вхідною інформацією є технічні параметри та функціональні можливості технологічного обладнання, керуючою інформацією є інтерфейси управління, механізмами обробки вищевказаних даних є САМ-системи, а вихідними даними є інформація про технологічні можливості обладнання.

Блок A1.3 доповнює вхідну інформацію з блоку A1.2 даними про вагу та матеріал, а також визначеною технологією виготовлення (або складання) виробу, що формує комплексну інформацію про виріб (O).

Вихідна інформація з блоку A1.2 та A1.3 є вхідною інформацією для блока A1.4, який визначає, наприклад, для складальних технологій, вид ТСС та послідовність складання. Вихідна інформація з блоків A1.2, A1.3 та A1.4 є вхідною неупорядкованою інформацією для блоку A1.5, в якому виконується аналіз та систематизація отриманої інформації та формування критеріїв (S) для методики прийняття рішень (MAI). Вихідними даними SADT-діаграми змісту блоку A1 є інформаційні потоки, що необхідні для реалізації наступного блоку A2L1.

Для детального опису процесів та потоків даних в блоці A2L1 (рис. 2.3), який відображає стратегічний рівень L1, розроблено SADT-діаграма змісту блоку A2L1 (рис. 2.5).

Вихідними даними з блоку A1.1 є частина необхідної інформації про виріб (O), яка в першу чергу відображає геометричні особливості форми технологічного об'єкта.

В блоці A1.2 вхідною інформацією є технічні параметри та функціональні можливості технологічного обладнання, керуючою інформацією є інтерфейси управління, механізмами обробки вищевказаних даних є САМ-системи, а вихідними даними є інформація про технологічні можливості обладнання.

Блок A1.3 доповнює вхідну інформацію з блоку A1.2 даними про вагу та матеріал, а також визначеною технологією виготовлення (або складання) виробу, що формує комплексну інформацію про виріб (O).

Вихідна інформація з блоку A1.2 та A1.3 є вхідною інформацією для блока A1.4, який визначає, наприклад, для складальних технологій, вид ТСС та послідовність складання. Вихідна інформація з блоків A1.2, A1.3 та A1.4 є вхідною неупорядкованою інформацією для блоку A1.5, в якому виконується аналіз та систематизація отриманої інформації та формування критеріїв (S) для методики прийняття рішень (MAI). Вихідними даними SADT-діаграми змісту блоку A1 є інформаційні потоки, що необхідні для реалізації наступного блоку A2L1.

Для детального опису процесів та потоків даних в блоці A2L1 (рис. 2.3), який відображає стратегічний рівень L1, розроблено SADT-діаграма змісту блоку A2L1 (рис. 2.5).

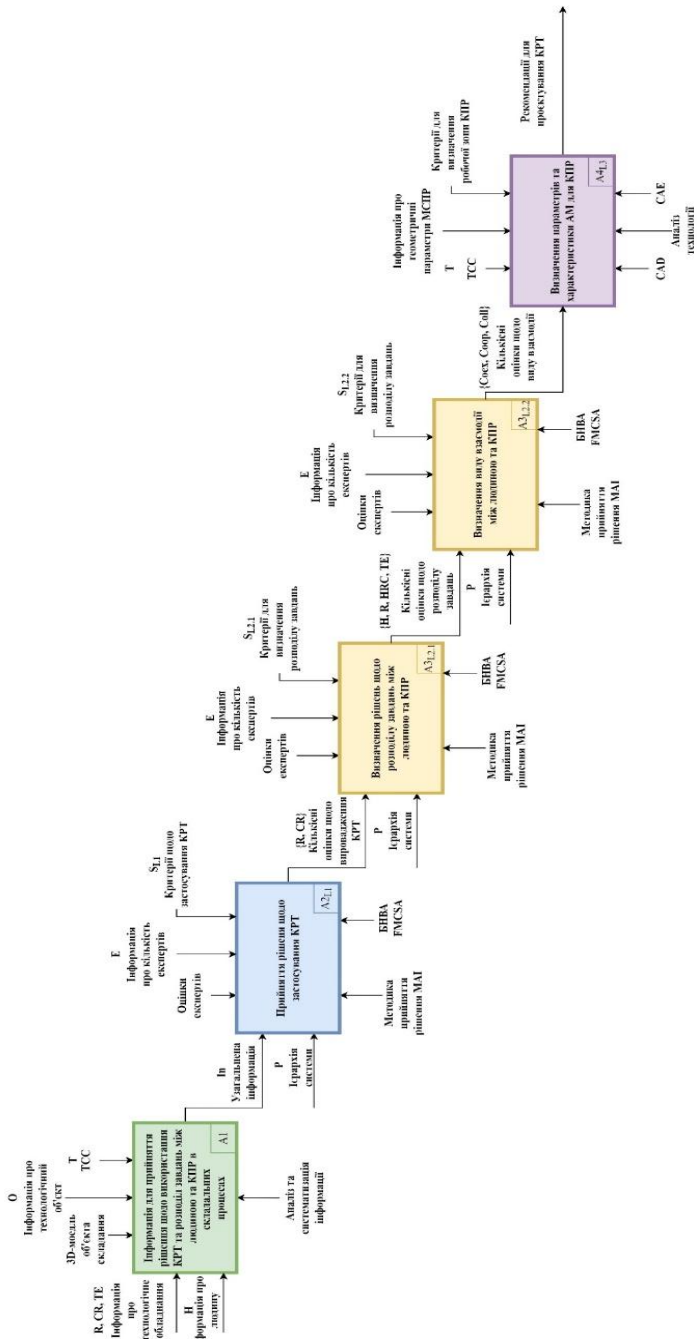


Рис. 2.3 – SADT-представления сущности пропонуваного

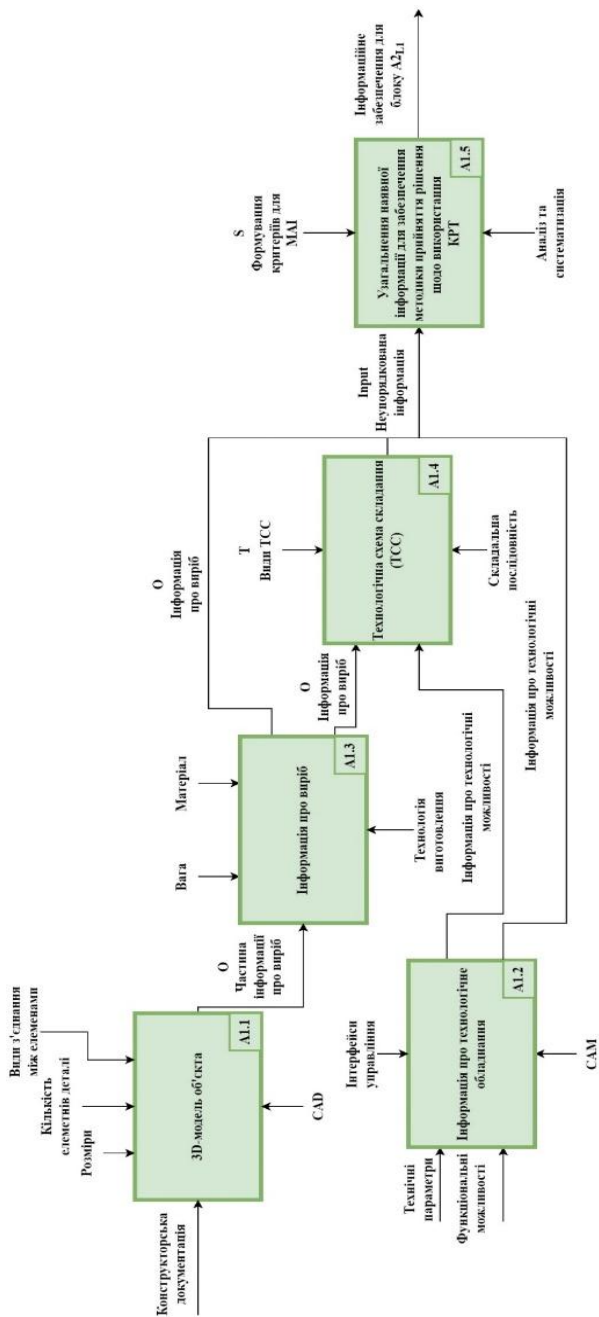


Рис. 2.4 – SADT-діаграма змісту блоку AI

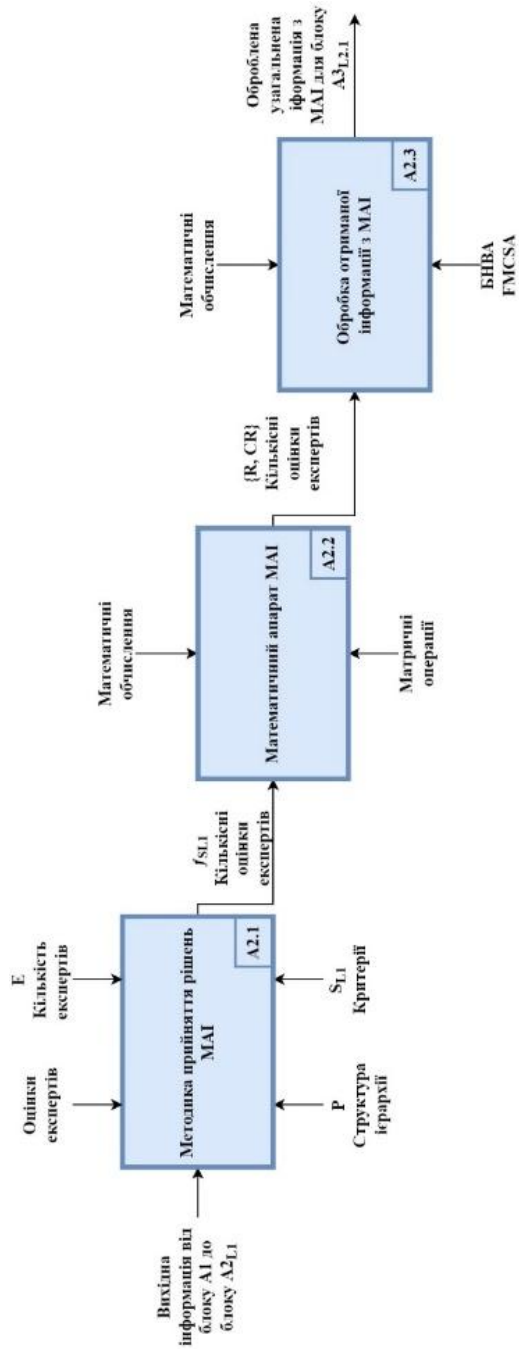


Рис. 2.5 – SADT-діаграма змісту блоку A2L

Вищевказана SADT-діаграма складається з трьох блоків: A2.1 – методика прийняття рішень; A2.2 – математичний апарат MAI; A2.3 – обробка отриманої інформації з MAI. Вхідною інформацією для блоку A2.1 є вихідна інформація з SADT-діаграми змісту блоку A1, яка відображає локальні критерії MAI (SL1) та розміщується у ієрархії (P) (див. далі). Керуючою інформацією в даному випадку є кількість експертів |E| та їх кількісні оцінки щодо конкретного аналізованого локального критерія, що в своїй сукупності формують вихідну функцію  $f_{SL1}$  (див. вираз (2.4)).

В блоці A2.2 виконується подальша обробка отриманих даних з блоку A2.1 за допомогою математичних обчислень, основою яких є матричні операції, що формує вихідну інформацію щодо кількісних оцінок визначення можливості застосування ПР та/або КРТ, тобто формується упорядкована множина  $\langle R, CR \rangle$  відповідно до пропонованого трирівневого підходу, відтворених вище рис. 2.1 та виразом (2.1), для кожного n-го експерта ( $E_n$ ).

Блок A2.3 відображає обробку вихідних даних, які є кортежем  $\langle R, CR \rangle$  для кожного з експертів, від блоку A2.2 за допомогою математичних обчислень методу багатокритеріального нечіткого вибору альтернатив (БНВА). Кінцевою вихідною інформацією з блоку A2.3 є оброблена узагальнена інформація кількісних оцінок експертів щодо можливості застосування «класичних» роботизованих технологій та/або КРТ в цілому.

SADT представлення тактичного рівня L2 (рис. 2.1), а саме підрівнів L2.1 та L2.2, деталізовано зображено на рис. 2.6 (SADT-діаграма змісту блоку A3L2.1) та рис. 2.7 (SADT-діаграма змісту блоку A3L2.2). Послідовність дій роботи з інформацією в блоках A3L2.1 та A3L2.2 ідентична діям в попередньому блоці A2L1, тобто вхідна та вихідна інформація з блоків за змістом відрізняється, а методи її обробки ідентичні. Відповідно для блоку A2.1.1 (рис. 2.6) вхідною є вихідна інформація з блоку A2L1, методи обробки та роботи з вхідною інформацією ідентичні вищевказаним в блоці A2.1 (рис. 2.5), проте вихідна інформація сформована функцією  $f_{SL2.1}$ , що є частиною вихідної інформації тактичного рівня L2, що загалом відтворюється функцією  $f_{SL2}$ .

Блок A2.1.2 на рис. 2.6 ідентичний блоку A2.2 на рис. 2.5 щодо обробки інформації, проте має вихідну інформацію у вигляді упорядкованої множини  $\langle H, R, HRC, TE \rangle$ , що визначає розподіл завдань між людиною та обладнанням (див. рис. 2.1). Вихідною інформацією з A2.1.3 є оброблена узагальнена інформація кількісних оцінок експертів щодо розподілу завдань між людиною, КПП та технологічного обладнання.

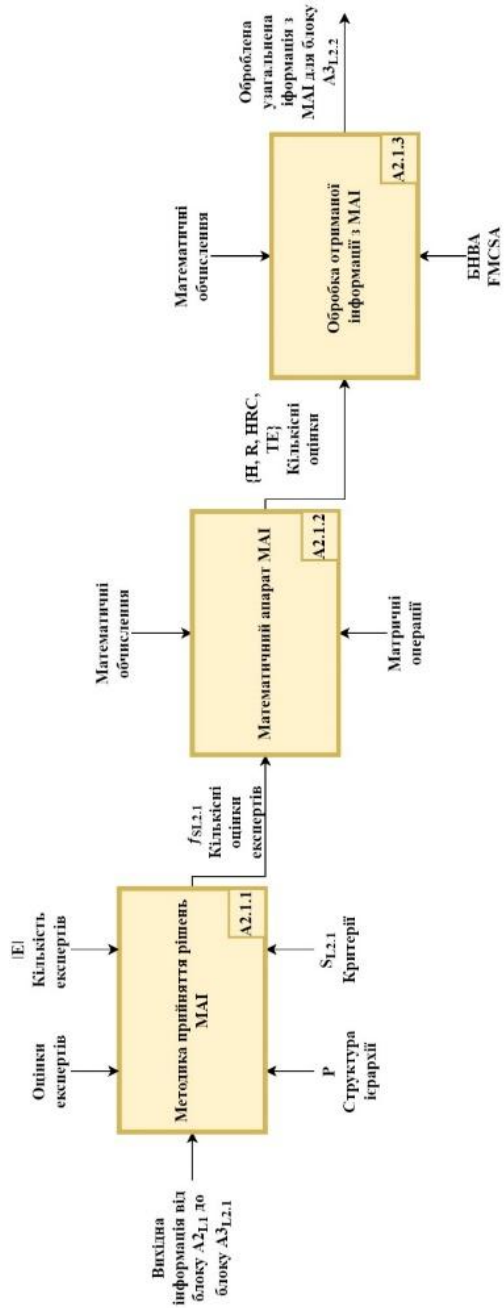


Рис. 2.6 – SADT-діаграма змісту блоку А3.12.1

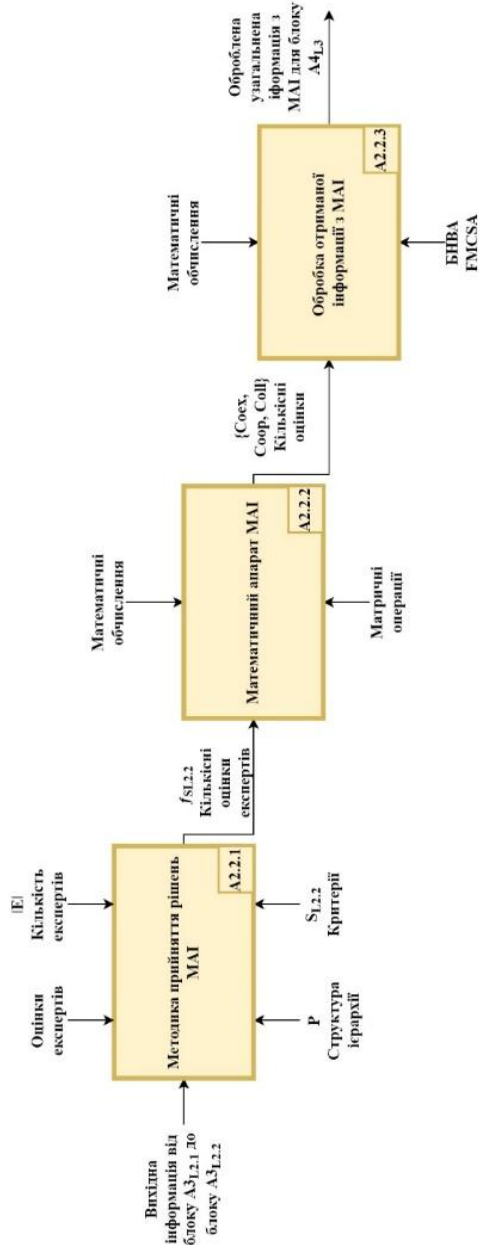


Рис. 2.7 – SADT-діаграма змісту блоку A3.12.2

Блок А3Л2.2, SADT-діаграма якого зображена на рис. 2.7, відтворює вище вказану послідовність обчислень блоку А3Л2.1 з відмітністю у вхідній і вихідній інформації. Вхідною інформацією блоку А3Л2.2 є вихідна інформація блоку А3Л2.1, а вихідною інформацією є оброблена узагальнена інформація кількісних оцінок експертів щодо виду взаємодії між людиною та КПП  $\{Coex, Coop, Coll\}$ , яка подана на рис. 2.1 тактичного рівня L2.2.

Виконавський рівень L3 характеризується наявністю великої кількості напрацювань у сфері КРМСВ, що фрагментарно або повністю можуть бути використані при ТПГ КРМСВ.

## **2.2. Методика проведення експертного опитування методу МАІ для запропонованого тривірневого підходу**

### **2.2.1. Загальні положення**

МАІ є комплексним процесом прийняття рішень, який умовно можна поділити на декілька етапів [57].

*Етап 1. Побудова ієрархічної структури задачі.*

Аналіз проблеми прийняття рішень в МАІ починається з побудови ієрархічної структури, яка включає мету, критерії, альтернативи та інші фактори, що впливають на вибір. Кожен елемент ієрархії може представляти різні аспекти задачі, що розв'язується, причому до уваги можуть бути прийняті як матеріальні, так і нематеріальні чинники, вимірювані кількісні параметри та якісні характеристики, об'єктивні дані та суб'єктивні експертні оцінки.

*Етап 2. Визначення пріоритетів елементів ієрархічної структури.*

Наступним етапом аналізу є визначення пріоритетів, що відображають важливість або перевагу елементів побудованої ієрархічної структури, за допомогою процедури парних порівнянь. Безрозмірні пріоритети дозволяють обґрунтовано порівнювати різні фактори, що є важливою особливістю МАІ.

Для встановлення відносної важливості елементів ієрархії використовується шкала відношень Сааті. Ця шкала надає можливість експерту встановлювати ступені переваги одного фактору перед іншим шляхом присвоєння відповідних числових значень.

Попарні порівняння за шкалою Т. Сааті виконуються за наступним виразом:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}; \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}; \quad a_{ii} = 1. \quad (2.9)$$

Правомірність цієї шкали доведена практично при порівнянні з багатьма іншими шкалами. При використанні зазначеної шкали експерт, порівнюючи два об'єкти в змісті досягнення цілі, розташованої на вищому рівні ієрархії, повинен поставити у відповідність цьому порівнянню число в інтервалі від 1 до 9 або обернене до нього. Якщо важко встановити кількість проміжних градацій між абсолютною та слабкою перевагою або це непотрібно для конкретної задачі, може бути використана шкала з меншою кількістю градацій. Гранично шкала має лише дві оцінки: 1 - об'єкти рівнозначні; 2 - перевага одного об'єкта над іншим.

Після побудови ієрархії використовується метод порівняння її елементів. Якщо приймається метод парного порівняння, то будується множина матриць парних порівнянь. Для цього в ієрархії виділяють елементи двох типів: елементи-«батьки» та елементи-«нащадки». Елементи-«нащадки» впливають на відповідні елементи вищого рівня ієрархії-«батьки» [57].

Матриці парних порівнянь будуються для всіх елементів «нащадків», що відносяться до певного «батька». «Батьками» можуть бути елементи будь-якого рівня ієрархії, за винятком останнього, де зазвичай розташовані альтернативи.

#### *Етап 3. Визначення альтернатив.*

Елементи, які підлягають ранжуванню з використанням матриці парних порівнянь, впорядковуються на основі аналізу основних власних векторів цієї матриці. Основний власний вектор визначає пріоритети, а власне значення відображає рівень узгодженості суджень. Обчислення головного власного вектору  $W$  додатної квадратної матриці  $A$  проводиться на підставі рівності:

$$AW = \lambda_{max}W, \quad (2.10)$$

де  $\lambda_{max}$  – максимальне власне число матриці  $A$ ;

$$W = \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ \tilde{w}_i \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix} \text{ – головний власний вектор матриці } A. \quad (2.11)$$

Якщо власний вектор  $W$  нормований (сума його елементів дорівнює 1), тоді він використовується як вектор пріоритетів для матриці  $A$ . Якщо власний вектор  $W$  не має одиничної норми, його потрібно нормалізувати. Для цього необхідно знайти суму всіх його елементів і утворити новий вектор  $W'$ , елементи якого є відношенням елементів вектору  $W$  на знайдену суму:

$$W' = (w'_i)_{i=\overline{1,n}}; \quad w'_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}. \quad (2.12)$$

де  $W'$  – новий вектор, елементи якого є відношення елементів вектору  $W_i$  на суму всіх його елементів.

### 2.2.2. Використання МАІ при аванпроектванні КРМСТ

Ієрархія локальних критеріїв МАІ є відображенням мети, або цілі, що поставлена до вирішення, критеріїв, за якими експерти будуть виконувати, оцінювання, та альтернатив, які є по сутності варіантами вирішенням тієї чи іншої проблеми. Компонівка та розмір ієрархії залежить від комплексності, складності та широті поставлених завдань, а також від особливостей критеріїв, які в свою чергу можуть мати підкритерії, відомі як *subcriterion*.

Для розробленого трирівневого підходу, описаного в п. 2.1.1, пропонується розглянути приклад застосування МАІ для складання валу ведучого одноступінчастого редуктора конічного [59] (див. рис. 2.8, рис. 2.9 та рис. 2.10).

На рис. 2.8 зображено 3D-модель редуктора одноступінчастого конічного. Пропонований для прикладу редуктор складається з корпусу, який в свою чергу складається з двох частин, а саме з верхньої частини 1 на (рис. 2.9), а також станини або нижньої частини 2 (рис. 2.9). На станині виконано отвори для кріплення редуктора до нерухомої основи (на рис. 2.9 не показані).

Механізм редуктора складається з двох вузлів, а саме вузла валу ведучого та вузла вихідного веденого валу (рис. 2.8). Вузли складаються із різних елементів (деталей) та їх з'єднань. Наприклад, елементи ведучого вала на рис. 2.9 – це муфта 13, зубчасте колесо конічне 23, вал 24, шпонка 25, підшипник 26, втулка 27, накладка 28, планка для болтового з'єднання 29, болти 30. Вузол вихідного валу складається з зубчатого колеса 32, валу 33, шпонки 34, стопорного кільця 35, підшипників 36, муфти 37. Основа складається з накладок з отворами 8, 12, втулки 9, прокладок 10, 11, а також болтами 14, 18 для подальших з'єднань.

Виконання пропонованого трирівневого підходу, наприклад, в складальних виробництвах передбачає розроблену технологію, тобто послідовність операцій складання елементів та/або деталей, вузлів виробу. Для ілюстрації технології складання валу ведучого редуктора одноступінчастого виконано поелементну декомпозицію складного вузла.

На рис. 2.9 проставлені всі елементи та деталі вузла, які задіяні у складанні вала ведучого редуктора конічного одноступінчастого.

## BEVEL GEARBOX

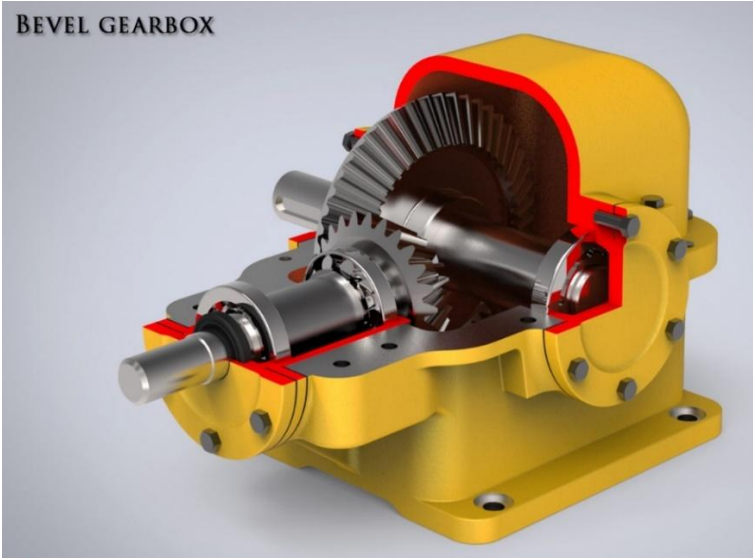


Рис. 2.8 – Редуктор одноступінчастий конічний, загальний вигляд [59]

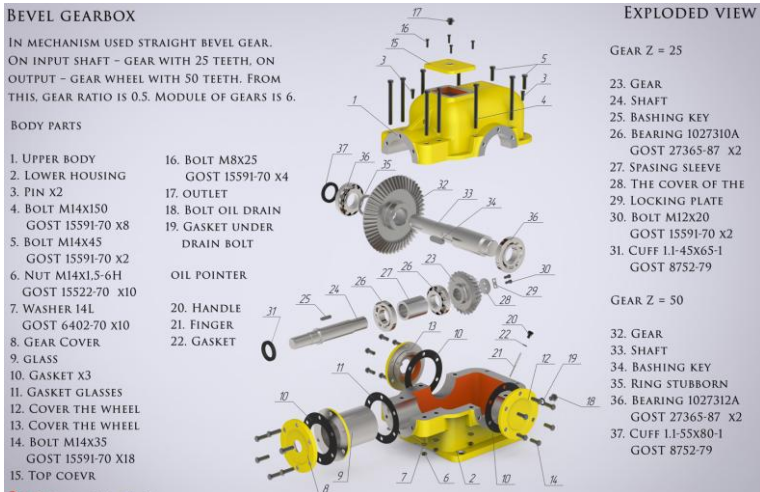


Рис. 2.9 – Редуктор одноступінчастий конічний, подетальна декомпозиція [59]

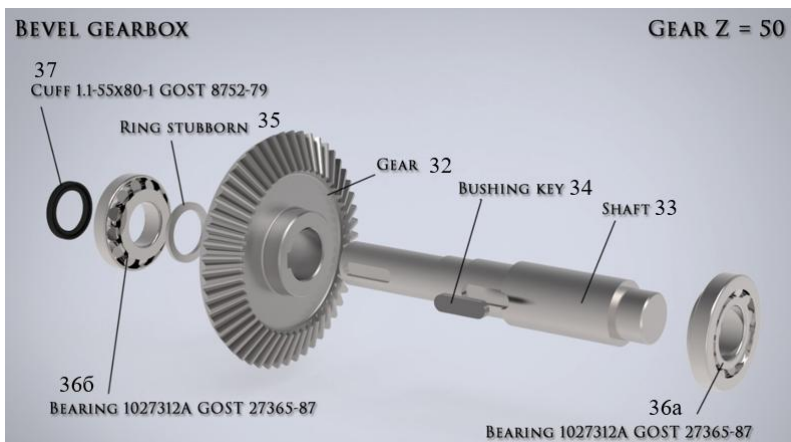


Рис. 2.10 – Вал ведучий редуктора конічного одноступінчастого [59]

Покрокова (кроки К1-К8) послідовність (маршрут) складання валу ведучого наступна (за позначеннями рис. 2.11):

К1. Встановити вал 33 у затискний пристрій (додаткове обладнання, тут не представлено).

К2. З'єднати підшипник 36а з валом 33 з його правого торця.

К3. Встановити шпонку 34 на вал у зборі (33+36а), витримуючи вертикальне розташування шпонки у валу, із забезпеченням взаємної орієнтації вузла колесо-шпонка.

К4. З'єднати колесо зубчасте 32 з валом 33 із закріпленням за допомогою шпонки 34.

К5. Встановити кільце стопорне 35 на вал 33 з його лівого торця.

К6. Вставити підшипник 366 на вал 33 з його з лівого торця.

К7. Встановити манжету 37 на вал 33 з його лівого торця.

К8. Зняти складений вузол із пристосування.

Відповідно до маршруту складання розроблено ТСС, яка за видом є подетально-вузловим складанням, що представлена на рис. 2.11.

Складання даного вузла є одночасно простою та складною задачею для виконання лише ПР, або лише людиною чи ОТО. Вище вказане пов'язане з технологічними особливостями вузла та технологією з'єднання компонентів між собою. Вага деяких компонентів є високою для ергономічної та безпечної роботи людини, а особливості процесу складання є важко реалізованими лише для ПР. Тому в даному випадку вигідно розкривають свій потенціал та можливості КРТ, де сильні сторони людини та робота можливо комбінувати.

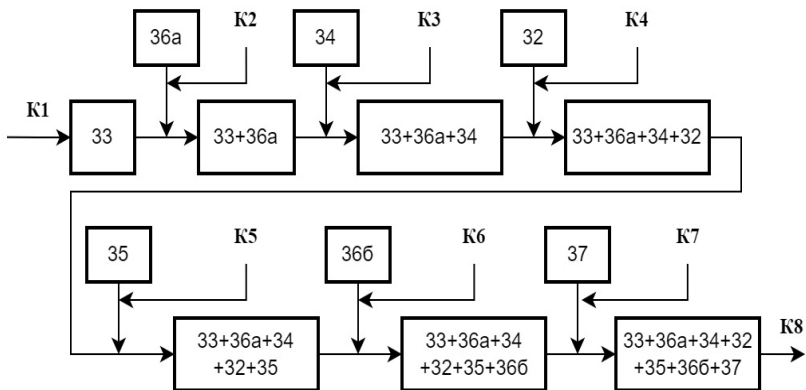


Рис. 2.11 – ТСС подетально-вузлового складання валу ведучого редуктора одноступінчастого конічного

Відповідно до вищеописаного тривіневого підходу (див. п. 2.1.1) виконання стратегічного рівня L1 передбачає визначення можливості застосування КРТ на виробництві за допомогою МАІ. Розроблено схему ієрархії (рис. 2.12), в якій метою є визначення можливості застосування КРТ, критерії S1L1 – S4L1 є безпека, продуктивність, гнучкість налаштування та простота використання. Вище вказані критерії є найпоширенішими атрибутами автоматизованих, роботизованих та колаборативних виробництв. Альтернативами є CRL1 та RL1, тобто застосування КРТ або «класичних» роботизованих та/або автоматизованих технологій.

Методика визначення альтернатив, тобто варіантів визначення критеріїв між  $CR_{L1}$  та  $RL1$ , передбачає виконання базового алгоритму дій при застосуванні МАІ, наприклад, вказаний в п. 2.2.1. Спочатку експерти визначають вагові коефіцієнти кожного з локальних критеріїв  $S1_{L1}$  –  $S4_{L1}$  за допомогою попарних порівнянь за шкалою Т. Сааті. Наступним кроком є визначення пріоритетів локальних критеріїв  $S1_{L1}$  –  $S4_{L1}$  відносно альтернатив  $CR_{L1}$  та  $RL1$ , після чого виконується визначення альтернатив. Кінцевим результатом використання МАІ є кількісне оцінка щодо альтернатив  $CR_{L1}$  та  $RL1$  у обмеженому числовому інтервалі, які в сумі дають 1. Таким чином, експертне, відносно суб'єктивне оцінювання нечітких понять та питань щодо можливості впровадження при складанні, як приклад, вузла валу ведучого, в КРТ можливо виконати із використанням МАІ.

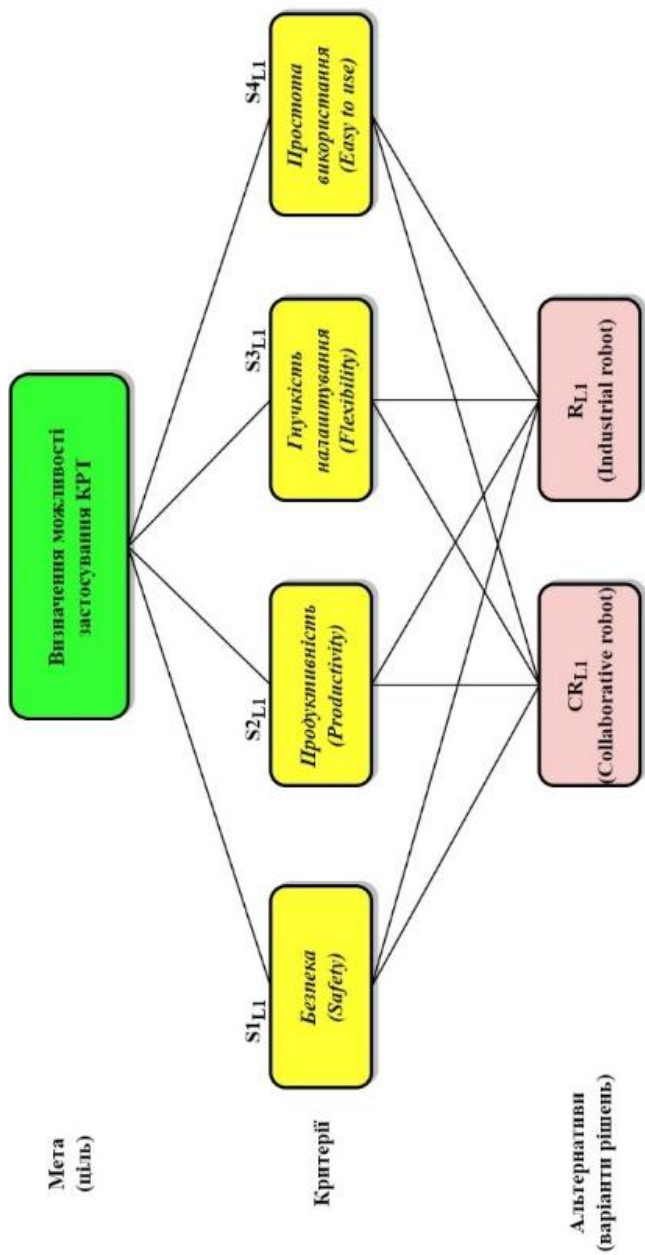


Рис. 2.12 – Схема ієрархії при використанні МАІ для складання валу ведучого редуктора одноступінчастого кінцевого, рівень L1

## 2.3. Стисла методика використання НБВА

В контексті розв'язуваних в даному дослідженні задач методика НБВА використовується тільки для випадку  $|E| > 1$ , тобто для кінцевої множини експертів. Це передбачає використання певних експертних процедур. В даному випадку експертними процедурами, що є вхідними даними для розв'язування задач методами НБВА, є результати, отримані з МАІ для випадку кінцевої кількості експертів  $|E| > 1$ . Таким чином в НБВА експертні процедури використовуються опосередковано. Тому матриця експертного опитування для НБВА має вигляд пріоритетних оцінок за результатами МАІ.

Сама процедура НБВА реалізована програмно у вигляді ПП FMCSA. Її функціонування визначається вхідними даними, які як вказувалось вище, є результатами МАІ для  $|E| > 1$ .

Реалізація НБВА в даному ПП виконується за рахунок виконання семи кроків. При цьому в результаті виконання 6-го кроку отримуються як неупорядковані нечіткі оцінки із збереженням індексів (попередньо призначених номерів кожного локального критерію вибору), а результатом 7-го кроку є упорядкована множина нечітких оцінок (при неупорядкованості індексів кожного локального критерію вибору).

Не розкриваючи всіх особливостей обчислювальних процедур в даному ПП, методика використання НБВА зводиться до наступного:

- введення початкових даних, що є результатами МАІ у відповідному форматі, наприклад, з використанням таблиць MS Excel;
- вибір методу або декількох методів, за якими будуть обчислюватись кінцеві результати;
- за результатами кроку 7 отримання графічних результатів у вигляді стовпчикових діаграм, або ламаної кривої, що графічно візуалізують з відповідними інформаційними позначеннями отриманих результатів надання пріоритетів.

## 2.4. Розроблені методики атестації метрики маніпуляційних систем колаборативних промислових роботів

### 2.4.1. Загальні положення

Методика проведення атестації метрики МС КПП відповідає формалізованому представленню, яке висвітлене вище виразом (2.7) та алгоритмічному представленню, яке висвітлене далі в п. 4.2. Характерною особливістю даної процедури є комплексність застосування декількох програмних середовищ, що виникла в результаті необхідності підготовки вхідної інформації. Під поняттям вхідна інформація розуміється наявність 3D-моделі аналізованого КПП/ПР з даними про їх технічні параметри та

функціональні можливості. Підготовка 3D-моделі виконується в одному програмному середовищі, наприклад, CAD-програми, наприклад SolidWorks, а інформація про параметри вводиться в іншому програмному продукті, наприклад, RoboDK.

Стисло зміст запропонованої методики атестації метрики ПР як методичної основи вивчення технологічних можливостей КПП та ПР в частині визначення певних параметрів робочої зони виконується за наступною послідовністю дій: структуризація, параметризація, імплементація, дослідження та візуалізація. Саме ця послідовність дій є основою розробленої покрокової методики атестації метрики МС КПП, яка в свою чергу означає реалізацію послідовно виконуваних етапів ЕІ, ЕІІ, ЕІІІ (рис. 2.13).

Перший етап ЕІ (кроки К1 та К2 на рис. 2.13) передбачає створення 3D-моделі ПР або КПП в CAD-середовищі проектування. В даному випадку розглядається один із можливих варіантів програмного забезпечення, а саме SolidWorks [60]. Його особливістю є можливість формування якісних 3D-моделей різних механізмів та мехатронних систем, а також наявність можливості в подальшому конвертувати створені 3D-моделі у формати *stl*, *acis*, *iges*, *step*. Це необхідно для подальшої роботи в інших програмних продуктах (ПП). Варто зазначити, що подальші результати атестації МС КПП або ПР якісно та кількісно залежні від виду конвертації та налаштування збереження деталізації 3D-моделі при конвертації. Вищевказані функціональні можливості є необхідною вимогою до CAD-програм для повної реалізації (крок К1, етап ЕІ, рис. 2.13 ).

Змістом кроку К2 є почергове завантаження 3D-моделей компонентів складових аналізованого КПП/ПР у програмний продукт RoboDK [50], графічний інтерфейс користувача якого представлено на рис. 2.14. Підготовлені 3D-моделі компонентів мають бути завантажені у програмний продукт RoboDK у форматі *stl*. Далі виконується їх налаштування, а саме масштабування та розміщення в робочому просторі. Наступним кроком є фіксація 3D-компоненти аналізованого КПП та виконання їх взаємного розміщення. Компоненти МС КПП/ПР мають бути розміщені один відносно одного за правилами, які визначають рухомі та фіксовані ланки або компоненти МС КПП/ПР. При завершенні налаштування розміщення та фіксації ланок та компонентів МС КПП /ПР необхідно їх перевірити за допомогою консолі керування мехатронною системою (див. рис. 2.14).

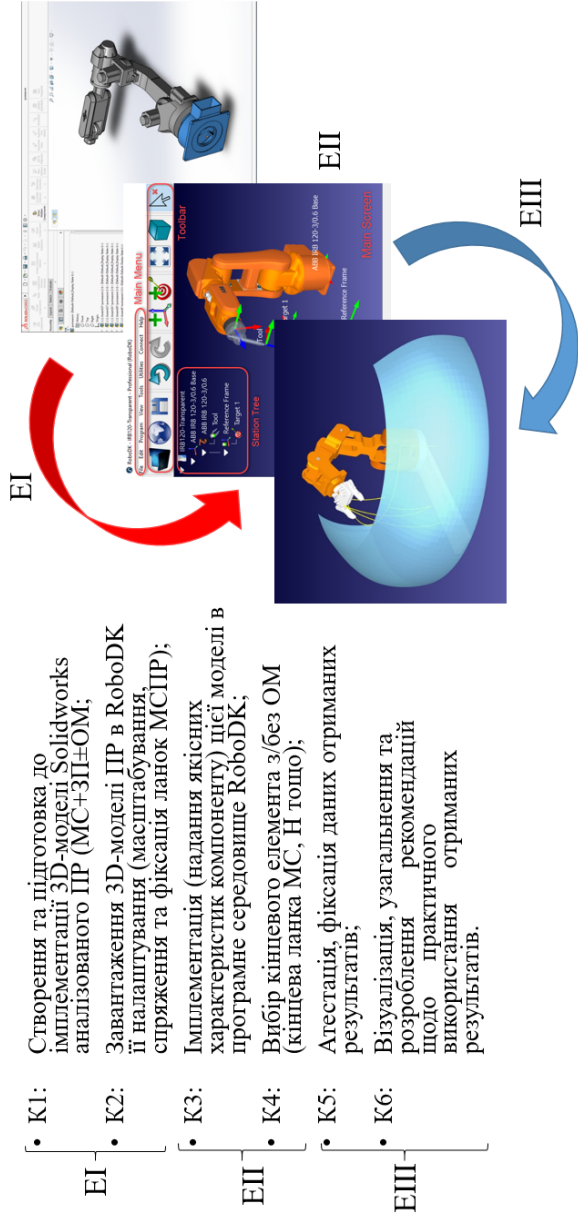


Рис. 2.13 – Спрощена схема розробленої методики автоматизованої атестації метрики МС ІР



Другий етап ЕІІ, що реалізується кроками К3 та К4, передбачає кінцеве налаштування КПП/ПР як єдину механічну систему із попередньо завантажених елементів, а саме 3D-моделей компонентів КПП/ПР.

На другому етапі виконується вибір СК КПП/ПР та кількості ступенів рухомості, тобто параметра DoF (Degrees of Freedom), а також забезпечення якісних та кількісних параметрів відносної рухомості ланок МС та убезпечення різного роду колізій в програмному середовищі RoboDK (К3). Кроком К4 є вибір кінцевого елемента МС, тобто ЗП або інструмента з/без об'єкту маніпулювання (ОМ) в ЗП з відповідними їх геометричними розмірами.

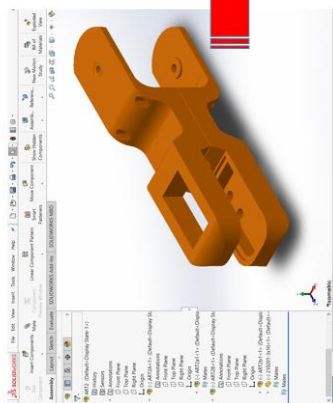
Загальна послідовність дій на етапах Е1 та Е2 (К1-К4) представлена на рис. 2.15, де відслідковується початок роботи в CAD-програмі SolidWorks, а продовження відбувається в програмному продукті RoboDK. На рис. 2.15 висвітлено створення 3D-моделі компонента ланки робота Baccio в SolidWorks на К1, далі процес інтеграції та налаштування МС аналізованого робота (кроки К2-К3) та вибір кінцевого елемента, а саме ЗП і його налаштування.

Виконання кроку К4 на Е2 передбачає комплексну операцію, яка означає вибір виду ЗП КПП/ПР та внесення інформації про ОМ, або про його відсутність. Інформацією про ОМ є його розміри, форма та об'єм. Можливим також є вказання ваги та жорсткості ОМ. Також важливою є інформація про розміщення ОМ в ЗП. Це може бути описано за допомогою конструктивного параметра  $H_{\max}$ , який визначає відстань від найвіддаленішої точки ОМ до точки кріплення ЗП до останньої ланки МС (див. рис. 2.16).

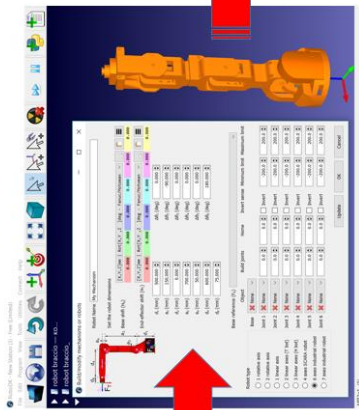
На завершальному етапі ЕІІ кроком К6 виконується процес атестації метрики МС аналізованого КПП, тобто покрокове визначення крайніх граничних точок у робочій зоні ПР, при яких забезпечується збереження заданої орієнтації параметра атестації конструктивних складових кінцевого елемента КПП.

Дана операція має визначену дискретність, яка загалом визначається прийнятим кроком переміщення між  $i$ -ою та  $j$ -ою точками, що визначаються прийнятими дослідником кроками лінійної та кутової дискретизації (К5). При цьому теоретико-методичною основою реалізації кроку К5 є багаторазове розв'язування зворотної задачі кінематики [24] із врахуванням геометричних параметрів 3D-моделі компонентів метрики КПП, тобто ланок МС КПП, ЗП та ОМ (за його наявності). Вказані компоненти очевидним чином визначають параметр атестації Н.

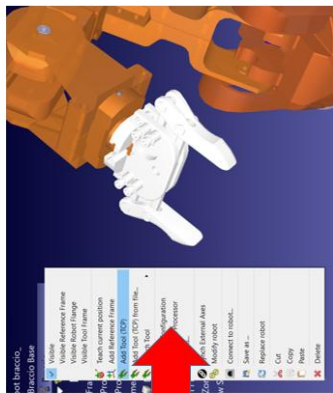
Завершальним кроком К6 атестації метрики МС ПР на ЕІІ є візуалізація отриманої інформації, її узагальнення та розробка рекомендацій щодо практичного використання. Візуалізація забезпечується CAD-програмами, наприклад, SolidWorks чи іншими.



**К1. Створення 3D-моделі ПР**



**К2-К3. Інтеграція 3D-моделі ПР у RoboDK**



**К4. Вибір кінцевого елемента**

*Рис. 2.15 – Покрокова методика атестації МС КІПР Е1 та Е2 (К1-К4)*

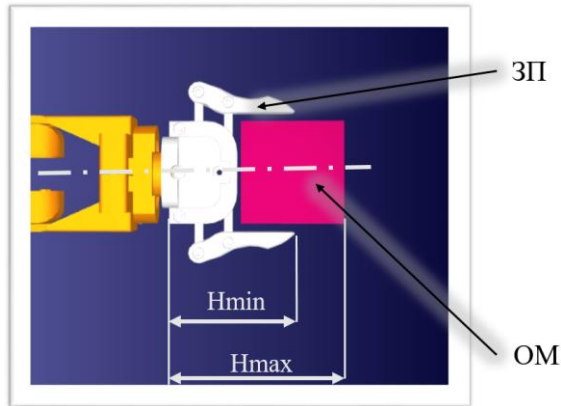


Рис. 2.16 – Конструктивні параметри  $H_{max}$  та  $H_{min}$  (приклад)

## 2.4.2. Опис процедури атестації метрики маніпуляційних систем ПР/КПР з використанням програмних продуктів RoboDK та SolidWork

### 2.4.2.1. Загальні положення

Як було зазначено вище, в практиці роботизованого виробництва присутні випадки, коли для ПР, як універсального засобу гнучкої автоматизації машино- та приладобудування, необхідно мати специфічні технологічні та конструктивні характеристики та параметри, які виробники ПР повинні передбачити в технічній документації.

Виходячи з цих даних та із їх урахуванням, сучасні КПР/ПР можуть ефективно експлуатуватися в гнучкому механоскладальному виробництві, починаючи від гнучких виробничих комірок (ГВК) і закінчуючи гнучкими виробничими цехами, і, в ідеалі, гнучкими підприємствами в цілому. Таким чином, при впровадженні роботизованих технологій актуальним є пошук резервів підвищення ефективності роботи КПР/ПР у ГВК та в інших технологічних структурах РМСВ. В цілому, вищезазначене спонукало до додаткових досліджень можливостей КПР/ПР в різних її проявах, в тому числі і щодо атестації метрики КПР/ПР.

Сутність процесу атестації метрики КПР/ПР (див. вище) полягає у визначенні конкретних кількісних та якісних параметрів геометричних характеристик робочої зони ПР (РЗ), які забезпечують необхідну орієнтацію робочого органу з врахуванням геометричних та просторових параметрів ланок МС. Тому атестація метрики КПР/ПР передбачає ітераційний розв'язок задач оберненої кінематики на множині ланок КПР/ПР та їх параметрів при збереженні заданої орієнтації так званого

технологічного роботизованого комплексу (ТРК) з об'єктом маніпуляції в системі координат ПР, з використанням певних програмних продуктів. ТРК включає в себе ЗП з ОМ або без нього. Кінцевим результатом атестації метрики КПР/ПР є параметри геометричних характеристик РЗ, в яких ТРК зберігає задану орієнтацію робочого органу (РО) в кінцевій точці його позиціонування.

Візуально результати атестації представлені у вигляді частини РЗ аналізованого КПР/ПР з визначеними геометричними параметрами РЗ, в якій зберігається необхідна орієнтація РО, що враховується ще до безпосереднього введення КПР/ПР в роботизовані технологічні структури. Таке трактування змісту процесу сертифікації метрик ПР та його результатів свідчить про те, що процес сертифікації та його результати є складовою технологічної підготовки КРМСВ/РМСВ. Таким чином, будь-які дії, спрямовані на вдосконалення будь-якого аспекту процесу атестації метрик КПРО/ПР, інтерпретуються як такі, що призводять до підвищення ефективності технологічної підготовки КРМСВ/РМСВ.

Основними критеріями функціональності програмних продуктів, які можуть бути використані для сертифікації метрики ПР, є можливість ітераційного розв'язання кінематичних задач, планування траєкторій, визначення координат опорних точок для подальшого синтезу траєкторій ТРК. Компанії, що виробляють такі відомі ПР, як Kuka, ABB, Mitsubishi, Fanuc, UR та інші розробляють програмні продукти, які використовуються тільки для ПР цих виробників. Це пов'язано зі специфікою технологій виготовлення та експлуатації відповідних ПР. Таким чином, використання програмних продуктів від виробників ПР є значним обмеженням у впровадженні процесу сертифікації метрики КПР/ПР. Деякі програмні середовища, розроблені компаніями для програмування своїх КПР/ПР, частково генерують інформацію про метрику КПР/ПР для конкретних технологічних завдань, наприклад, ПР фірми Kuka [35].

Крім перерахованого вище, існує безліч спеціалізованих програмних продуктів, таких як RoboDK [50], SolidWorks [60], RobotMaster [45], ROS [46], RobotWorks [47], RobotExpert [48], RobotAnalyzer [49], CoppeliaSim [61 – 63] та інші, які безпосередньо не вирішують проблему атестації КПР/ПР. У той же час, як показує аналіз їх можливостей, деякі з них можуть бути використані для таких досліджень.

Послідовність процесу атестації метрик КПР/ПР з використанням програмних продуктів SolidWorks [60] і RoboDK [50] складається з наступних етапів (див. вище п. 2.4.2).

Етап Е1 - розробка і підготовка 3D моделі КПР/ПР з використанням програмного продукту SolidWorks з подальшим розкладанням цієї моделі на компоненти, які зберігаються в певному форматі. Далі вибирається система координат КПР/ПР і кількість ступенів рухомості її маніпуляційної системи (формат *.dof*).

Етап E2 - реалізація та конфігурація згенерованої 3D моделі КПП/ПР в програмному продукті RoboDK, куди завантажуються 3D компоненти КПП/ПР (ланки тощо) з подальшим їх спряженням і фіксацією для забезпечення якісних і кількісних параметрів відносної рухомості ланок КПП/ПР і запобігання різного роду колізій; вибирається End-Effector (кінцевий елемент); виконується атестація та фіксація отриманих результатів.

Етап E3 - візуалізація, узагальнення та розробка рекомендацій щодо практичного використання результатів атестації метрики КПП/ПР.

Практика досліджень з використанням програмних продуктів SolidWorks і RoboDK показала, що реалізація E1, E2 і E3 має безліч недоліків, які обумовлені особливостями функціональних можливостей програмного продукту RoboDK. Основним недоліком етапу E1 є вимога підтримки 3D моделей КПП/ПР у форматах *.stl* та *.obj*. Це призводить до геометричного спрощення і втрати деяких даних. Наслідком цього в свою чергу є проблеми впровадження та налаштування 3D моделі КПП/ПР під час реалізації етапу E2 (неможливість безпосереднього завантаження 3D моделі КПП/ПР у вигляді одного єдиного файлу в результаті технологічного складання компонентів МС та некоректне масштабування при завантаженні кожного компонента 3D моделі КПП/ПР в RoboDK). Отже необхідним є поетапне завантаження компонентів 3D моделі КПП/ПР, спряження їх один з одним, подальше налаштування, наприклад, осі і кута повороту всіх ланок МС КПП/ПР. Виявлення колізій також виконується в ручному режимі. На етапі E3 користувач відповідає за запис, обробку та візуалізацію інформації. Це свідчить про низький рівень автоматизації процесу атестації метрик.

Аналіз описаних вище проблем функціонування RoboDK свідчить про доцільність використання іншого програмного продукту, а саме CoppeliaSim [61 – 63]. Глибокий аналіз можливостей CoppeliaSim дозволив визначити, що за допомогою CoppeliaSim можливо в більшій мірі автоматизувати процес атестації порівняно з аналогами, а також візуалізувати отримані результати і частково автоматизувати процес запису і виведення отриманої інформації.

Це уможливлено завдяки мові програмування Lua, реалізованій в CoppeliaSim, і системі автоматичного уникнення колізій. Ці функціональні особливості надають більше можливостей для подальших досліджень атестації метрики КПП/ПР, насамперед в автоматизованому визначенні РЗ КПП/ПР при збереженні певної орієнтації РО і в плані візуалізації отриманих результатів. Як компонент CoppeliaSim, мова Lua дозволяє генерувати 3D моделі РЗ у вигляді окремого файлу в розширенні *.stl*. Однак виконання аналізу та геометричних перетворень 3D моделі РЗ є складним процесом. Дані, отримані після створення моделі РЗ в CoppeliaSim зі збереженою орієнтацією кінцевого елемента, наприклад, РО, формуються у вигляді матриць. Ці матриці містять координати точок правої системи

координат КПП/ПР, тобто  $X^{LR}Y^{LR}Z^{LR}$ , в якій РО зберігає задану орієнтацію і не має зіткнень з іншими об'єктами, в тому числі і з конструктивними елементами КПП/ПР.

Доречно підкреслити, що задача автоматизованої атестації метрики ПР з використанням програмних продуктів CoppeliaSim і MATLAB досі не ставилась і, отже, потребує дослідження як щодо процесу атестації, так і щодо результатів розв'язування цієї задачі.

Зазначене актуалізує дослідження щодо визначення змісту та сутності нової методики автоматизованої реалізації процесу атестації метрики КПП/ПР як складової технологічної підготовки КРМСВ, яка спрямована на підвищення рівня автоматизації процесу атестації з використанням програмних продуктів CoppeliaSim та MATLAB.

#### **2.4.2.2. Стислий опис методики**

Нижче стисло описано триступеневу методику атестації метрики ланок МС КПП/ПР з використанням програмних продуктів CoppeliaSim і MATLAB [61]. Кожен етап методики передбачає впорядковане виконання відповідних методологічно визначених кроків. Її узагальнена схема подана на рис. 2.17.

Для реалізації методики в програмні продукти CoppeliaSim і MATLAB були внесені конкретні методологічні та практичні удосконалення з метою забезпечення їх працездатності в умовах необхідності підвищення рівня автоматизації процесу атестації метрики і зручності проведення цього процесу.

При цьому метою є доповнення функціональних можливостей кожного з них для реалізації вдосконаленої автоматизованої атестації метрики КПП/ПР (див. рис. 2.17). Так, для CoppeliaSim був розроблений задавач орієнтації для ТРК шляхом задавання відповідних кутів його орієнтації в системі координат досліджуваного КПП/ПР. Вони являють собою кути А, В і С, які означають обертання (орієнтацію) ТРК навколо осей  $X^{LR}$ ,  $Y^{LR}$ ,  $Z^{LR}$  або колінеарні до них, і задаються у відповідному інтерфейсі (тут не показано) (див. рис. 2.17, етап Е3, рис. 2.18, а). При визначенні координат точок, які є геометричними параметрами РЗ, останні записуються в матричний масив у вигляді числових значень для кожної з осей  $X^{LR}$ ,  $Y^{LR}$ ,  $Z^{LR}$ .

Для аналізу та перетворення отриманих геометричних параметрів РЗ був використаний MATLAB, який має вбудовані функції для розв'язування таких завдань. Також MATLAB може генерувати 2D і 3D графічні представлення РЗ з можливістю їх відтворення в окремому вікні. У нашому випадку MATLAB формує графічні представлення РЗ з даних, отриманих від CoppeliaSim, які представляють собою масиви згаданих вище координат точок максимально віддалених від бази ПР і визначають геометричні параметри РЗ.

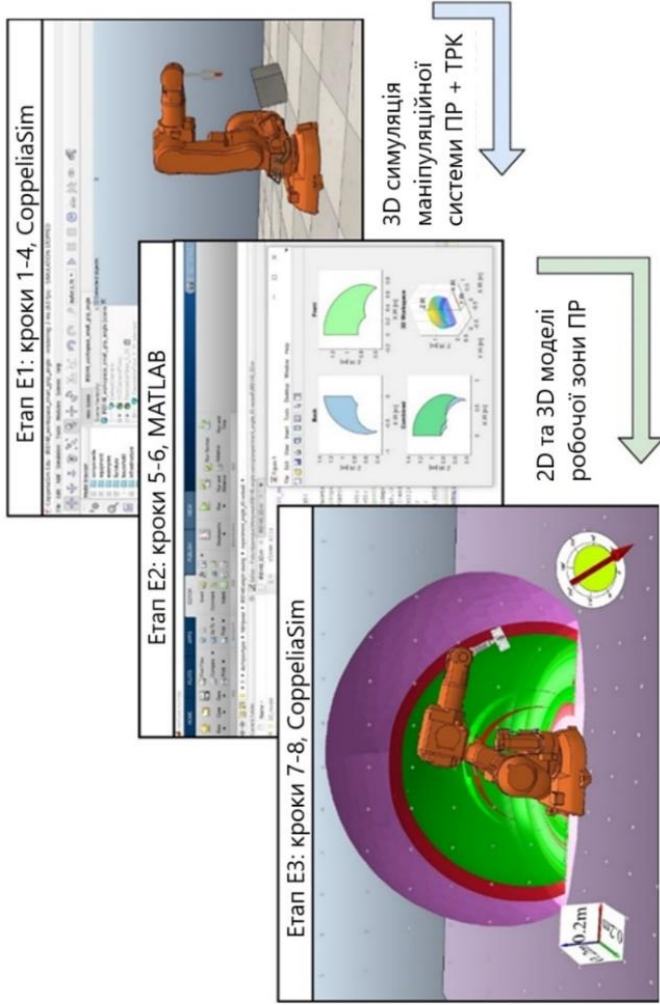


Рис. 2.17. Узагальнена схема запропонованої методики автоматизованої атестації метрики КТР/ПР з використанням програмних продуктів CoppeliaSim та MATLAB

Однак найголовніше в даному випадку полягає в тому, що MATLAB може згенерувати тривимірну модель області РЗ і відповідний 3D-файл з розширенням *.stl*. Цей файл, а точніше 3D модель РЗ з таким розширенням, використовується в CoppeliaSim для відображення РЗ ПР зі збереженням заданої орієнтації ТРК.

Змістовно математична модель для реалізації запропонованої методики - це впорядкований набір обчислювальних процедур  $\langle \varphi_k | k = \overline{1, n_\varphi} \rangle$ , кількість яких  $n_\varphi$  дорівнює кількості кроків на рис. 1:

$$\begin{aligned} < \varphi_k | k = \overline{1, n_\varphi} \rangle: \left( (l_i^r | i = 1, n_l^r) \times (q_{j_q}^r | j = 1, n_q^r) \right) | n_l^r \geq n_q^r \rangle \times \\ \times (S_m^r | m = (1, n_S^r) \rightarrow \exists (V_{n_q^r}^r = (l_i^r) \times (q_{j_q}^r) \times TRK^r) = const) \subset \quad (2.13) \\ \subset (WA_{n_q^r}^r \subset WA^r) \end{aligned}$$

Інтерпретація розробленої математичної моделі (формалізованого опису) за виразом (2.13) і рис. 2.17 відповідає вищенаведеній сутності процесу автоматизації атестації метрики для кожного аналізованого г-го (правий верхній індекс в (2.13) і далі) КПР/ПР, полягає в наступному: кортеж обчислювальних процедур  $\langle \varphi_k \rangle$  – це методологічно визначена впорядкована послідовність їх (процедур, етапів) реалізації, виконана на наборах зв'язків  $l_i^r$  та узагальнених координатах  $q_j^r$  із загальною кількістю  $n_l^r$  та  $n_q^r$  відповідно, а також на наборі методологічно необхідних програмних дій для кожного з програмних продуктів CoppeliaSim та MATLAB, що використовуються в процесі атестації, із загальною кількістю  $n_S^r$ . Це сюр'єктивне відображення (символ  $\rightarrow$ ) декартового добутку (символ  $\times$ ) множин  $l_i^r$ ,  $q_{j_q}^r$  та  $S_m^r$  (параметри метрики), що забезпечує існування (символ квантора існування  $\exists$ ) такої множини векторів  $V_{n_q^r}^r$  орієнтації  $TRK^r$ , яка є постійною (const) у певній підмножині РЗ  $WA_{n_q^r}^r$ , яка є частиною (символ включення  $\subset$ ) загальної РЗ  $WA^r$  аналізованого г-го робота.

Зміст *етапу Е1* полягає у виконанні наступних кроків:

- крок 1: вибір 3D моделі ПР з бібліотеки CoppeliaSim або завантаження іншої 3D моделі ПР;

- крок 2: вибір 3D моделі кінцевих елементів ПР (РЗх, інструмент тощо) з бібліотеки CoppeliaSim або завантаження будь-яких сторонніх 3D моделей;

- крок 3: налаштування моделей ПР, моделювання з ТРК та візуальна перевірка роботи системи;

- крок 4: проведення процесу валідації метрики ПР для моделі ПР з ТРК та створення вихідного файлу координат точок, де ТРК зберігає свою орієнтацію.

MATLAB – це програмний продукт, в якому *етап Е2* виконується шляхом реалізації визначених кроків, а саме:

- крок 5: завантаження та обробка файлу даних, отриманого з CoppeliaSim, за допомогою MATLAB;

- крок 6: генерація графічного представлення результатів програми MATLAB та 3D моделі РЗ з урахуванням заданої орієнтації множини елементів маніпуляційної системи, ПР+ТРК.

Кроки реалізовані на *етапі Е3*, виконаному в CoppeliaSim, це:

- крок 7: реалізація 3D моделі ПР, отриманої з MATLAB в CoppeliaSim;

- крок 8: візуалізація отриманих результатів.

### **2.4.3. Процедура автоматизації процесу атестації метрики з використанням програмного продукту CoppeliaSim**

#### **2.4.3.1. Загальні положення**

Ефективний сучасний інструментарій для автоматизованої атестації метрики ПР при проектуванні сучасного виробничого середовища на сьогодні передбачає використання *технологій віртуалізації*. Такий підхід дозволяє забезпечити *унаочнення отриманих результатів* та й самого процесу моделювання, *уможливлення багатоваріантності початкових даних, автоматизованого виконання процесу атестації* і є на сьогодні загальноприйнятою вимогою при виборі засобів проектування/синтезу роботизованих механоскладальних технологій.

Процес атестації метрики ПР можливо було б виконати у фізичній формі – *фізичне моделювання*, що передбачає вимірювання та контроль певних робочих параметрів, серед яких точність рухів, зміна позиції, відтворюваність траєкторій тощо. У цьому випадку необхідно було б задіяти значний масив різноманітних сенсорів та обладнання. Це можуть бути енкодери, акселерометри, датчики сили, положення тощо. Водночас, цей масив сенсорних приладів потребував би використання таких ресурсно затратних процедур як налаштування та калібрування. Фізична реалізація уможливила б збір реальних даних, але безпосередня обробка та аналіз у будь-якому випадку передбачатиме застосування автоматизованої комп'ютерної обробки. Реалізація багатоваріантності початкових даних при фізичному моделюванні взагалі потребувала б спеціального підходу, наприклад, виготовлення повнорозмірних або масштабованих фізичних моделей технологічного обладнання при вирішенні задачі атестації метрики.

Актуальність удосконалення процесу атестації метрики ПР також пояснюється цінністю отримуваних результатів для наступних стадій аналізу, які можуть включати в себе виявлення аномалій, порівняння зі стандартами, статистичний аналіз тощо. Підсистема автоматичної атестації метрики ПР може бути інтегрована із системою керування ПР. Атестаційні дані можуть бути використані для забезпечення *ефективного управління* ПР безпосередньо під час виконання ним (ПР) технологічних операцій. Це може включати в себе автоматичне коригування параметрів ПР на основі отриманих даних.

При автоматизованій атестації метрики ПР можуть також вирішуватись питання *безпеки та надійності* всієї роботизованої технологічної системи загалом. Наприклад, якщо метрика вказує на відхилення від норми, це може вказувати ймовірну несправність ПР, яка може призвести до аварійної ситуації.

Таким чином, на сьогодні практично безальтернативно є необхідність розвитку систем автоматизованої атестації метрики ПР на базі *технологій віртуалізації та комп'ютерних обчислень*.

Є очевидним, що з допомогою експериментів, проведених у віртуальному просторі, можливо отримати дані про параметри роботи ПР, які можуть бути прийняті в якості атестаційних і формувати певним чином метрику ПР. Водночас, важливість питання формування метрики з урахуванням просторових параметрів точності можливих переміщень ПР, які використовується як альтернатива стандартним технологіям обробки деталей за допомогою комплексу верстатів. Розглянуту метрику можливо доповнити елементами, що враховуватимуть робочі зони (РЗ) ПР.

На сьогодні, виконати віртуалізовані експерименти можливо за допомогою спеціалізованих віртуальних середовищ. Досить поширеним є середовище моделювання роботизованих комплексів RoboDK. Слід відмітити, що RoboDK - це досить багатозадачне середовище з API (application programming interface). Це дозволяє організувати обмін даними між RoboDK та прикладними програмами, написаними з використанням найпоширеніших мов програмування: C++, C#, Python. RoboDK також може бути інтегроване з таким поширеним програмним продуктом для математичного аналізу як MATLAB.

Можливим є обґрунтування ідеї використання програмного середовища RoboDK для безпосереднього виконання автоматизованої атестації метрики, якщо представити наступний набір обов'язкових етапів цього процесу як: 1) створення та підготовка 3D-моделі аналізованого ПР (наприклад, із залученням ще одного програмного середовища Solidworks); 2) завантаження 3D-моделі ПР у програмне середовище RoboDK (що вимагає поелементного завантаження окремих ланок ПР, додаткових процедур масштабування, фіксації з'єднань тощо); 3) призначення функціоналу кожній завантаженій ланці 3D-моделі ПР; 4) вибір кінцевого елемента ПР (що може бути крайньою точкою захвату, крайньою точкою

захвату з оброблювальною заготовкою, або крайньою точкою інструмента на кінцевому фланці ПР); 5) безпосереднє виконання процедури атестації; 6) візуалізація та узагальнення результатів, розробка рекомендацій щодо практичного застосування ПР. Але при цьому RoboDK демонструє певну обмеженість щодо свободи застосування саме комплексного аналізу просторових елементів ПР, особливо, коли є необхідність складання довільного алгоритму атестації ПР. Потрібно також відмітити, що RoboDK є комерційним продуктом з визначеними ліцензованими умовами застосування. Таким чином, для більш широкого застосування є необхідність пошуку open-source програмних продуктів.

CoppeliaSim - програмний продукт, що знімає певні обмеження щодо ліцензованого використання з дослідницькою метою та є повноцінним середовищем комп'ютерного моделювання роботизованих операцій. Програмне середовище CoppeliaSim, створене та підтримується компанією Coppelia Robotics AG 2006-2025 ([www.coppeliarobotics.com](http://www.coppeliarobotics.com)), і, власне, призначене для віртуалізації та моделювання роботи роботизованих пристроїв, розробки алгоритмів управління, прототипізації, верифікації та симуляції функціонування різноманітних пристроїв на базі цифрових двійників (моделей).

Система редактора віртуальних моделей CoppeliaSim має вбудований інтерпретатор мови Lua, яка може бути використана для створення скриптів керування ланками аналізованої моделі ПР, скриптів збору та реєстрації даних результатів моделювання. Наявність вбудованого інтерпретатора Lua дає можливість завжди вносити оперативні зміни у скрипт та запускати його без попередньої компіляції у машинний код. Такий підхід дозволяє використовувати скрипт як елемент дослідження і навіть вносити зміни у початкові дані текстово – без застосування додаткового графічного інтерфейсу користувача – GUI (graphic user interface), хоча можливість створення останнього також закладена в CoppeliaSim. Мова Lua є однією з відомих та розвинутих на цей час мов програмування високого рівня, і за поширеністю та швидкодією її можна порівняти з такими мовами програмування як C++, C#, Java.

Не менш важливою є роль програмних алгоритмів, закладених в самому редакторі віртуальних моделей CoppeliaSim. Ці алгоритми мають можливість досить повно відтворювати взаємний рух віртуалізованих механічних елементів – ланок ПР, з урахуванням того, що вони поєднані між собою рухомими з'єднаннями. При цьому зберігається повна відповідність між рухом реального ПР та його віртуальної моделі.

Таким чином, враховуючи спеціалізацію, багатозадачність, відповідність вищепописаним критеріям щодо спеціалізованих віртуальних середовищ, саме програмне середовище CoppeliaSim є перспективним з позицій базового програмного елементу при створенні алгоритмів автоматизованого виконання операцій атестації метрики ПР.

#### 2.4.4.2. Стислий опис методики

Фактичним завданням при проведенні досліджень за вказаною тематикою було обрано виконання експерименту, етапи якого можливо представити таким переліком:

- завантаження та розміщення моделі ПР для дослідження у віртуальному середовищі CoppeliaSim;

- створення засобу для задавання початкових даних при проведенні експерименту з побудови РЗ з урахуванням додаткових умов, наприклад, фіксованого кутового положення захвату (інструменту) ПР;

- складання програми, яка забезпечує виконання алгоритму процесу моделювання, наприклад, переміщення ланок ПР у певному порядку, реєстрацію кутових положень та крайніх точок, уникнення колізій між рухомими частинами та зіткнень із сторонніми поверхнями тощо;

- перетворення хмари робочих точок на 3D-поверхню РЗ ПР та збереження цієї поверхні у загальноприйнятому форматі, який застосовується для об'ємних фігур, наприклад, форматі stl;

- безпосереднє проведення експерименту, тобто виконання програмного алгоритму для розміщеної віртуальної моделі ПР та відображення результатів експерименту.

## **РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КОЛАБОРАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ РОБОТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ ЛЮДИНА-РОБОТ**

### **3.1. Інформаційний базис розв'язування задач в технологічній колаборативній системі людина-робот**

Забезпечення реалізації вище описаного пропонованого трирівневого системного підходу при аванпроектуванні КРТ можливе за наявності підготовленого інформаційного базису. Під поняттям інформаційного базису розуміється накопичені систематизовані дані, які є основою для реалізації пропонованих методик при аванпроектуванні КРТ. Важливість, необхідність та складність розробки інформаційного забезпечення для реалізації пропонованого підходу на початкових етапах проектування, наприклад, ТПг КРМСВ, в тому числі КРТ, що базується на системному підході, визначається необхідністю врахування складних та різнохарактерних вхідних даних (Input) та їх зростаючим в процесі обчислень обсягом, що певним чином впливає на ефективність функціонування ТПг КРМСВ, у тому числі за рахунок впливу фактору часу на ТПг КРМСВ. Це також пов'язано із вартісними показниками витрат на розробку та складання інформаційного забезпечення, а також з обґрунтованістю та якістю системних технологічних рішень, що приймаються при цьому.

Розробка інформаційного забезпечення для реалізації пропонованого трирівневого підходу орієнтована на розв'язання задач підвищення ефективності процесу ТПг КРМСВ, що дозволить ефективно функціонувати в змінних умовах постановок складових задач цієї проблеми шляхом прийняття обґрунтованих технологічних рішень. В даному випадку системне розв'язування комплексних задач прийняття технологічних рішень щодо КРТ на початкових етапах ТПг роботизованих виробництв.

Інформаційний базис пропонованого трирівневого підходу висвітлено на рис. 3.1, де всі дані розділені на постійну та змінну інформацію, що дозволяє подальшу реалізацію методичних рішень, описаних вище в розділі 2.

Вхідна інформація, а саме інформаційний базис, складається з постійної інформації ( $I_{const}$ ), змінної інформації ( $I_{var}$ ) та умовно-постійної інформації ( $I_{e.const}$ ).

Постійна інформація  $I_{const}$  (рис. 3.1) – це інформація щодо обов'язкових і постійних компонентів у Input, зміст і форма представлення яких не змінюється при реалізації поставлених задач та при зміні умов.  $I_{const}$  – це інформація, що змістовно є методичними розробками. Наприклад,

методика використання МАІ, яка забезпечує прийняття технологічних рішень при аванпроекуванні КРТ. МАІ містить незмінну інформацію про загальний підхід, схеми ієрархій, попарні порівняння критеріїв між собою, матричні операції тощо. Також до постійної інформації відноситься методика застосування атестації метрики МС ПР/КПР. Вищевказане представлено та описано в розділі 2.

Змінна інформація  $I_{var}$  (рис. 3.1) – це варіативна складова Input, яка вміщає в собі множину критеріїв, що змінюються в залежності від ряду передумов для кожної конкретної задачі. Унікальність та несхожість поставлених задач забезпечується змінною інформацією, яка безпосередньо впливає на кінцевий результат. До змінної інформації відноситься складові вхідної інформації (Input) для пропонованого тривірневого підходу, а саме інформацію про ПР (R), КПР (CR), людину (H), об'єкт виготовлення (O), технологічне обладнання (TE), технологію виготовлення (T), кількість експертів (E), множину критеріїв (S), див. рис. 3.1.

Умовно-постійна інформація ( $I_{c.const}$ ) змістовно є інформацією щодо елементів (складових)  $I_{var}$  та  $I_{const}$ .  $I_{c.const}$  може бути подана двома складовими:

–  $I_{cf.const}$  – так звана фіксована умовно-постійна інформація, що не підлягає подальшому переопрацюванню і певним видозмінам і тому використовується як фіксовані числові (цифрові) дані. В даному випадку до  $I_{cf.const}$  віднесена методика реалізації НБВА, яка має незмінний математичний інструмент обробки вхідних даних, і в залежності від вхідних даних видає різний результат;

–  $I_{cr.const}$  – це інформація, що є результатом переопрацювання частини інформації  $I_{c.const}$  і є різницею множин ( $I_{c.const} \setminus I_{cf.const}$ ). Це, наприклад, величини технологічних переміщень рухомих ланок МС КПР (узагальнені координати), їх (ланок) геометричні форми та розміри, потужності приводів окремих ступенів рухомості тощо. Інформація щодо вказаних параметрів та їх величини містяться в керівництвах по експлуатації ПР, їх паспортах, іншій технічній документації, а також як результат розв'язування певних проміжних задач.

### **3.2. Методичне забезпечення як постійна складова інформаційного базису пропонованого тривірневого підходу при аванпроекуванні КРТ**

Постійною інформацією (див. рис. 3.1) є методичне забезпечення пропонованого підходу ТПг КРМСВ. До її складу віднесені методики роботи з МАІ, НБВА та процедури атестації метрики маніпуляційної системи аналізованих КПР. Вище вказані методики є основою для реалізації всіх висвітлених рівнів за рис. 2.1, а саме стратегічного рівня L1, тактичного рівня L2 та виконавського рівня L3.



В залежності від отриманих результатів на кожному з рівнів користувач може приймати обґрунтовані технічні та технологічні рішення, що впливає на ефективність ТПГ КРМСВ. Проте реалізація вище вказаного можлива лише за умови виконання пропонованих методик.

Постійність та незмінність методик МАІ, НБВА та атестації метрики МС КПР гарантує отримання певних кількісних та якісних результатів, які є інформацією, що можливо вважати обґрунтованою і тому постійною в контексті проблеми, що розглядається. Вищевказане забезпечується багаторічним досвідом застосування відомих підходів МАІ та НБВА в різноманітних наукових, технічних, економічних задачах, де вони зарекомендували себе як робочі та прийнятні методики прийняття рішень та обробки комплексних даних.

Напрацювання щодо атестації метрики показали стабільні результати при дослідженні різних моделей ПР та КПР, що дає змогу констатувати факт працездатності підходу.

### **3.3. Змінна складова інформаційного базису пропонованого тривірневого підходу при аванпроектуванні КРТ**

Змінною інформацією  $I_{var}$  (див. рис. 3.1) є інформація, яка використовується при виконанні МАІ. Дана інформація описує основні елементи проекрованої КРТ та виступає в ролі критеріїв оцінювання в МАІ, а саме  $R$  – ПР,  $CR$  – КПР,  $H$  – людина,  $O$  – інформація про об'єкт виготовлення,  $TE$  – технологічне обладнання,  $T$  – технологію виготовлення продукції,  $E$  – множину експертів та  $S$  – множину локальних критеріїв прийняття рішень.

Кожний з вище вказаних елементів змінної складової інформаційного базису має інформаційну цінність, яка важлива при виконанні МАІ. Деякі з цих елементів є параметризацією складових КРМСВ, наприклад,  $R$  – ПР та  $CR$  – КПР, де основна інформація є технічні параметри та функціональні можливості ПР та КПР.

Для кращого розуміння виду та змісту змінної інформації необхідно розглянути її складові індивідуально.

$R$  (ПР) та  $CR$  (КПР) містять в собі різноманітну технічну та функціональну інформацію. Технічна інформація передбачає наявність відомостей про МС, тобто кількість ланок їх розміри, взаємне розміщення, загальні розміри КПР або ПР. Також важливою є інформація щодо видів розташування ЗП у робочій зоні та закріплення КПР або ПР. Технічні параметри передбачають наявність інформації про вантажопідйомність КПР або ПР, точність переміщення кінцевого елемента МС КПР або ПР, швидкість переміщення ланок МС КПР або ПР, крутні моменти в механічних вузлах тощо. Функціональні можливості передбачають наявність інформації про методи керування КПР або ПР, особливості

експлуатації, можливості удосконалення конструкції або інших технічних рішень, можливість імплементації датчиків та пристроїв. Також потрібною є інформація про програмне забезпечення КПП або ПР, тобто дані про можливість керування КПП або ПР, підтримувані мови програмування, можливість підключення до інших програмних продуктів та загальну підтримку API тощо.

Інформація про *H* (людину) вміщає в себе дані про її вік, стать, фізичні можливості тощо. Таким даним характерний суб'єктивізм та нестійкість, тобто вони можуть змінюватись на певному проміжку часу. Варто також враховувати ергономічні та безпекові питання на основі інформації про людину.

*O* – інформація про об'єкт передбачає наявність даних про виріб, вузол виробу або деталь виробу. Зазвичай така інформація описує геометричні розміри, вагу, твердість матеріалу тощо, тобто фізико-механічні властивості. Також така інформація може бути збережена у вигляді цифрових 3D-моделей та/або двовимірних креслень, що виконані в CAD-програмах.

*TE* – це інформація про технологічне обладнання, а саме основне та допоміжне. Ця інформація містить технічні дані про обладнання, а саме параметри та характеристики, а також їх функціональні можливості. Також вказується інформація про програмне забезпечення, яке потрібно для забезпечення роботи обладнання. Варто враховувати інтерфейсні можливості імплементації іншого програмного забезпечення, яке використовується для КПП та ПР.

*T* – це інформація про технологію виготовлення продукції. Для пропонованого трирівневого підходу – це, наприклад, роботизовані технології складання виробів тощо. В цей інформаційний елемент входить технологічна схема складання (ТСС) виробу.

*E* – це інформація про множину експертів, які формують альтернативи для МАІ і таким чином опосередковано беруть участі у прийнятті рішень. В залежності від кількості експертів об'єми отримуваної інформації з анкетування МАІ може змінюватись.

*S* – це інформація про локальні критерії прийняття рішень, які використовується в МАІ. На кожному рівні локальні критерії прийняття рішень та їх кількість змінюються, відповідно змінюється дані, які вони містять. Локальні критерії мають взаємозв'язок з усіма вище згаданими інформаційними елементами.

Вищевказані інформаційні елементи є основними складовими інформаційного базису для реалізації пропонованого трирівневого підходу. Деталізована інформація, яку містять ці елементи інформаційного базису, є невід'ємною складовою забезпечення методики прийняття технологічних рішень при ТПг КРМСВ, включаючи виконання МАІ.

### 3.4. Інформаційне забезпечення атестації метрики маніпуляційних систем КПП

Інформаційне забезпечення атестації метрики включає в себе інформацію про МС аналізованого КПП або ПР, вхідні дані для досліджень (орієнтація в СК ЗП та ОМ) та отримувані результати, на основі яких створюється 3D-моделі робочих зон. Отримання вищевказаних візуалізованих результатів метрики МС КПП описано в п. 2.4, де вказується послідовність виконання кроків та тлумачення отримуваних результатів досліджень.

Пропонована методика атестації метрики передбачає проведення досліджень, що визначають робочу зону аналізованого КПП або ПР при умові збереження орієнтації ЗП у заданому положенні після проведення аналізу існуючих варіантів складових робочих зон та їх геометричних особливостей. Методика проведення атестації метрики МС ПР/КПП є постійною інформацією за рис. 3.1, яка передбачає виконання певних кроків для отримання кінцевого результату.

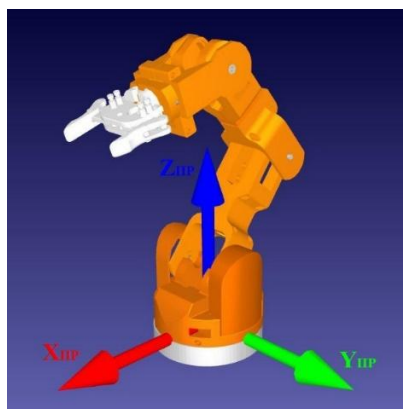
Реалізація вищевказаного виконується в програмному продукті RoboDK. В даному програмному середовищі моделюються можливості переміщення робота зі збереженням орієнтації ЗП. Також атестація метрики передбачає визначення мінімальної та максимальну відстані по осі Z на якій КПП може підтримувати орієнтацію ЗП в певному положенні залежно від відстані від основи робота до ЗП по осі X.

На рис. 3.2 зображено модель робота TinkerKit Braccio [64] в спеціалізованому програмному середовищі RoboDK із зображенням системи координат робота, а саме СК з осями Z, Y та X. В даному випадку локальна СК робота співпадає з глобальною СК робочого простору в даному програмному середовищі. Реалізація пропонованої методики атестації метрики передбачає використання саме локальної СК робота, а не СК ЗП чи СК ОМ.

Отримувані результати атестації метрики мають вагомую цінність:

- розглядаються як апріорна інформація при проектуванні КРМСТ на етапі розміщення та планування ТО та ДТО в робочій зоні аналізованого КПП;
- використовуються при плануванні траєкторій переміщень кінцевого елемента КПП до технологічного об'єкта при виконанні основних і допоміжних технологічних операцій роботизованого механоскладання.

Атестація метрики має місце при проектуванні КРТ на етапі ТПг РМСВ та КРМСВ, а саме в частині визначення інформації про координати точок робочої зони КПП, в яких забезпечується задана орієнтація ЗП КПП. Вищевказане фрагментарно відтворює реалізацію виконавського рівня L3.



*Рис. 3.2 – Система координат робота TinkerKit Braccio*

### **3.5. Інформаційне забезпечення щодо рекомендаційної складової реалізації КРТ**

Однією з складових реалізації виконавського рівня L3 є формування рекомендацій щодо реалізації конкретної технології з використанням КРТ. Ця складова реалізується на підставі наявних науково-практичних напрацювань. При дослідженні інформаційних джерел, що доступні в інформаційному науково-технічному просторі, визначено наявні положення, що фактично та теоретично можуть бути використані як методичні рекомендації щодо реалізації тієї чи іншої технології з використання КТР.

Дані інформаційні джерела можуть бути використані в якості інформаційного базису для формування рекомендацій щодо реалізації КРМСТ на виконавському рівні L3, тому що містять так звану інформаційно-практичну цінність. Кінцевий вибір щодо процесу та методики аванпроекування КРТ залишається за користувачем.

*Таблиця 3.1*

*Рекомендації з доступних інформаційних джерел для аванпроекування КРТ*

№ з/п	Інформаційне джерело	Сфера застосування	Короткий опис, рекомендації
1	A case study in human–robot collaboration in the disassembly of	1. Складання в автомобільній галузі;	Напрацювання можуть бути використані в складальних

	press-fitted components [62]	2. Складання в електроніці приладобудування	процесах та/або в процесах розбирання виробу. Особливості застосування КПП в даному випадку полягає у фіксуванні деталей та їх переміщення для ефективної та ергономічної праці людини в складальних процесах та в процесах розбирання виробів.
2	On a human-robot collaboration in an assembly cell [63]	Складання в автомобільній галузі	Напрацювання можуть бути використані в складальних процесах та/або в процесах розбирання виробу. Особливості застосування КПП полягає у напрацюваннях щодо складання гідравлічних насосів роботом і людьми.
3	Safety Design and Development of a Human-Robot Collaboration Assembly Process in the Automotive Industry [64]	Складання в автомобільній галузі	Напрацювання можуть бути використані в складальних процесах, та/або в процесах розбирання виробу. Особливості застосування КПП в даному випадку полягає у реалізації ергономічного складання автомобільних гальмівних дисків у колаборації КПП та людей.

4	Efficient Use of Human-robot Collaboration in Packaging through Systematic Task Assignment [65]	Колаборативність в пакувальних операціях	Напрацювання можуть бути використані в пакувальних операціях. У цьому випадку цінність полягає у попередньому поділу завдань, які мають виконувати люди та КПП у пакувальних процесах.
5	Digital manufacturing tools in the simulation of collaborative robots: towards industry 4.0 [66]	Складання в автомобільній галузі	Напрацювання можуть бути використані в складальних процесах, та/або в процесах розбирання виробу. Застосування КПП полягає у дослідженнях впливу впровадження колаборативного робота на виробничій автоматизованій лінії заводу по виготовленні авто та їх деталей.
6	Skill-based Dynamic Task Allocation in Human-Robot-Cooperation with the Example of Welding Application [67]	Колаборативність в зварювальних операціях	Напрацювання можуть бути використані в зварювальних процесах. Особливості застосування в зварювальних операціях полягають у фіксуванні деталей та спільній роботі людей і роботів-зварювальників для досягнення ефективності та безпеки.

7	Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry [68]	Колаборативність в зварювальних операціях	Напрацювання можуть бути використані в зварювальних процесах. Особливості застосування в зварювальних операціях полягають у фіксуванні деталей та спільній роботі людей і роботів-зварювальників для досягнення ефективності та безпеки.
8	The implementation of collaborative robots in production environments: a review of academic literature and industrial applications [69]	Колаборативність в пакувальних операціях	Напрацювання можуть бути використані в пакувальних операціях. У цьому випадку, особливість застосування полягає в фіксації деталей та їх переміщенні з метою забезпечення ефективного та ергономічного виконання завдань людиною.
9	A Morphology of Human Robot Collaboration Systems for Industrial Assembly [70]	Складання в електроніці приладобудування	Напрацювання можуть бути використані в складальних процесах, та/або в процесах розбирання виробу. Особливості застосування КІР в даному випадку полягає у фіксуванні деталей та їх переміщення для ефективної та ергономічної праці людини.

10	Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution [71]	Складання в електроніці приладобудування	Напрацювання можуть бути використані в складальних процесах, та/або в процесах розбирання виробу. Особливості застосування КТР в даному випадку полягає у фіксуванні деталей та їх переміщення, а також розподіл завдань на основі фізичних властивостей компонентів, характеристик завдань і спільного робочого простору.
----	--	--	--

## **РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ АВАНПРОЄКТУВАННІ КРМСТ**

### **4.1. Алгоритмічне забезпечення пропонованого трирівневого підходу при аванпроєктуванні КРТ**

На базі запропонованого системного трирівневого підходу при аванпроєктуванні КРТ (див п. 2.1) розроблено алгоритмічне забезпечення, що являє собою методично-обумовлену послідовність певних дій для отримання бажаного результату. Запропоновано загальний алгоритм реалізації кожного з рівнів L1, L2 та L3. Послідовність дій реалізації кожного з рівнів є унікальною, а також взаємо залежною. Наприклад, без результатів, отримуваних зі стратегічного рівня L1, неможливо перейти до тактичного рівня L2 тощо. У пропонованому алгоритмі відслідковується пряма послідовність, яка вказує на черговість (послідовність) виконання тих чи інших обчислень за методами, представленими в розділі 2.

#### **4.1.1. Алгоритм прийняття рішень на основі МАІ**

##### **4.1.1.1. Стислий алгоритм роботи МАІ прийняття технологічних рішень при аванпроєктуванні КРМСТ**

Відомо, що МАІ є потужним інструментом для вирішення проблем зі складною структурою та багатьма альтернативами [72]. Цей метод допомагає систематизувати рішення, виходячи зі взаємозв'язків між різними аспектами проблеми. Алгоритмічне представлення роботи МАІ для системи підтримки прийняття технологічних рішень при ТПг КРМСВ представлено на рис. 4.1.

Першим кроком у методі МАІ (АНР) є чітке визначення проблеми або завдання, для якого потрібно знайти оптимальне рішення (блок 2, рис. 4.1), тобто відповідно цілі (мета) та альтернатив (варіанти вирішення). В даному випадку загальна реалізація МАІ для пропонованого підходу аванпроєктування КРТ описані вище в п. 2.1, 3.1, 3.2, що відтворює методичне забезпечення, інформаційне забезпечення та алгоритмічне забезпечення. Наступним є виконання декомпозиції поставленої задачі чи проблеми на прості складові, тобто визначити цілі, варіанти рішень або альтернативи  $W_{Ln}$ , та множину локальних критеріїв  $S_{Ln}$ .

В блоці 3 (рис. 4.1), формується схема ієрархії для конкретної задачі, яка поділена на складові, що описані в додатку Б, а саме схема формується за методикою МАІ, яка висвітлена в п. 2.2.1, а приклад – на рис. 2.10. Стандартна компоновка схеми зазвичай складається з мети, від якої йдуть зв'язки до множини локальних критеріїв  $S_{Ln}$ , а локальні критерії з'єднуються з всіма альтернативами  $W_{Ln}$  (див. далі в п. 4.3.3). В даному

випадку метою є цілі, які поставленні тривірневим підходом при аванпроектуванні, наприклад, для рівня L2.1 ціль є розподіл завдань між людиною та КПП.

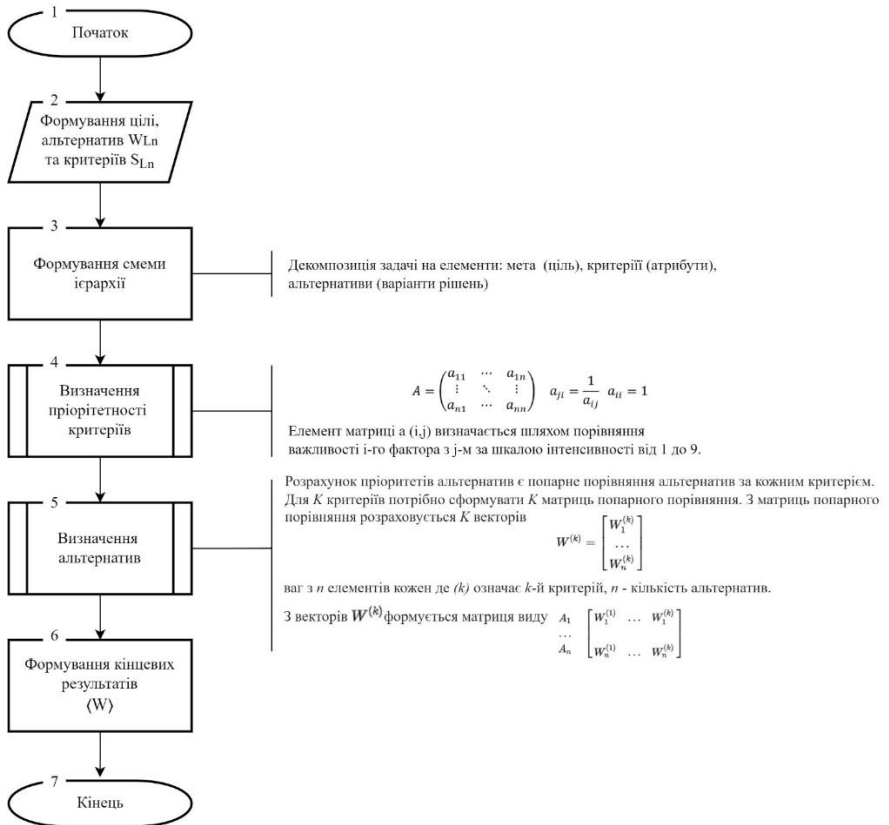


Рис. 4.1 – Блок-схема загального алгоритму роботи МАІ для пропонуваного підходу при ТПЗ КРМСВ

Змістом блоку 4 є визначення відносної важливості критеріїв та альтернатив за допомогою попарних порівнянь Т. Сааті [58]. Методика попарного порівняння описана в додатку Б, а приклад оцінювання вказаний в табл. ДБ.1. За отриманими кількісними показниками відносної важливості формуються матриці порівнянь для кожного рівня ієрархії. У цих матрицях визначається, яка альтернатива, тобто варіант вирішення поставленої задачі, важливіша в порівнянні з іншими.

Обчислення вагових коефіцієнтів (блок 5) визначаються з обчисленням середнього геометричного чи інших показників для

визначення централізованої та децентралізованої ваги кожної альтернативи на попередньому рівні.

Розрахунок локальних та глобальних пріоритетів виконується в блоці 5 на рис. 4.1. Ці розрахунки виконуються на множині локальних пріоритетів для кожної альтернативи на кожному рівні, з використанням обчислених вагових коефіцієнтів  $W$ . Глобальні пріоритети оцінювання альтернатив на головному рівні. Методики вище вказаних кроків висвітлені в п. 2.2.1.

Останнім кроком є синтез та аналіз результатів (блок 6), тобто формування кінцевої множини вагових коефіцієнтів  $W$ . Простою сумою глобальних пріоритетів визначається альтернатива з найвищим пріоритетом. Основною розрахунків є вхідні дані та оцінки, тому можлива корекція вагових коефіцієнтів та/або оцінок.

#### **4.1.1.2. Узагальнений алгоритм роботи МАІ прийняття технологічних рішень при аванпроектванні КРМСТ**

Узагальнений алгоритм прийняття рішень на основі МАІ представлений на рис. 4.2–4.5. В ньому блоки 2–7 відповідають блоку  $A_1$ , блоки 8–20 відповідають блоку  $A_{2L1}$ , блоки 21–32 відповідають блоку  $A_{3L2.1}$ , а блоки 33–44 відповідають блоку  $A_{3L2.2}$  SADT-діаграми (рис. 2.3).

Робота запропонованого алгоритму представлена нижче.

На початку (блок 2 – за рис. 4.2) виконується загальне формування вхідної інформації для пропонованого тривіневого підходу при аванпроектванні КРМСВ, яка визначена розробленою методичним та інформаційним забезпеченням (див. розділ 2, розділ 3). Вхідна інформація містить дані, що вказані в п. 3.3, а саме інформацію про людину ( $H$ ), інформацію про технологічне обладнання ( $R$ ,  $CR$ ,  $TE$ ), 3D-модель об'єкта виробництва ( $O$ ), наприклад, складання, дані про технологію його виготовлення. Для складальних процесів це технологічна схема складання (ТСС).

Після загального формування вхідної інформації в блоках 3-6 виконується аналіз та формування інформації за кожним з вищевказаних складових ( $H$ ), ( $R$ ,  $CR$ ,  $TE$ ), 3D-модель об'єкта складання, ( $O$ ) та (ТСС). На даних кроках виконується уточнення даних, їх параметризація та формування в такому вигляді, який можливий для використання в МАІ за пропонованим тривіневим підходом. В блоці 3 формується загальна інформація про виріб ( $O$ ), тобто його параметри, 3D-модель тощо.

Далі в блоці 4 формується інформація про технологічне обладнання ( $TE$ ), тобто його кількість, види, моделі тощо. Вищевказана інформація про  $TE$  також визначається певними технічними характеристиками та параметрами.

У блоці 5 описується технологія виготовлення виробу, у випадку процесу складання виробу вказується його ТСС. Блок 6 містить основну

інформацію про людину ( $H$ ), яка є безпосереднім учасником процесу виготовлення виробу.

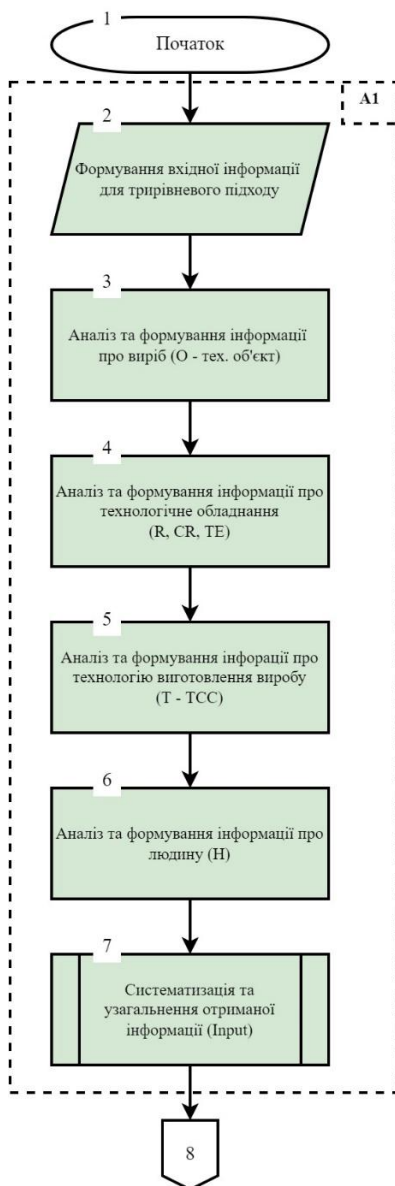


Рис. 4.2 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі МАІ

В блоці 7 виконуються кінцеві дії зі введеними на попередніх кроках даними, виконується їх систематизація та узагальнення, тобто вищевказана інформація, введена у блоках 3-6, концентрується як вхідна інформація (Input) для подальшої реалізації запропонованого алгоритму. На даному етапі створюється базисна інформація для критеріїв  $S$ , для їх подальшого використання. Після виконання даного кроку виконується перехід до виконання МАІ для стратегічного рівня L1.

Алгоритмічна реалізації стратегічного рівня L1 представлено на рис. 4.3. В блоці 8 сформована конкретна задача стратегічного рівня L1. Ця задача сформульована як «Можливість впровадження колаборативних технологій у виробничий процес КРМСВ». Вище вказане визначено альтернативами  $R$  (ПР) та/або  $CR$  (КПР) та записано як кортеж  $(R, CR)$ .

В наступному блоці 9 формується схема ієрархії за локальними критеріями, наприклад, в даному випадку з використанням локальних критеріїв  $S_{Li}$ , які представлені в п. 4.3. Кількість та вид останніх залежить від поставленої задачі та базисної інформації, яка була підготовлена в блоці 7. Далі після закінчення формування схеми ієрархії, де визначені мета, локальні критерії та альтернативи, визначається кількість експертів  $E$  (блок 10), результатів експертного анкетування за підготовленою раніше схемою ієрархії. В даному випадку розглядають  $|E|=1$  та  $|E|>1$ . В залежності від кінцевої кількості експертів подальша процедура реалізації процесу підтримки прийняття рішень на основі МАІ дещо відрізняються (блок 11).

Якщо експерт один  $|E|=1$ , то виконується процедура, описана в блоках 12 та 13, тобто визначаються пріоритети ієрархічної структури та визначаються альтернативи для поставленої задачі визначення можливості аванпроекування КРТ. Для кількості експертів більше одиниці  $|E|>1$  виконуються операції в блоках 14-17.

В блоках 14 та 15 визначається пріоритети ієрархічної структури та визначаються альтернатив для поставленої задачі. Блок 14 передбачає виконання основних підходів МАІ, тобто попарних порівнянь та визначення вагових коефіцієнтів локальних критеріїв  $S_{Li}$ . У блоці 15 визначаються кінцева сумарна оцінка альтернатив. В блоці 16 виконується формування неупорядкованої множини результатів опитування усіх експертів. Ця інформація необхідна для подальшого визначення результатів анкетування та подальшої обробки отриманих результатів.

Наступним кроком (блок 17) є використання ПП FMCSA для обробки отриманих результатів експертів методами Middle Method Solution Arithmetic Method – MMS:A (середнє арифметичне), Quasi-Best Method Solution - QBMS (метод найкращого випадку) та Worst Method Solution – WMS (метод найгіршого випадку).

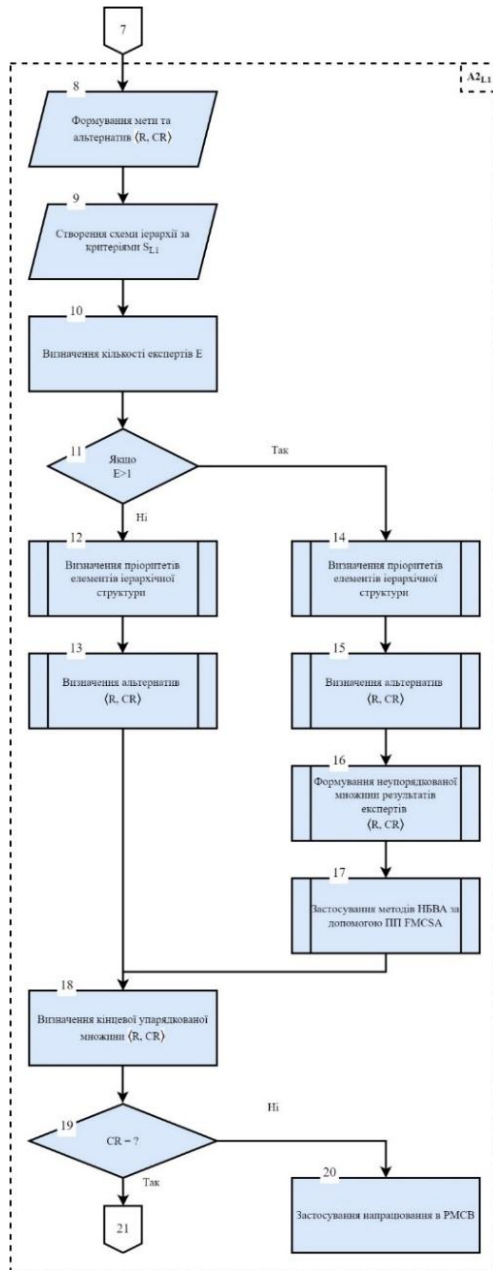


Рис. 4.3 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі МАІ, блок  $A2L1$  за рис. 2.3

В блоці 18 визначається інформація, отримана після виконання операцій в блоці 17 та в блоці 13, тобто визначається кінцева упорядкована множина  $\langle R, CR \rangle$ , яка визначає можливість впровадження або не впровадження колаборативних технологій.

Отриманий результат є вагомою умовою для реалізації наступних підрівнів L2.1 та L2.2 (блок 19) рівня L2.

Якщо кінцевим результатом одного або кінцевої множини експертів є альтернатива CR, то виконується перехід на наступні рівні, а саме рівень  $A_{3L2.1}$  та його реалізація за пропонованим системним тривірневим підходом при аванпроектуванні КРМСТ.

У випадку, коли результатом одного або кінцевої множини експертів є альтернатива R, тоді застосовуються напрацювання з «класичної» автоматизації та роботизації у РМСВ (блок 20), що тут не розглядається.

Алгоритмічне представлення виконання тактичного рівня  $A_{3L2.1}$  подано на рис. 4.4. Загальна послідовність дій зберігається як в блоках 8-19 блок-схеми алгоритму стратегічного рівня L1 (рис. 4.3).

Проте наявні деякі відмітності, наприклад, різні критерії, а й відповідно цілі, альтернативи та схема ієрархії МАІ для поставленої задачі на тактичному рівні  $A_{3L2.1}$ .

В блоці 21 формується наступна задача тактичного рівня L2.1: «Розподіл технологічних завдань між людиною (H), роботом (R), виконання в колаборації (HRC) та технологічне обладнання (TE)».

Далі в блоці 22 створюється схема ієрархії за локальними критеріями  $S_{L2}$ , кількість та вид яких залежить від поставленої задачі та базисної інформації, яка була підготовлена на попередніх етапах та представлена далі в п 4.3. Після формування схеми ієрархії, де визначена мета, локальні критерії та альтернативи, визначається кількість експертів  $|E|$ , що виконується в блоці 26. В залежності від кінцевої кількості експертів процедура реалізації процесу прийняття рішень на основі МАІ дещо відрізняється (блок 24) та визначається двома варіантами  $|E|=1$  або  $E>1$ . Якщо експерт один  $|E|=1$ , тоді виконується процедура, що описана в блоках 25 та 26. Якщо кількість експертів більше одиниці  $|E|>1$ , тоді виконуються операції в блоках 27-30, які за своїм змістом та послідовністю кроків є аналогічними крокам 14-17.

В блоці 31 визначається інформація, отримана після виконання операцій в блоці 30 та в блоці 26, тобто визначається упорядкованість кінцевої множини  $\langle H, R, HRC, TE \rangle$ , яка визначає пріоритети розподілу завдань між людиною та КПП або технологічним обладнанням.

Якщо кінцевим результатом одного або кінцевої множини експертів є альтернатива HRC, то виконується збір інформації про кількість таких результатів для конкретної ТСС (блок 32). Конкретно це проявляється збором та аналізом результатів анкетування.

Далі виконується перехід на наступний рівень, а саме рівень  $A_{3L2.2}$ , та їх реалізація за пропонованим системним трирівневим підходом при аванпроектуванні КРМСТ.

На рис. 4.5 подано блок-схему алгоритму виконання тактичного рівня  $L2.2$ .

Загальна послідовність дій зберігається як і в блоках 21-32 блок-схеми алгоритму тактичного рівня  $L2.1$  (рис. 4.4). Проте наявні деякі відмінності, наприклад, різні критерії, а й відповідно цілі, альтернативи та схема ієрархії МАІ для поставленої задачі на тактичному рівні  $A_{3L2.2}$ .

В блоці 33 формується наступна задача тактичного рівня  $L2.2$  як «Визначення виду взаємодії між людиною та КПП». Вище вказане визначено альтернативами *Coex* – співіснування, *Coop* – кооперація та *Coll* – колаборативність, що записується як  $\langle Coex, Coop, Coll \rangle$ . Далі в блоці 34 створюється схема ієрархії за локальними критеріями  $S_{L2.1}$ .

Кількість та вид локальних критеріїв залежить від поставленої задачі та базисної інформації, яка була підготовлена на попередніх етапах та представлена на рис. 4.22. Після формування схеми ієрархії, де визначена мета, локальні критерії та альтернативи, в блоці 35 визначається кількість експертів  $|E|$  для подальшого експертного анкетування за підготовленою раніше схемою ієрархії.

В залежності від кінцевої кількості експертів далі процедура реалізації процесу прийняття рішень на основі МАІ (блок 36) визначається за двома випадками  $|E|=1$ , або  $|E|>1$ . Якщо експерт один  $|E|=1$ , то виконується процедура, що описана в блоках 37 та 38, відповідно до блоків 25 та 26. Якщо кількість експертів більше одиниці  $|E|>1$ , то виконуються операції в блоках 39-43, які за змістовністю повторюють блоки 14-17 та 27-30.

В блоці 43 визначається інформація, отримана після виконання операцій в блоці 42, а саме застосування методів НБВА за допомогою ПП FMCSA, та в блоці 38 (визначення альтернатив без застосування ПП FMCSA), тобто визначається кінцева упорядкована множина видів колаборативності  $\langle Coex, Coop, Coll \rangle$ .

У блоці 44 формується вихідна інформація щодо альтернатив для ТПг КРМСВ.

Вищевказана алгоритмічна реалізація пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРМСВ (рис. 4.2-4.5) базується на основі розробленого методичному забезпеченні, висвітленому в розділі 2, а саме на основі SADT-діаграм, висвітлених на рис. 2.3-2.7 та на основі розробленого інформаційного забезпечення, висвітленого на рис. 3.1. Представлені алгоритми доповнюють вище описану див. п.2.1 інформацію щодо пропонованого підходу та висвітлюють послідовність дій для його реалізації.

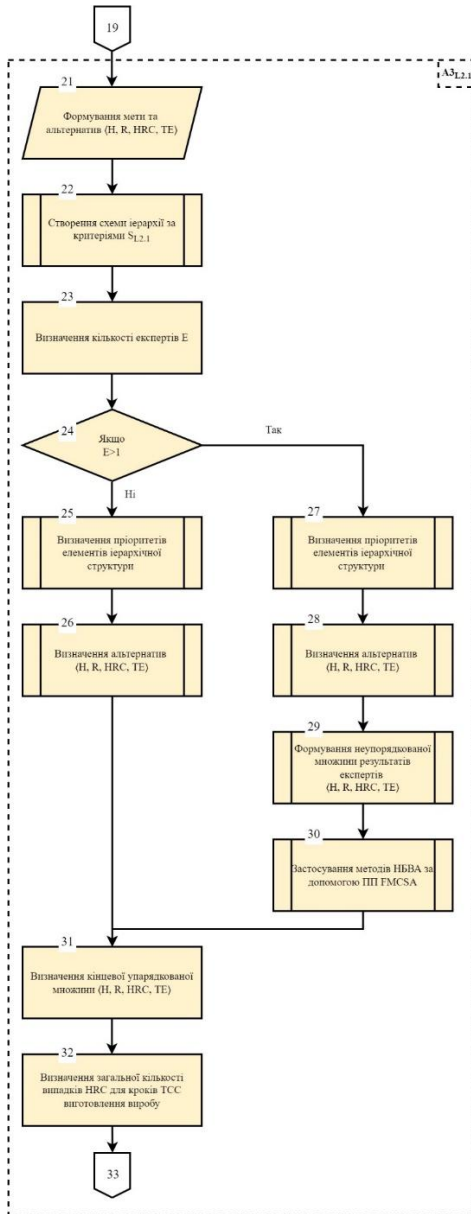


Рис. 4.4 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі МАІ, блок А3L2.1 за рис. 2.3

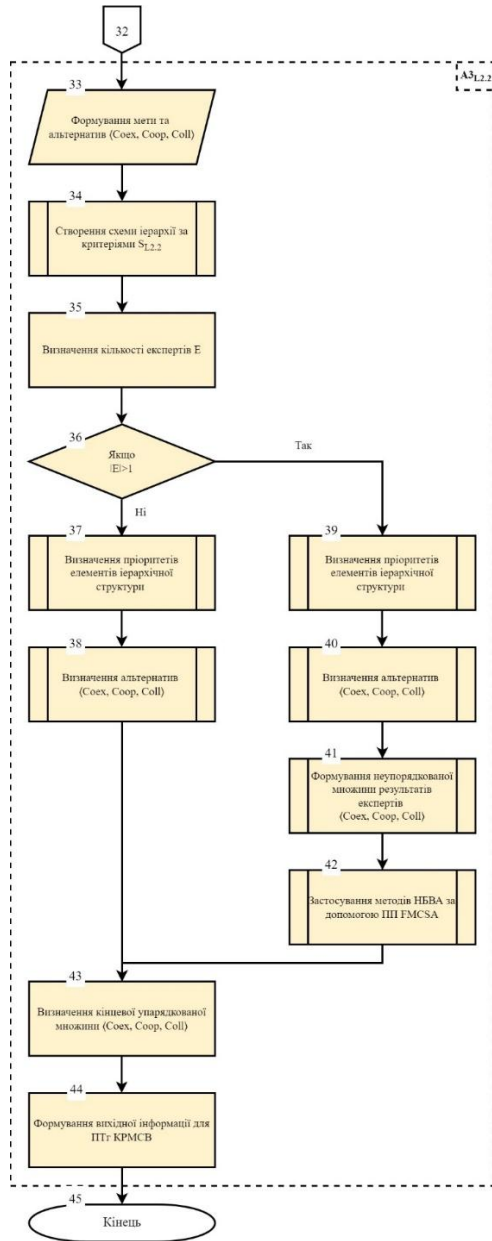


Рис. 4.5 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі МАІ, блок  $A3_{L2.2}$  за рис. 2.3

#### 4.1.2. Узагальнений алгоритм НБВА при аванпроектуванні КРМСТ

Алгоритмічна реалізація обробки інформації за НБВА, який використовується тільки при  $|E| > 1$ , із використанням ПП FMCSA представлена на рис. 4.6.

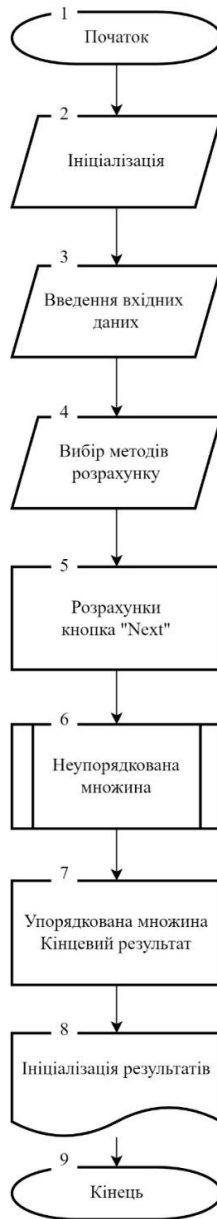
У блоці 2 виконується процес ініціалізації ПП на ПК користувача. Він полягає в тому, що ПП ініціалізує програмний код з відповідними розробленими бібліотеками виконання методик обробки даних за НБВА. Введення вхідних даних у підтримуваному форматі з сховища ПК виконується в блоці 3. Попередньо вхідні дані можуть формуватися в різних сторонніх ПП, наприклад, в MS Excel та в ПП, які генерують файли формату *.txt*. Найпоширенішим варіантом формування вхідних даних є табличні форми з MS Excel.

В блоці 4 користувач обрає певні методи, за якими обчислюються параметри порівнянь при формуванні проміжних та кінцевих даних. Сам процес обчислень відбувається натисканням клавіші «Next» (блок 5) і передбачає виконання процесу розрахунку за двома варіантами, а саме: покрокова реалізація розрахунку, де користувач керує процесом переходу між кроками і спостерігає реалізацію покрокових результатів; за вибором користувача можливо отримати одразу кінцевий результат (блок 7).

Для фіксації неупорядкованої множини отриманої нечітких оцінок в блоці 6, де відтворюється вказана неупорядкована множину нечітких оцінок. Кінцевий результат отримується в блоці 7. Результати розрахунків можна спостерігати на екрані або отримати їх лістинг (блок 8).

Доцільно наголосити, що блоки 2, 3, 4 та 5 виконуються користувачем вручну, а кінцеві результати отримуються автоматично і представленні результати у вигляді екранних форм для кожного з кроків при складанні вала ведучого можна спостерігати в п. 4.3.3.

Основою розробленого алгоритму (рис. 4.7., 4.8.) є попередньо розроблене методичне забезпечення процесу атестації метрики КПР/ПР (див. п. 2.4.). Вище вказане практично реалізовано на базі комплексного використання програмних продуктів (ПП) SolidWorks та RoboDK. Сутність алгоритму, що реалізує вказану методику, зводиться до наступної послідовності дій: структуризація та параметризація (*I етап*), імплементація (*II етап*), дослідження (*III етап*), обробка даних та їх візуалізація (*IV етап*). Їх зміст розкривається нижче.



*Рис. 4.6 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі MAI, блок A3<sub>L2.2</sub> за рис. 2.3*

### 4.1.3. Узагальнений алгоритм атестації метрики МС КПП

В даному розділі розглядається алгоритм однієї з частин виконавського рівня L3, яка висвітлена на блоці A4<sub>L3</sub> на рис. 2.3., та алгоритмічно представлена на рис. 4.7. та на рис. 4.8.

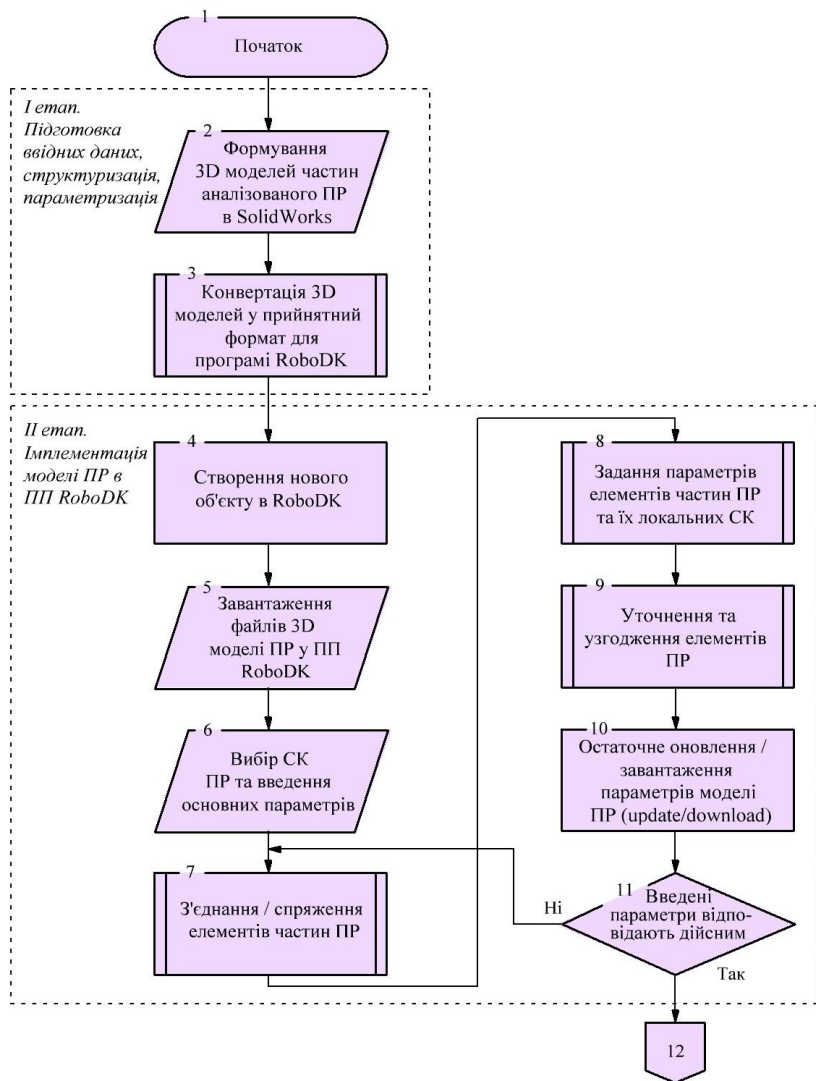


Рис. 4.7. – Стислий алгоритм атестації метрики КПП

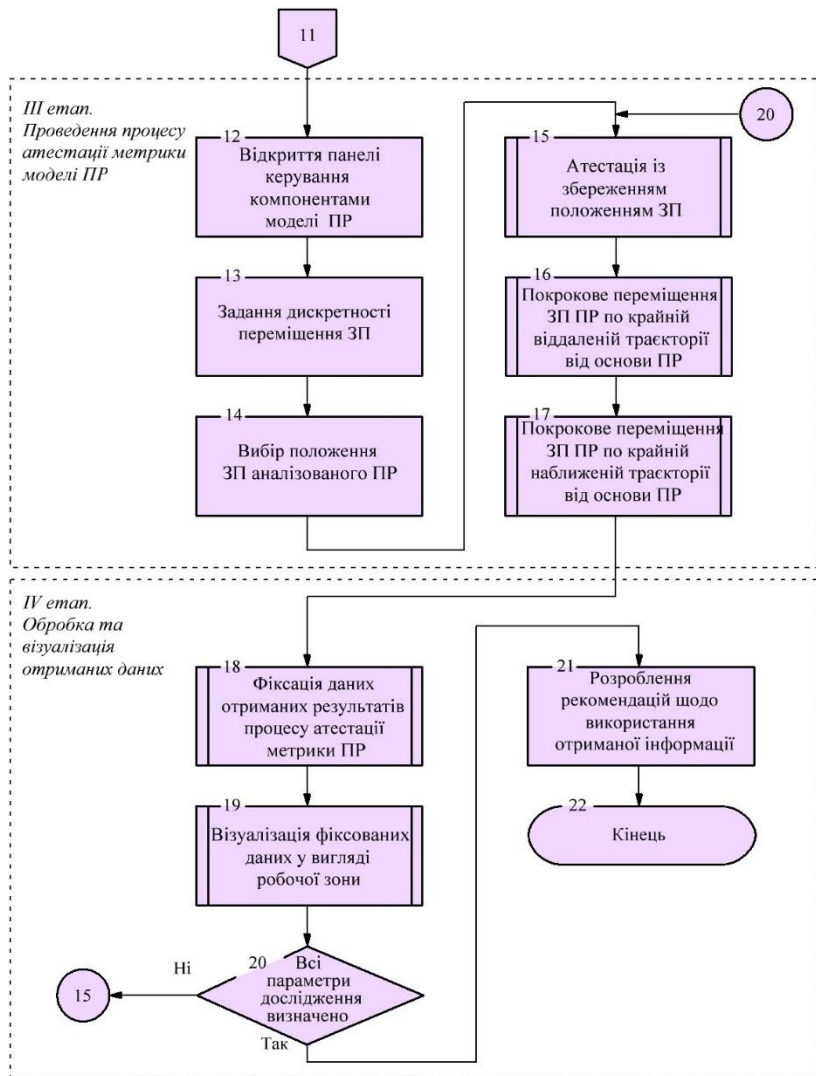


Рис. 4.8. – Стислий алгоритм атестації метрики КПП

Початок алгоритму (*I етап*) забезпечує виконання підготовчих операцій, а саме формування 3D-моделей компонентів (ланок) досліджуваного ПР в ПП SolidWorks (блок 2). Варто зазначити, що існують особливості формування 3D-моделей в різних САД-програмах, що може вплинути на подальші дослідження в інших програмних середовищах. Наприклад, при використанні неспеціалізованих ПП можливі прояви ряду помилок, артефактів розривів 3D- об'єктів тощо, що в свою чергу вплине на кінцеві результати досліджень атестації метрики КПР. Змістом блоку 3 є конвертація розроблених або доступних 3D-компонентів моделей складових КПР в формат *.stl*, що є необхідним для подальшої роботи з ними (компонентами) в ПП RoboDK. Даний крок є важливим щодо формування якісних 3D-моделей компонентів КПР, тому рекомендується встановлювати високу якість форматування із збереженням всіх форм, тобто без спрощення та зменшення графічних елементарних частинок (полігонів) для кінцевих файлів розширення *.stl*. У випадку знехтування вищевказаного можлива втрата деталізації моделі КПР та поява різноманітних вищеописаних дефектів, які впливають на результати досліджень. Наприклад, при низькій якості деталізації 3D-моделей компонентів ПР/КПР можливі помилки при виконання програмного коду атестації метрики МС ПР/КПР в RoboDK.

На другому етапі (*II етап*) (див. блоки 4–11 на рис. 4.7) здійснюється налаштування КПР як єдиної механічної системи із попередньо завантажених 3D-компонентів КПР у RoboDK. При цьому створюється новий об'єкт у ПП RoboDK (блок 4), тобто створюється робочий простір (РП) для механізмів, в даному випадку для КПР із вказанням початкових параметрів, наприклад, розмір робочого простору для обраного проекту. В блоці 5 3D-моделі компонентів ПР завантажуються у створений РП із відповідним розташуванням та визначеною орієнтацією в просторі. Виконання комплексу дій для параметризації та налаштування попередньо завантажених елементів реалізується в наступних блоках: блок 6 - вибір системи координат КПР та кількості ступенів рухомості (для нових ПР/КПР), тобто параметра *DoF (Degrees of Freedom)* для КПР; блок 7 – з'єднання та спряження за відповідними правилами 3D-моделей компонентів КПР; блок 8 – забезпечення якісних та кількісних параметрів відносної рухомості ланок МС, наприклад, максимального кута обертання; блок 9 – розрахунки щодо уникання різного роду колізій. Кінцевими кроками *II етапу* є остаточне завантаження параметрів моделі ПР (блок 10) та їх комплексна перевірка щодо відповідності технічним характеристикам аналізованого робота (блок 11). Виконання вищеописаних процедур підготовки комплексної 3D-моделі КПР та/або ПР виконуються та перевіряються особисто користувачем ПП.

На третьому етапі (*III етап*) виконується процес як такої атестації метрики МС аналізованого КПР. Для його забезпечення використовується панель керування як головний інструмент управління 3D-моделлю КПР у

робочий простір ПП RoboDK (блок 12). Дана панель керування має функціональні можливості виконувати покрокове визначення крайніх граничних точок у робочій зоні КПП, при яких забезпечується збереження заданої орієнтації ЗП відносно площини  $X_{IR}OY_{IR}$  прийнятої СК КПП. Для проведення атестації метрики в блоці 13 користувачем визначається кутова та лінійна дискретність переміщення ЗП у РЗ КПП із збереженням його (ЗП) заданого положення та орієнтації. В блоці 14 обирається фіксоване положення для ЗП досліджуваного КПП. Кінцевими кроками даного етапу є виконання процесу атестації метрики КПП (блок 15), що реалізується дискретно-покровим переміщенням ЗП КПП по крайніх (віддаленій та наближеній) траєкторіях щодо площини  $X_{IR}OZ_{IR}$  в СК КПП. При цьому теоретико-методичною основою реалізації процесу атестації метрики КПП як такої є багаторазове розв'язування зворотної задачі кінематики із врахуванням геометричних параметрів 3D-моделі компонентів метрики КПП, тобто ланок та їх послідовності в МС, виду та величин їх взаємних переміщень та ЗП КПП.

Завершальний *IV етап* забезпечує фіксацію, обробку та візуалізацію отриманої інформації (блоки 18 та 19). Фіксація та обробка інформації виконується в напівавтоматичному режимі. Візуалізація забезпечується САД- програмами, в даному випадку SolidWorks, та представлена у вигляді об'ємної 3D-зони, в якій забезпечується збереження орієнтації ЗП за результатами атестації. Завершальним кроком *IV етапу* є кінцева перевірка відповідності кількості та якості досліджених параметрів щодо паспортних даних КПП та методики атестації метрики КПП. Кінцевим кроком (блок 21) є узагальнення отриманих графічних результатів щодо практичного використання КПП.

Кінцевими результатами є геометричні форми робочих зон КПП, при яких зберігається фіксоване положення та орієнтація ЗП у системі координат КПП, які є важливими та необхідними, особливо на початкових етапах проектування КРТ, а відтак і при ТПГ КРМСВ.

Отримана інформація може бути використана при реалізації окремих складових ТПГ КРМСВ, а саме: при плануванні та розміщенні технологічного обладнання; підвищенні ергономічної складової КРМСТ, складанні технологічних траєкторій КРМСТ в частині визначених векторів підходу/відходу характеристичних точок при завантаженні/розвантаженні технологічного обладнання тощо.

## **4.2. Програмне забезпечення реалізації пропонованого підходу**

### **4.2.1. Програмна реалізація МАІ**

Пропонований трирівневий підхід аванпроективання КРТ в частині використання МАІ виконується в автоматизованому режимі за допомогою

ПП MS Excel. Microsoft Excel – це програмне забезпечення для аркушів розрахунків, яке входить до складу офісного пакету Microsoft Office. Ця програма розроблена для створення, редагування, аналізу та візуалізації даних у вигляді електронних таблиць.

Основні функції та можливості MS Excel подані нижче.

1. Створення електронних таблиць: Excel дозволяє користувачам створювати електронні таблиці, де дані вводяться у вигляді клітинок (як рядки та стовпці). Кожна клітина може містити текст, числа, дати, формули тощо.

2. Формули та функції: Excel надає багато вбудованих математичних функцій і формул, які дозволяють автоматично виконувати різноманітні розрахунки і операції над даними. Наприклад, SUM – для підсумовування, AVERAGE – для середнього значення і IF – для логічних умов.

3. Графіки та діаграми: Excel дозволяє створювати різноманітні графіки і діаграми на основі певних даних. Це допомагає візуалізувати інформацію і легко аналізувати її.

4. Сортування і фільтрація: можливість сортування даних за різними критеріями і використовувати фільтри, щоб відобразити тільки певну частину даних.

5. Макроси і автоматизація: можливість створення макросів для автоматизації рутинних завдань і забезпечення швидкого виконання певних операцій.

Excel використовується в різних галузях, включаючи фінанси, бухгалтерію, науку, бізнес-аналіз, управління проектами і багато інших. Він є потужним інструментом для роботи з даними і допомагає спростити і поліпшити багато аспектів роботи з інформацією.

Даний ПП підтримує функціональні можливості, що необхідні для виконання математичних та матричних операцій, які є необхідною складовою для реалізації МАІ.

Реалізація пропонованого підходу анкетування за допомогою ПП MS Excel виконана у вигляді «аркуша», де представлені критерії та альтернативи в табличних формах для виконання попарних порівнянь експертами (див. рис. 4.9).

При виконанні процедури анкетування експерту необхідно заповнити відкриті для редагування комірки таблиць відповідно до пропонованого МАІ, який описаний в розділі 2 та 3.

Загальна робота експерта зводиться до заповнення вільних комірок таблиць відповідними цифровими значеннями, які відповідають його оцінці або судженням на певних етапах виконання анкетування за МАІ.

Матриця пріоритизації	Вага компонентів	Об'єм компонентів	Фіз. Мех. Властивості	Можливість заповнення	Технологічність компонентів	Орієнтуваність компонентів	Точність складання	Час операції	Вага компонентів	Об'єм компонентів
Вага компонентів	1	4	6	0,2	0,5	4	0,5	0,5	0,07895	0,27366
Об'єм компонентів	0,25	1	5	6	0,5	4	0,2	0,5	0,01974	0,06842
Фіз. Мех. Властивості	0,16667	0,2	1	5	0,5	0,5	0,2	0,5	0,01316	0,01368
Можливість заповнення	5	0,16667	0,2	1	0,5	0,5	1	0,5	0,39474	0,0114
Технологічність компонентів	2	2	2	2	1	0,5	0,5	0,5	0,15789	0,13683
Орієнтуваність компонентів	0,25	0,25	2	5	2	1	0,2	0,2	0,01974	0,0171
Точність складання	2	5	5	1	2	5	1	4	0,15789	0,34208
Час операції	2	2	2	2	2	5	0,25	1	0,15789	0,13683
	12,6667	14,6167	23,2	22,2	9	20,5	3,85	7,7	0,664	0,504
<b>Вага компонентів</b>										
Людина	1	0,2	0,2	0,2			0,0625	0,07895	0,04412	0,03846
Робот	5	1	3	1			0,3125	0,39474	0,66176	0,19231
Людина і робот одночасно	5	0,33333	1	3			0,3125	0,13158	0,22059	0,57692
Технологічне обладнання	5	1	0,33333	1			0,3125	0,39474	0,07353	0,19231
	16	2,53333	4,53333	5,2			1,000	1,000	1,000	1,000

Рис. 4.9 – Приклад частини графічного інтерфейсу користувача при виконанні експертного анкетування за МАІ в MS Excel

Загальна робота експерта зводиться до заповнення вільних комірок таблиць відповідними цифровими значеннями, які відповідають його оцінці або судженням на певних етапах виконання анкетування за МАІ.

Результатом роботи є графічні представлення отриманих результатів у вигляді накопичувальних та пелюсткових діаграм (див. рис. 4.10).

На рис. 4.10 відповідно альтернатива, яка отримала більшу сумарну оцінку, має візуально більший «стовпчик», в той час як пелюсткова діаграма має більшу область для такої альтернативи.

#### **4.2.2. Програмна реалізація НБВА**

В запропонованому тривірневому підході аванпроекування КРТ в частині використання МАІ передбачено обробку отриманої неупорядкованої множини результатів експертів при їх кінцевій множині  $|E|>1$ . В даному випадку використовується оригінальний ПП FMCSA (Fuzzy Multi-Criteria Section of Alternatives), розробленого на кафедрі РЕ та А ім. проф. Б.Б. Самотокаїна Державного університету «Житомирська політехніка» під керівництвом д.т.н., проф. кафедри В.А. Кириловича.

Даний ПП підтримує функціональні можливості для реалізації різних методів обробки вхідної інформації. В даному випадку для реалізації обробки отриманих від групи експертів  $|E|>1$  даних використовуються лише декілька методів, які вказані далі в п.4.3.2.

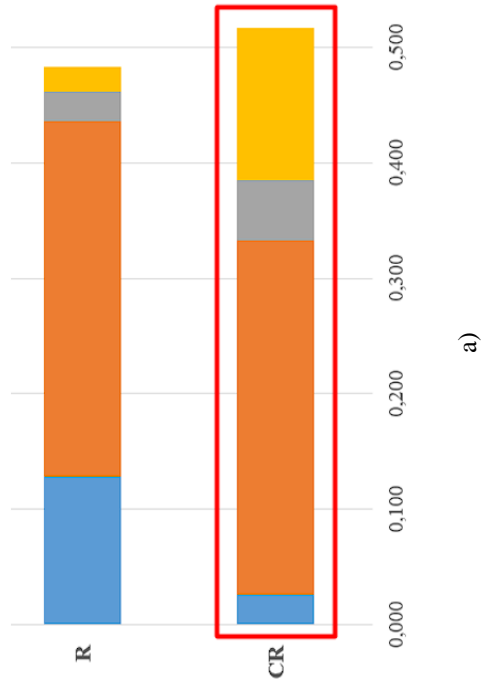
Загальний графічний інтерфейс користувача ПП FMCSA представлена на рис. 4.11 та 4.12. На рис. 4.11 відображено початковий екран вибору вхідної інформації, яка має бути підготовлена в певному підтримуваному форматі, наприклад, формат таблиць MS Excel .xlsx. Вибір певних методів обробки в FMCSA виконується після завантаження вхідної інформації за допомогою виділення в інтерфейсі символом  $\checkmark$  (див. рис. 4.12).

Після вибору методів обробки вхідної інформації та натискання кнопки «Next» на графічному інтерфейсі (права нижня частина на римс. 4.12) програма виконує певні розрахунки та генерує графічні зображення, приклад яких представлено на рис. 4.18.

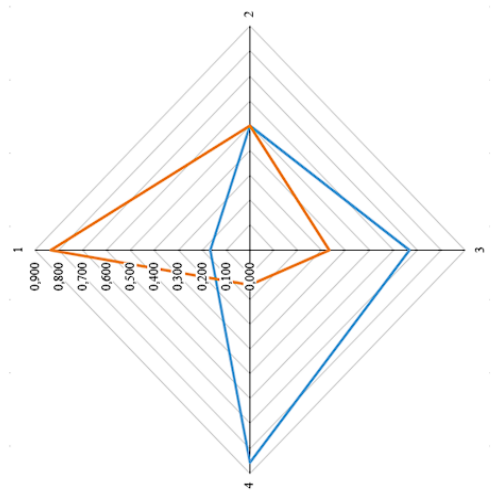
#### **4.2.3. Програмна реалізація атестації метрики ПР та КНР**

Програмна реалізація процесу атестації метрики, яка полягає у багаторазовому виконанні задач кінематики, а саме зворотних задач кінематики, виконується за допомогою ПП RoboDK.

RoboDK – це програмне забезпечення для симуляції та офлайн-програмування промислових роботів. Даний ПП використовується для моделювання та візуалізації роботів, створення програм для керування рухом роботів та генерації файлів управління для виробничих систем.

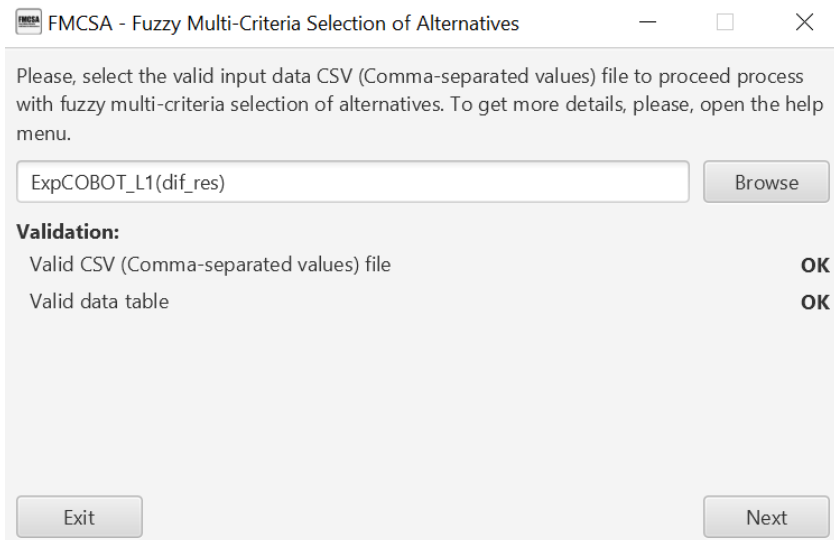


а)

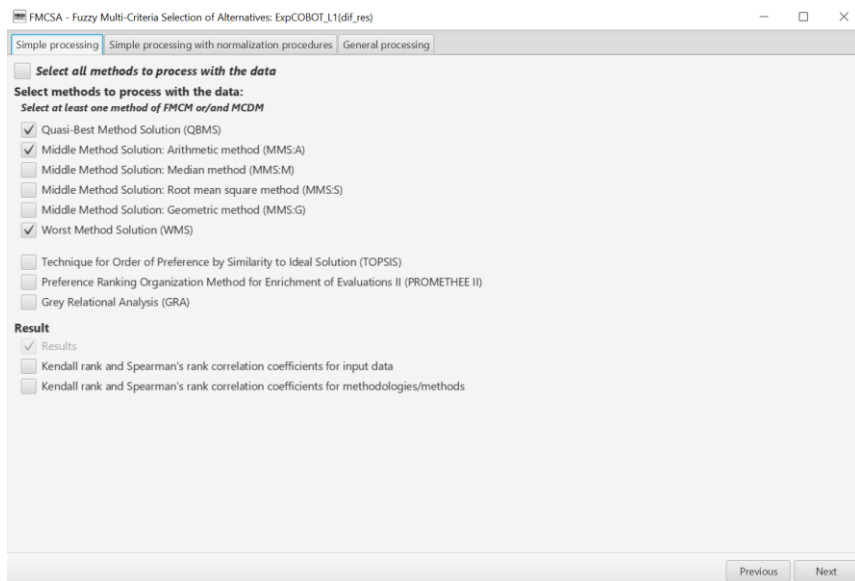


б)

Рис. 4.10 – Приклади діаграм, які генерує MS Excel:  
 а) накопичувальна; б) пелюсткова



*Рис. 4.11 – Загальний інтерфейс FMCSA*



*Рис. 4.12 – Інтерфейс вибору методів обробки в FMCSA*

Основні можливості і характеристики RoboDK включають наступне:

1. Комп'ютерна симуляція роботів: RoboDK дозволяє моделювати різні типи промислових роботів, включаючи роботи з різними кінематичними конфігураціями та інструментами.

2. Офлайн-програмування: за допомогою RoboDK можна створювати програми для керування роботами без прямого підключення до фізичного обладнання. Можливо програмувати траєкторії, налаштовувати точки об'єкта та визначати послідовності операцій.

3. Генерація програмного коду: RoboDK дозволяє генерувати програмний код для різних типів роботів та контролерів. Це допомагає автоматизувати процес програмування і забезпечує сумісність з різними обладнаннями.

4. Імпорт CAD-моделей: імпортування 3D-моделі обладнання та робочого середовища, для точного відображення умови реального виробництва.

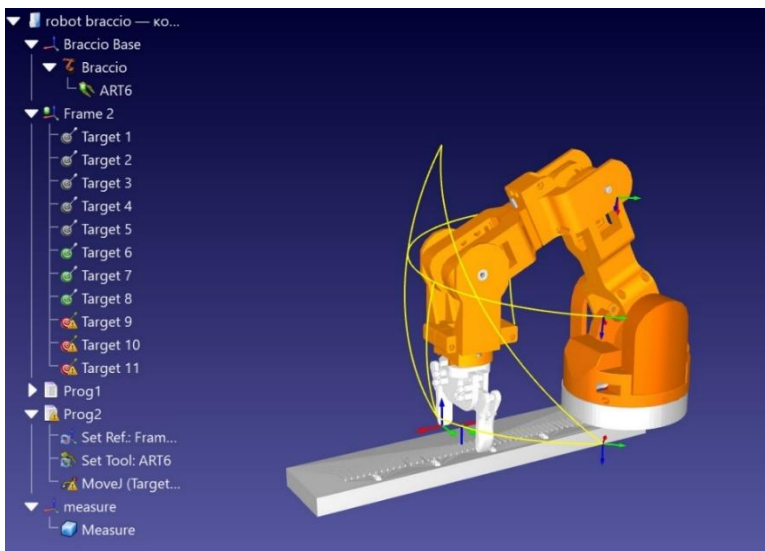
5. Симуляція ЗП та інструментів: RoboDK дозволяє симулювати не лише рух роботів, але і операції зі сторонніми пристроями, такими як ЗП та інструменти.

RoboDK є багатофункціональним ПП для інженерів, які працюють з ПР/КПР, оскільки він допомагає зекономити час та ресурси, спрощуючи процес симуляції, програмування та тестування роботів перед їх впровадженням в реальному виробничому середовищі. Також можлива розробка власного затискного пристрою або будь якого робочого органу робота.

На рис. 4.13 зображено графічний інтерфейс користувача RoboDK з роботом моделі Врассіо.

Необхідними параметрами для вирішення зворотної задачі кінематики є координати точок позиціонування ЗП аналізованого/проектowanego ПР. Після задання однієї точки в програмному додатку, програма дає змогу вибрати, яким чином буде підходити ЗП до представленої точки. Так, як при розв'язанні зворотної задачі кінематики для кінематично надлишкових МС ПР немає однієї єдиної відповіді, то програма пропонує декілька варіантів підходу.

Завдяки багатофункціональності даного ПП результати атестації метрики можливо зберегти в різних форматах починаючи від .txt з кодом розташування опорних точок ланок МС ПР, закінчуючи формуванням 3D-моделей різного призначення.



*Рис. 4.13 – Графічний інтерфейс користувача RoboDK*

### **4.3. Перевірка працездатності функціонування запропонованої багаторівневої системи початкового проектування КРМСТ**

#### **4.3.1. Загальне тлумачення отримуваних результатів МАІ**

При використанні МАІ можливо побачити розгорнуту картину результатів. Це такі результати як вагові коефіцієнти кожного з критеріїв для кожної альтернативи. Дана інформація надає розширене, більш повне розуміння загальної проблеми поставленої задачі та дає змогу різнобічно оцінити результати. Наприклад, для КРМСТ можливо відслідкувати в яких аспектах КРТ краще, або гірше за «класичні» роботизовані, або автоматизовані технології. Вищевказана розгорнута інформація дає змогу людині-проектувальнику більш точно та обґрунтовано прийняти рішення щодо поставлених перед ним задач проектування виробництва. Нижче зазначене в подальшому візуально ілюструється відповідними лінійними та пелюстковими діаграмами, що отримані для  $|E| = 1$  на рівні L1.

Для ілюстрації вищевказаної інформації на рис. 4.14 представлена лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ (за рис. 2.1). На діаграмі стовпці *R* та *CR* відповідно відтворюють нечіткі оцінки «класичних» та колаборативних роботизованих технологій з використанням відповідно *R* та *CR*. Стовпці сегментовано на окремі ділянки, які «накопичують» загальну величину

нечітких оцінок. Ці ділянки є локальними критеріями  $SI_{L1} - S4_{L1}$ , а саме безпека ( $SI_{L1}$ ), продуктивність ( $SI_{L2}$ ), гнучкість налаштування ( $SI_{L3}$ ) та простота використання ( $SI_{L4}$ ) (див. рис. 4.14).

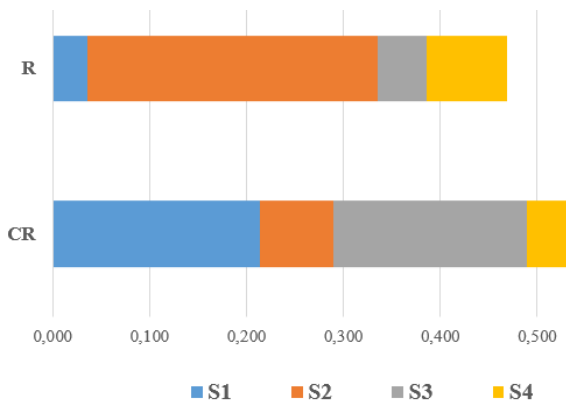


Рис. 4.14 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ за прийнятими критеріями  $SI \dots S4$  для  $L1, |E|=1$

Дане представлення висвітлює пріоритети критеріїв за критеріями ваги для кожної з альтернатив. Можливим є представлення пріоритетів у вигляді пелюсткової діаграми з накопиченням нечітких оцінок щодо визначення можливості впровадження КРТ (див. рис. 4.15).

Вищевказані діаграмне представлення результатів констатує наступне: оцінювання експерта щодо можливості впровадження КРТ в технологію складання вузла редуктора, яка вказана в прикладі в п. 2.2.2. зі вказаним маршрутом складання та ТТС (рис. 2.11. – 2.12.), при прийнятій схемі ієрархії МАІ, яка вказана на рис. 2.14., перевагу мають КРТ перед «класичними» роботизованими технологіями, особливо щодо безпеки та гнучкості налаштування (див. рис. 4.14 – 4.15).

Вищевказана ілюстрація і тлумачення результатів МАІ повно висвітлює оцінки якісного походження одного експерта  $|E|=1$  в кількісній формі з сегментацією за прийнятими критеріями. Це може бути основою для прийняття технологічних рішень для  $L1$  при  $|E|=1$ .

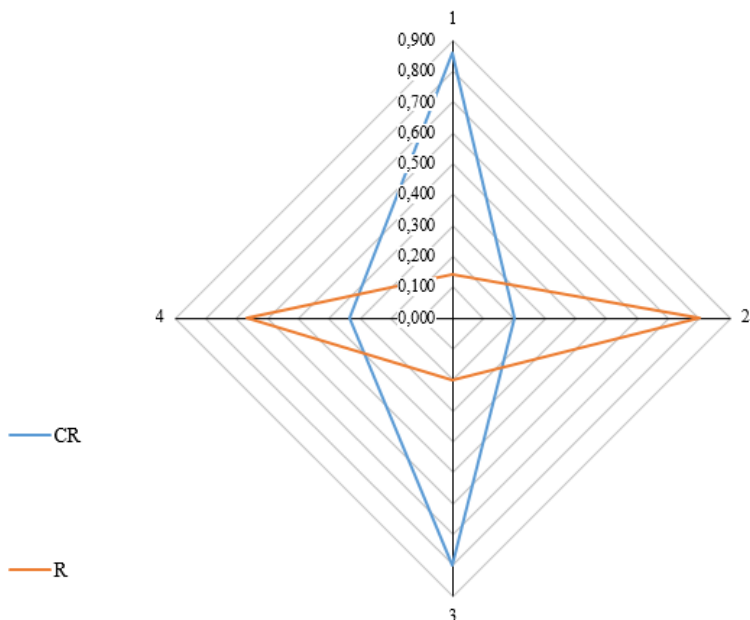


Рис. 4.15 – Радіальна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ за прийнятими критеріями  $S_1, \dots, S_4$  для  $L_1, |E|=1$

### 4.3.2. Загальне тлумачення отримуваних результатів при застосуванні НБВА

Вище представлені результати застосування МАІ для визначення можливості впровадження КТР чи/або ПР, наприклад, в технології складання валу ведучого редуктора одноступінчастого конічного (див. рис. 2.10). Технологічною основою отриманих результатів є ТСС (рис. 2.11), інформація про об'єкт виробництва у вигляді 3D-моделі (рис. 2.8-2.10). Наявність людини-експерта загалом та факт появи одного експерта  $|E|=1$  призводить до достатньо суб'єктивних оцінок та кінцевих результатів. Очевидним є необхідність залучати до прийняття рішень декількох експертів  $|E|>1$ , що інтуїтивно дещо збільшить ймовірність отримання результатів з меншим рівнем суб'єктивізму. Відповідно отримані результати кожного експерта з групи відрізняються від інших результатів. Приклад результатів використання МАІ для групи з трьох експертів продемонстровано на рис. 4.16 – 4.17.

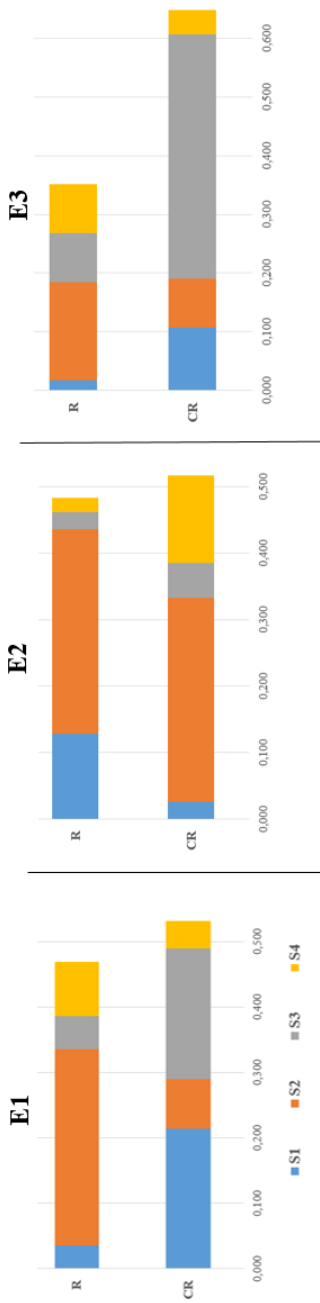


Рис. 4.16 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ для  $|E|=3, LI$

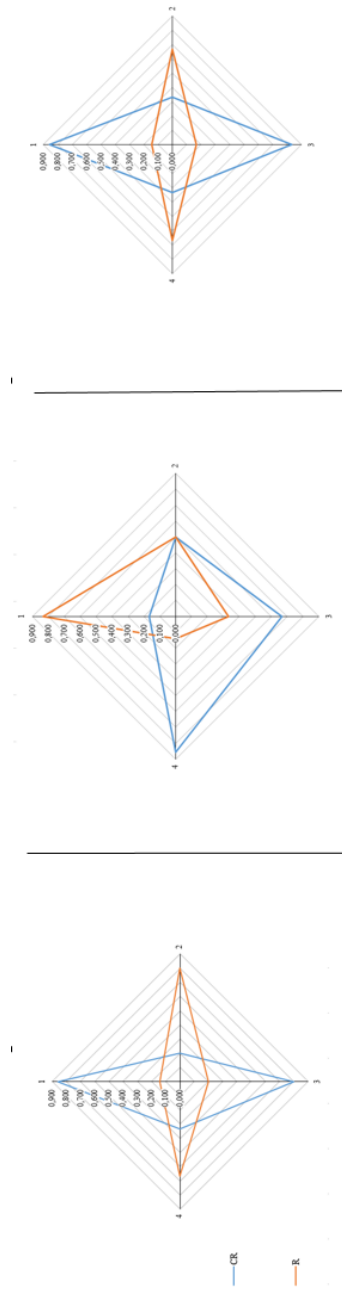
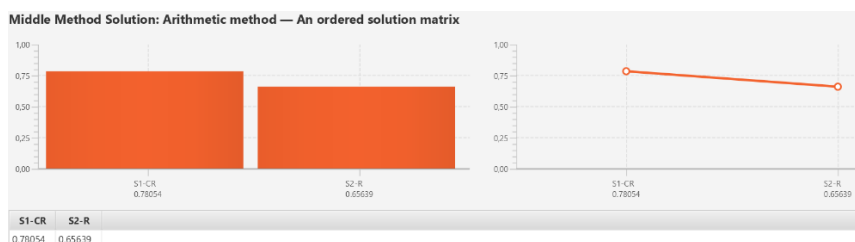


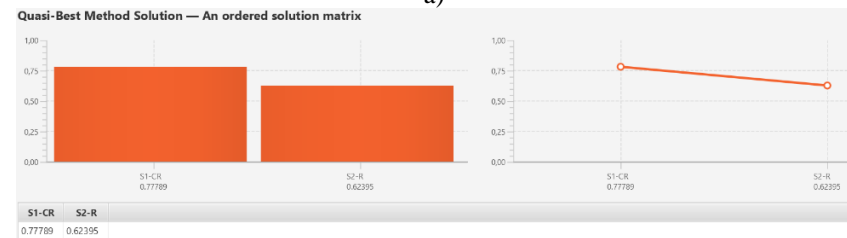
Рис. 4.17 – Радіальна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ для  $|E|=3$ ,  $L1$

Отримані результати для  $|E|=3$  відрізняються один від одного, але в даному випадку вони однотайні щодо наданих переваг CR. Для формування кінцевої оцінки групи експертів пропонується використання НБВА за допомогою оригінального програмного продукту (ПП) FMCSA. Вказане є особливо важливим і навіть необхідним з оцінками для кожного із експертів, що значно відрізняється одна від одної.

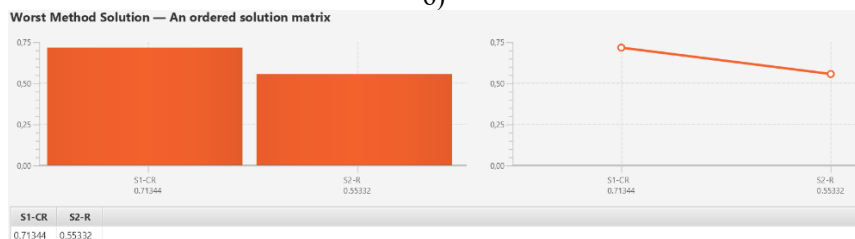
В ПП FMCSA для подальшої обробки отриманих МАІ результатів для  $|E|=3$  серед інших використані наступні методи обробки інформації: Middle method Solution Arithmetic Method – MMS:A (середнє арифметичне), Quasi-Best method solution - QBMS (метод найкращого випадку) та Worst Method Solution – WMS (метод найгіршого випадку). Отримані результати представлені на рис. 4.18.



a)



б)



в)

*Рис. 4.18 – Графічні результати оброблених результатів з групи експертів в програмному продукті FMCSA: а) Middle method Solution Arithmetic Method – MMS:A; б) Quasi-Best method solution – QBMS; в) Worst Method Solution – WMS*

Тут для всіх методів в FMCSA CR мають перевагу у порівнянні з «класичними» *R* у прикладі складання вузла валу вихідного (п. 2.2.2. рис. 2.10.). Проте можливі такі результати використання MAI, де оцінки одного із експертів можуть значно переважати оцінки інших експертів та навпаки.

Можливі інші випадки результатів використання FMCSA, коли результати оцінювання експертів є неоднотайними, тобто відрізняються один від одного. Нижче розглянуто випадок, де результати анкетування одного з експертів, наприклад, E2, відрізняються від результатів опитування інших експертів E1 та E3 (див. рис. 4.19). Тут найменшу накопичену оцінку щодо CR має результат анкетування експерта E2.

У вищевказаних діаграмах спостерігається різні результати оцінювання експертів, де E1 та E3 надають перевагу впровадженню колаборативних технологій, проте мають різні кількісні показники за альтернативами. На рис. 4.20 вказані пелюсткові діаграми, які по іншому ілюструють інформацію, попередньо представлену на рис. 4.19 щодо оцінок експертів.

Оброблені результати MAI з використанням ПП FMCSA висвітлено на рис. 4.21. Відповідно у порівнянні з попередніми результатами за рис. 4.18 очевидними є відмінності у кількісних показниках результатів щодо *R* та *CR* при обробці всіма трьома методами у ПП FMCSA пріоритет має *CR*.

Оброблені результати MAI з використанням ПП FMCSA висвітлено на рис. 4.21. Відповідно у порівнянні з попередніми результатами за рис. 4.18 очевидними є відмінності у кількісних показниках результатів щодо *R* та *CR* при обробці всіма трьома методами у ПП FMCSA пріоритет має *CR*.

Наприклад, у випадку, за рис. 4.18 (метод середнього арифметичного) кількісний показник оцінки надання переваги щодо застосування «класичних» роботизованих виробництв (*R*) становив 0,65639, а в результатах висвітлених на рис. 4.21 даних, становить 0,71846 (вхідні дані подані на рис. 4.16).

Аналогічна ситуація відслідковується для методу найкращого випадку (Quasi-Best Method Solution) та для найгіршого випадку (Worst Method Solution).

Висвітлені тут результати вказують на працездатність пропонованого методу обробки отримуваних результатів MAI за допомогою НБВА, яка реалізується на базі ПП FMCSA. Варто зазначити, що результати залежать як від визначеної кінцевої множини експертів, так і від результатів анкетування. Така інформація є основою для подальшого прийняття рішень при ТПГ ТРМСВ.

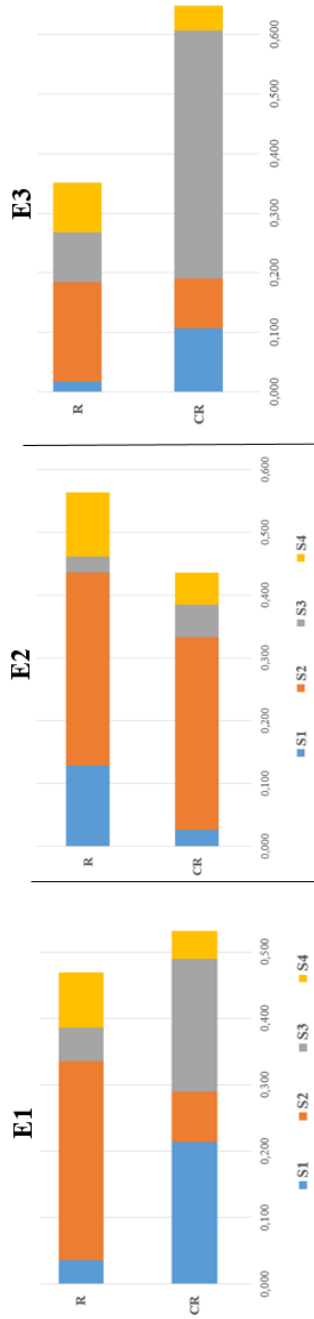


Рис. 4.19 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ з різними оцінками E1, E2, E3 щодо R та CR., LI

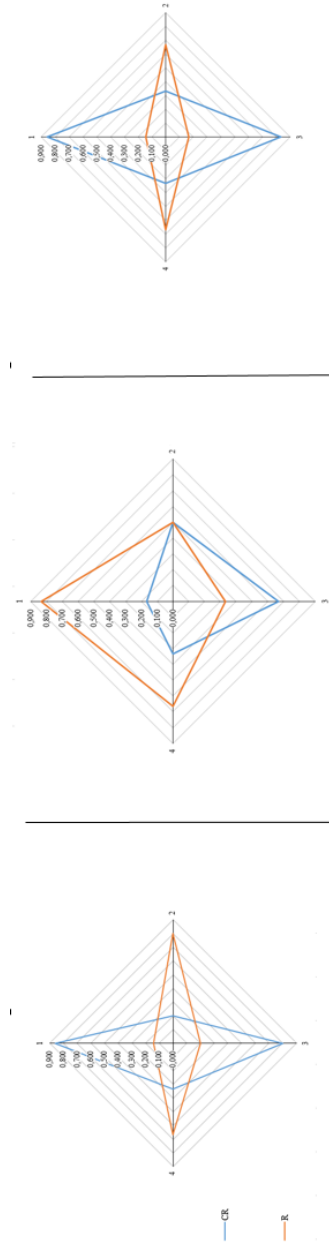
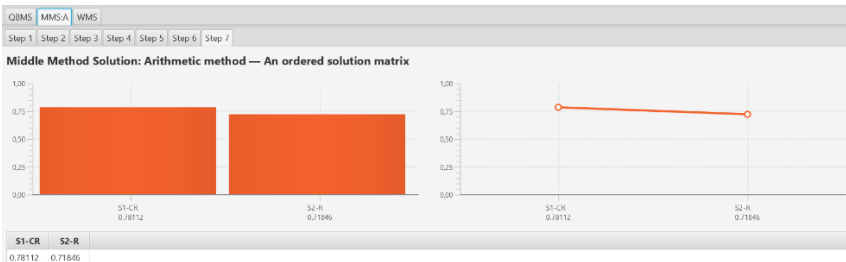
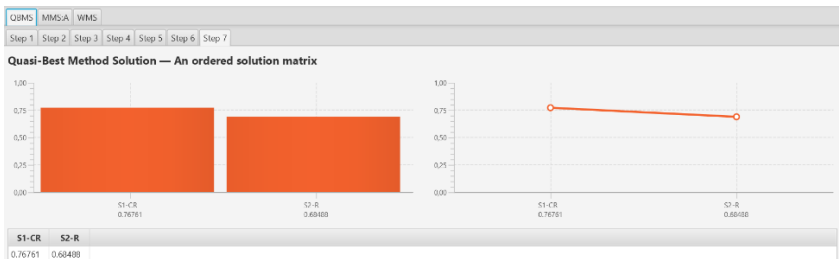


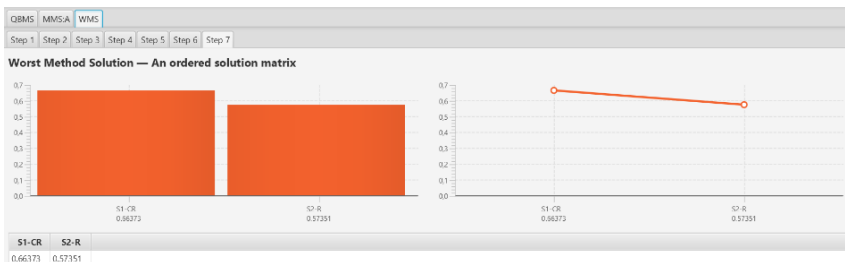
Рис. 4.20 – Пелюсткова діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ з різними оцінками E1, E2, E3 щодо R та CR, LI



a)



б)



в)

Рис. 4.21 – Графічні результати оброблених МАІ результатів ПП FMCSA: а) MMSA; б) QBMS; в) WMS,  $|E|=3$

### 4.3.3. Результати застосування МАІ для пропонованого тривірневого підходу аванпроекування КРТ

Узагальнюючи вищевказані методи та підходи щодо реалізації розробленого тривірневого підходу при аванпроекуванні КРТ виконано експертне оцінювання щодо можливості застосування КРТ (стратегічний рівень L1), розподіл завдань між людиною та КПП (тактичний рівень L2.1), визначення виду взаємодії між людиною та КПП (тактичний рівень L2.2).

Виконання деяких з рівнів передбачають виконання особливих умов на попередніх етапах, а саме для реалізації тактичного рівня L2.1 необхідно отримати оброблені результати експертів щодо можливості впровадження КРТ у виробництво на рівні L1. В іншому випадку подальші дослідження можливо виконувати, але недоцільно, так як на первинному етапі реалізації пропонуваного трирівневого підходу перевагу мають «класичні» роботизовані технології.

Схожа ситуація виникає на тактичному рівні L2.2, який передбачає визначення виду взаємодії між людиною та КПП, а саме: співіснування (*Coex*), кооперація (*Coop*) та колаборація (*Coll*). Без визначення інформації щодо конкретних операцій в технології складання, які мають виконуватись з людиною та роботом, неможливо виконати експертне оцінювання через недостатню повноту та/або відсутність відповідної інформації. Тому реалізація пропонуваного підходу передбачає покрокову послідовність виконання відповідних процедур, оцінювання та обробки інформації для формування кінцевої кількісної оцінки, яка за своїм походженням є накопиченою сумою за результатами попередніх матричних обчислень.

З урахуванням вказаних вище особливостей виконано експертне оцінювання та обробка отримуваних результатів для стратегічного рівня L1, тактичного рівня L2.1 та L2.2 для обраного прикладу ТП складання валу ведучого редуктора одноступінчастого конічного (див. п. 2.2.2). Результати експертного оцінювання та обробленої інформації в FMCSA висвітлені вище в пп. 2.2.3 та 2.2.4, які вказали, що експерти схиляються до впровадження КРТ в даному складальному ТП.

При реалізації тактичного рівня L2.1 для оцінки експертами розроблена схема ієрархії, зображена на рис. 4.22.

Метою в даному випадку є розподіл завдань між людиною та КПП для складального процесу. Критеріями є S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, якими є відповідно вага складальних компонентів, їх об'єм, фізико-механічні властивості, можливість їх захоплення, технологічність, орієнтування, параметри з'єднання (посадка з натягом, зазором тощо) та час виконання складальної операції.

Альтернативами, або варіантами вирішення відповідно, є людина, людина та робот одночасно, робот та технологічне обладнання. Експертне оцінювання проводиться для кожного з кроків маршруту складання та ТСС валу ведучого (рис. 2.14). Результати оцінки одного з експертів  $|E|=1$  подано на рис. 4.23. та 4.24.

Отримані результати за MAI для  $|E|=3$  при реалізації рівня L2.1 для K1 оброблені в ПП FMCSA представлені на рис. 4.25. В даному випадку для K1 абсолютну перевагу має колаборативність ( $H + R$ ) у всіх методах обробки інформації з використанням MMS:A, QBMS та WMS.

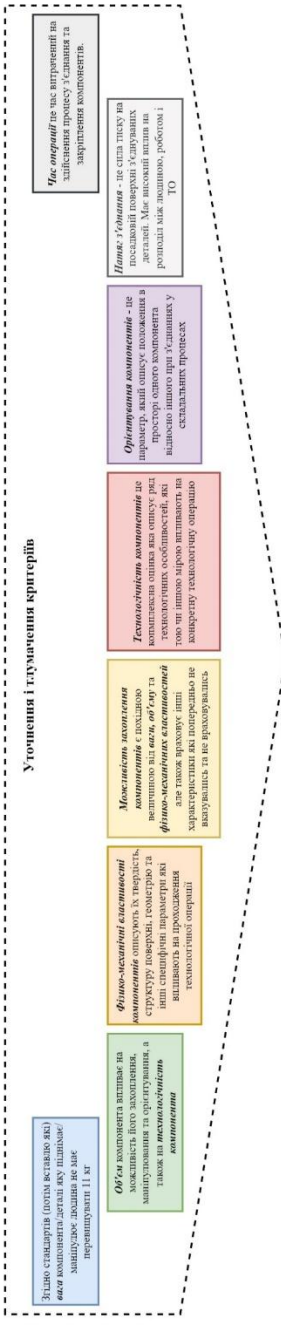
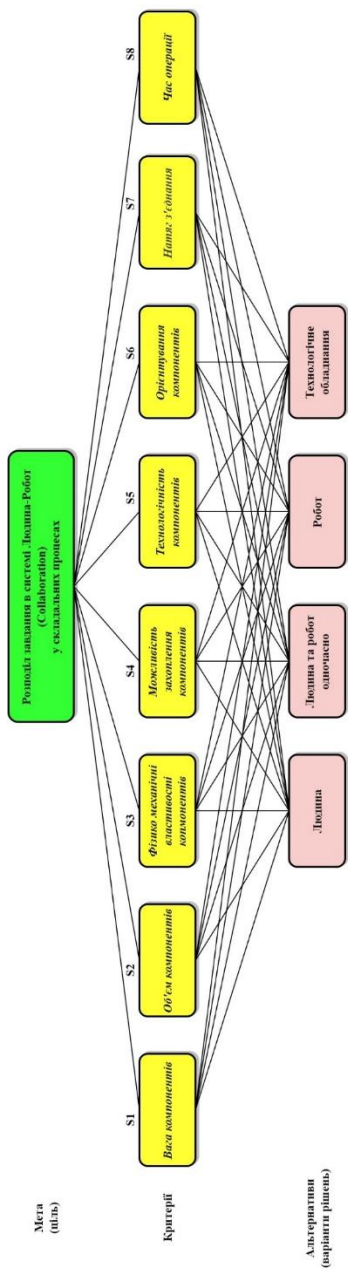
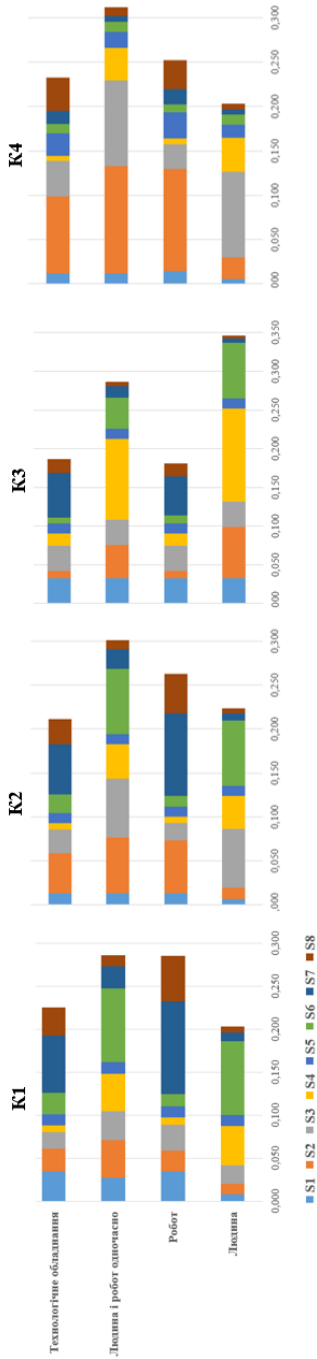


Рис. 4.22 – Схема ієрархії при використанні МАІ для складання вала ведучого редуктора одноступінчастого конічного

● Лінійні діаграми з накопиченням нечітких оцінок локальних критеріїв S1-S8 як результати виконання кроків K1-K4



● Пелюсткові діаграми нечітких оцінок локальних критеріїв S1-S8 як результати виконання кроків K1-K4

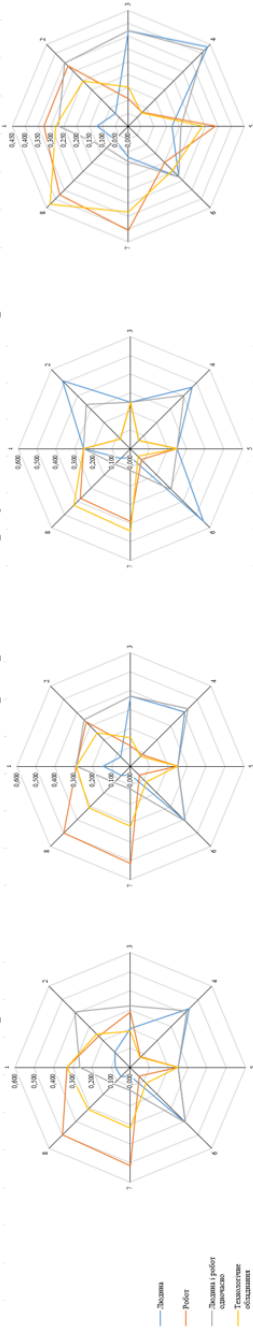
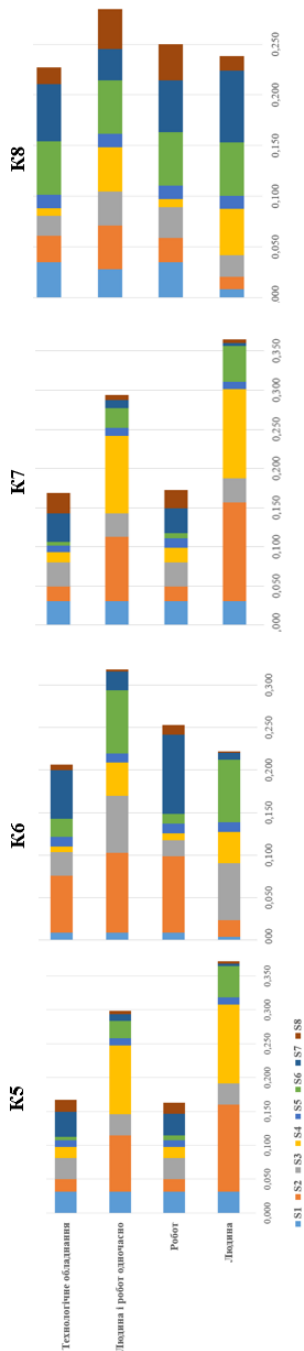


Рис. 4.23 – Результати оцінювання  $|E|=1$  для складання валу ведучого редуктора кінцевого одноступінчастого, кроки K1-K4

● Лінійні діаграми з накопиченням нечітких оцінок локальних критеріїв S1-S8 як результати виконання кроків K5-K8



● Пелюсткові діаграми нечітких оцінок локальних критеріїв S1-S8 як результати виконання кроків K5-K8

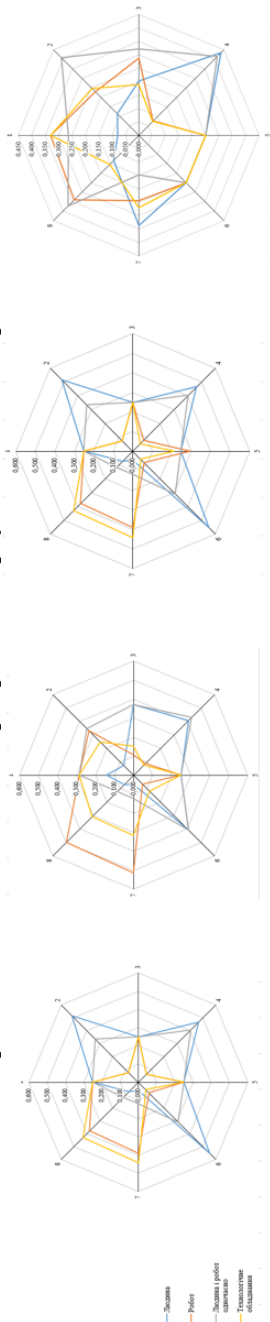


Рис. 4.24 – Результати оцінювання  $|E|=1$  для складання валу ведучого редуктора кінцевого одноступінчастого, кроки K5-K8

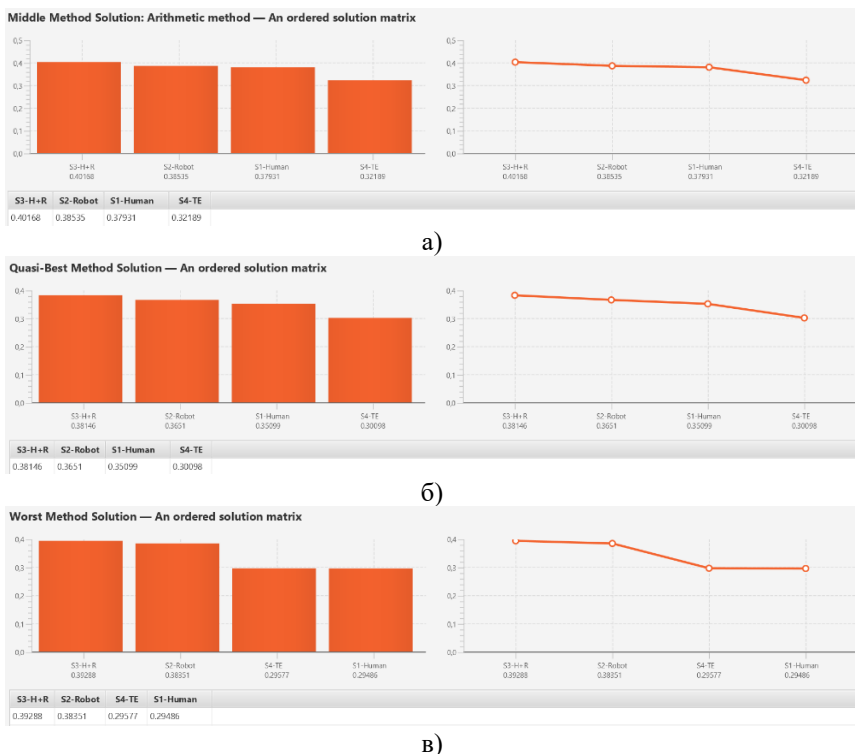


Рис. 4.25 – Графічні результати оброблених в ПП FMCSA результатів використання MAI, рівень L2.1 для  $|E|=3$ , K1:  
 а) MMS:A; б) QBMS; в) WMS,  $|E|=3$

Наступною альтернативою для K1 є використання роботизованих технологій (R). Вищевказані результати формують систематизовану оброблену інформацію для проєктувальника, який, опираючись на особливості ТП, досвіду та вищевказаного, може прийняти певні технологічні рішення.

Для кожного з кроків K1-K8 складання вузла вала (див. рис. 2.10) виконано експертне оцінювання та оброблено отримані результати з використанням ПП FMCSA, що дало комплексне системне розуміння щодо застосування колаборативних технологій для складання вузла вала. Тобто кожний з кроків K1-K8 має упорядковану множину альтернатив щодо розподілу завдань між людиною, КПП, ПР та ТО.

Вищевказана інформація дозволяє реалізувати рівень L2.2, в якому визначається вид технологічної взаємодії між людиною та КПП, в тих кроках K, де робота людини та КПП (H + R) має перевагу над іншими

видами роботи (ПР або ТО). Тому для обраної множини кроків К виконано експертне оцінювання за схемою ієрархії, вказаній на рис. 4.26.

В даному випадку пропонується використання МАІ, де кроки К1, К2, К4, К6 та К8, які були визначені як кроки в ТСС вала, де людина на КПР працюють разом, порівнюються рівноцінно. Альтернативами для рівня L2.2 є співіснування (Coexistence), кооперація (Cooperation) та колаборація (Collaboration). Очевидно, що змістом та результатами порівняння критеріїв в МАІ можуть бути або рівноцінними, тобто оцінки всіх критеріїв дорівнюють 1, або нерівноцінними.

Наступним кроком є визначення альтернатив, а саме Coex – coexistence, Coop – cooperation, Collab – collaboration для кожного з критеріїв К. Кінцеві результати отриманих оцінок експертів (рис. 4.27) є сегментованими кількісними результатами для кожного з К в кожному виді взаємодії людини з КПР, а також накопичену оцінку в цілому, що дає можливість розглянути адаптації всіх кроків до одного виду взаємодії.

Рис. 4.28 є представленням у вигляді пелюсткової діаграми результатів за рис. 4.27.

Отримані за МАІ результати (див. рис. 4.27, 4.28) оброблені за трьома методами MMS:A, QBMS та WMS в ПП FMCSA та представлені на рис. 4.29.

Аналіз змісту рис. 4.29 вказують на однаковість експертів щодо застосування колаборації (Coll) як виду технологічної взаємодії між людиною та КПР для кожного з кроків К. Вищевказане твердження ілюструє можливість розгляду застосування одного виду технологічної взаємодії для всіх К (H + R) проектувальником. Це може бути базисом для підвищення ефективності проектування КРТ ТПг КРМСВ, наприклад, під час програмування та відлагодження КПР за рахунок однотипності технологічної взаємодії людини з КПР.

Вище вказане систематизує отриману інформацію та ілюструє новий комплексний підхід щодо визначення виду взаємодії на початкових етапах проектування КРТ. Отримана інформація підвищує обґрунтованість та економить час при проектуванні КРТ за рахунок визначення можливості узагальнення до одного виду взаємодії між людиною та КПР для конкретних кроків ТСС.

#### **4.3.4. Результати застосування атестації метрики для пропонованого тривірневого підходу при аванпроектуванні КРТ**

##### **4.3.4.1. Атестація метрики з використанням RoboDK та SolidWork**

Пропоновану в п. 2.3.1 методика атестації метрики МСПР випробувано на прикладі автоматизованої атестації метрики МС робота моделі Tinker Kit Braccio [61].

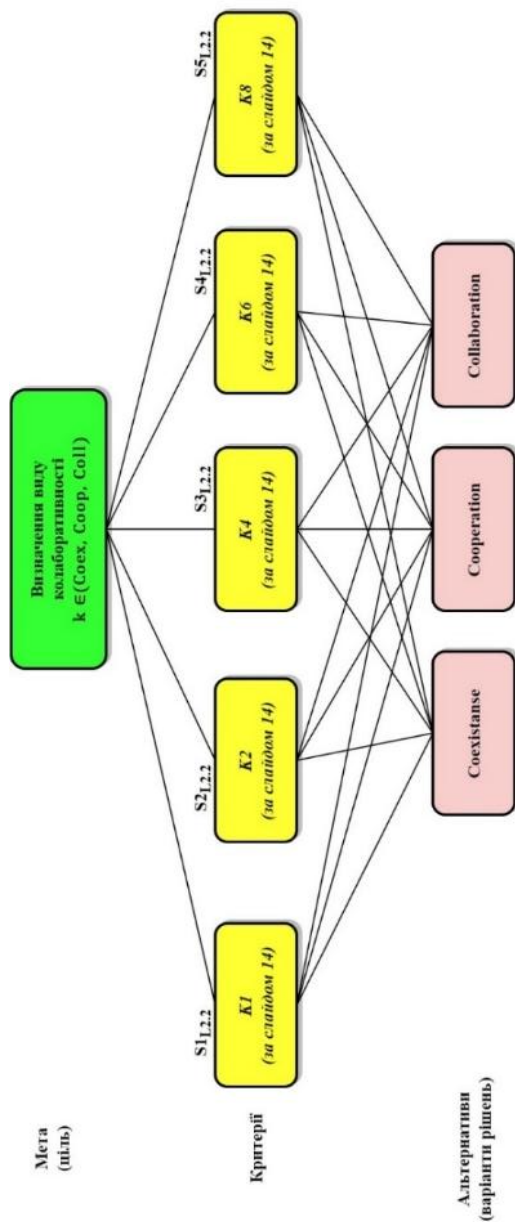


Рис. 4.26 – Схема ієрархії при використанні МАГ для складання вала ведучого редуктора одноступінчастого конічного, рівень L2.2

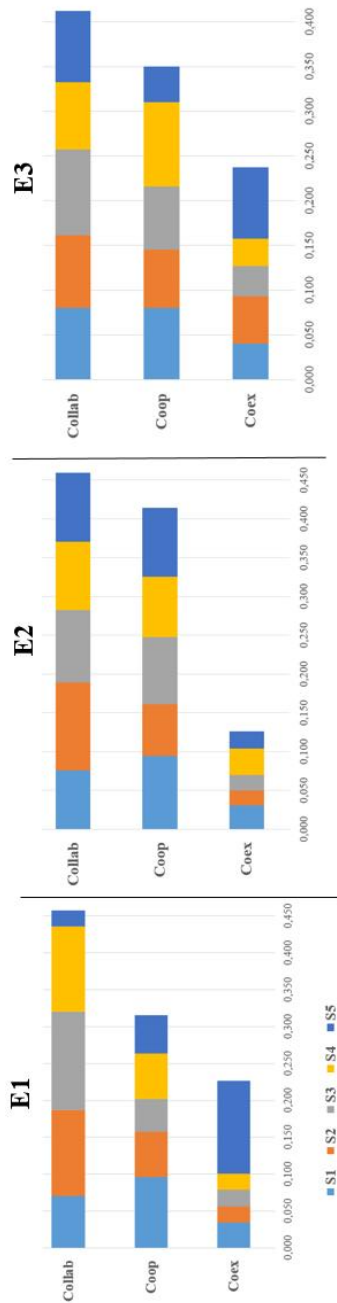


Рис. 4.27 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення виду взаємодії людини та КІП,  $|E|=3$  рівень L2.2

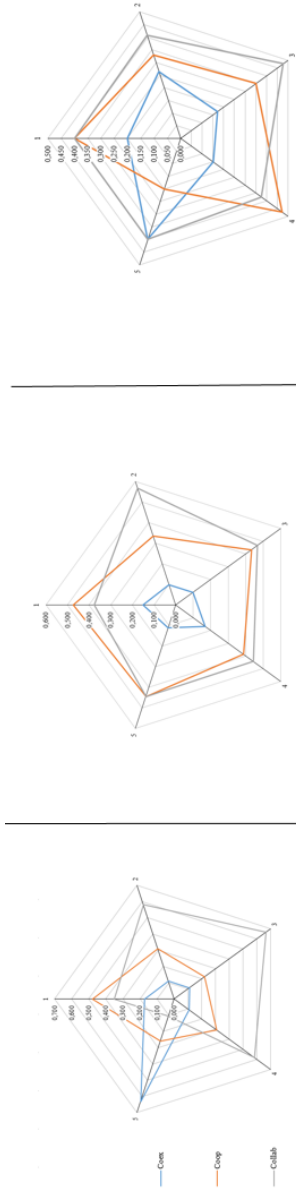
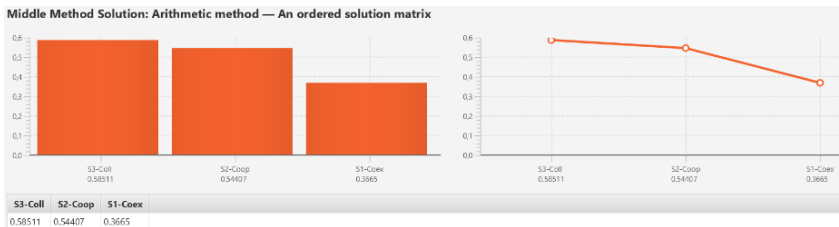
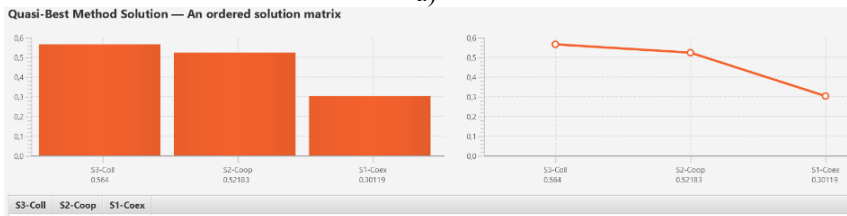


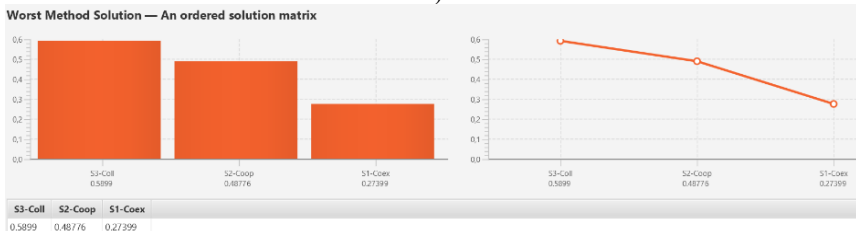
Рис. 4.28 – Радіальна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення виду взаємодії між людиною та КТР за даними рис. 4.26



a)



б)



в)

Рис. 4.29 – Графічні результати оброблених МАІ результатів від групи експертів  $|E|=3$  в ПП FMCSA, при реалізації рівня L2.2 а) MMS:A; б) QBMS; в) WMS

На рис. 4.30 отримані результати представлено у вигляді перерізу частини робочого простору аналізованого робота, де зберігається орієнтація кінцевого елемента Н без ОМ у ЗП у положенні  $90^\circ$  відносно площини  $X_{IR}$  О  $Y_{IR}$ , тобто у вертикальному орієнтованому положенні параметра Н з кутом  $\angle VH = 90^\circ$ , коли ЗП орієнтований затискними елементами вертикально вниз. Зеленим кольором позначена зона, у якій гарантовано зберігається задане положення параметра атестації Н.

На рис. 4.30 графічно зображено 1 – криву зовнішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра Н в інтервалі  $[X_{IRmin} \dots X_{IRmax}] = [162 \dots 232]$  мм; 2 – криву внутрішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра Н в інтервалі  $[Z_{IRmin} \dots Z_{IRmax}] = [0 \dots 68]$  мм.

На рис. 4.30 вказані позначення параметра Н при його положенні в затемненій (зеленій) зоні, а саме з характеристикою, що тут (та далі з

відповідними корективами) позначено як (H-Axis Vertical Down) (WAVD). Подібні позначення в подальшому розглядаються як характеристики параметра атестації Н. Факт незбереженої досліджуваної орієнтації параметра Н в незатемненій зоні вказано відповідно перекресленими зображеннями ЗП поза зеленою зоною.

Аналогічні атестаційні дослідження виконані для  $H_{\max}=65$  мм без ОМ в геометричному напрямку WANF (див. рис. 4.31), тобто вектор Н направлений в сторону збільшення (Forward) радіуса робочої зони робота.

На рис. 4.31 графічно зображено 1 – криву зовнішнього контуру зони атестації при зміні координат в інтервалі  $[X_{IRmin} \dots X_{IRmax}] = [281 \dots 301]$  мм; 2 – криву внутрішнього контуру зони атестації при зміні координат в інтервалі  $[Z_{IRmin} \dots Z_{IRmax}] = [62 \dots 242]$  мм.

Кінцева візуалізація отриманих результатів для параметра атестації  $H=65$  мм без ОМ в ЗП (див. рис. 4.30, рис. 4.31) представлена на рис. 4.32 – 4.34. В спеціалізованому програмному середовищі SolidWorks створено об'ємні 3D-моделі робочої зони робота Tinker Kit Braccio, в яких зображені відповідні частини робочої зони ПР з гарантованими положеннями параметра Н кінцевого елемента (ЗП) без ОМ. Блакитна зона на рис. 4.32 відображає частину робочої зони робота, де зберігається орієнтація кінцевого елемента ЗП без ОМ у ЗП, тобто з характеристикою WANF, а зелена відображає робочу зону робота, де зберігається орієнтація параметра атестації Н як складової кінцевого елемента ЗП без ОМ в ЗП робота з характеристикою WAVD.

На рис. 4.33 графічно зображено 1 – криву зовнішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра Н в інтервалі  $[X_{IRmin} \dots X_{IRmax}] = [152 \dots 217]$  мм; 2 – криву внутрішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра Н в інтервалі  $[Z_{IRmin} \dots Z_{IRmax}] = [0 \dots 43]$  мм.

Аналогічні дослідження проведені і з закріпленням ОМ в ЗП даного робота, при цьому параметр  $H_{\max}=77$  мм (див. рис. 4.34 – 4.36).

Результати досліджень показали, що визначена практично робоча зона в даному випадку змістилась в СК робота і зменшилась за площею для обох положень затискного пристрою з  $H_{\max}=77$  мм із закріпленням ОМ в ЗП. Графічна візуалізація результатів для цього випадку представлена на рис. 4.34. Порівняння площ координатних перетинів робочих зон орієнтації Н за рис. 4.30 та рис. 4.31 (ЗП без ОМ) становить приблизно 40%.

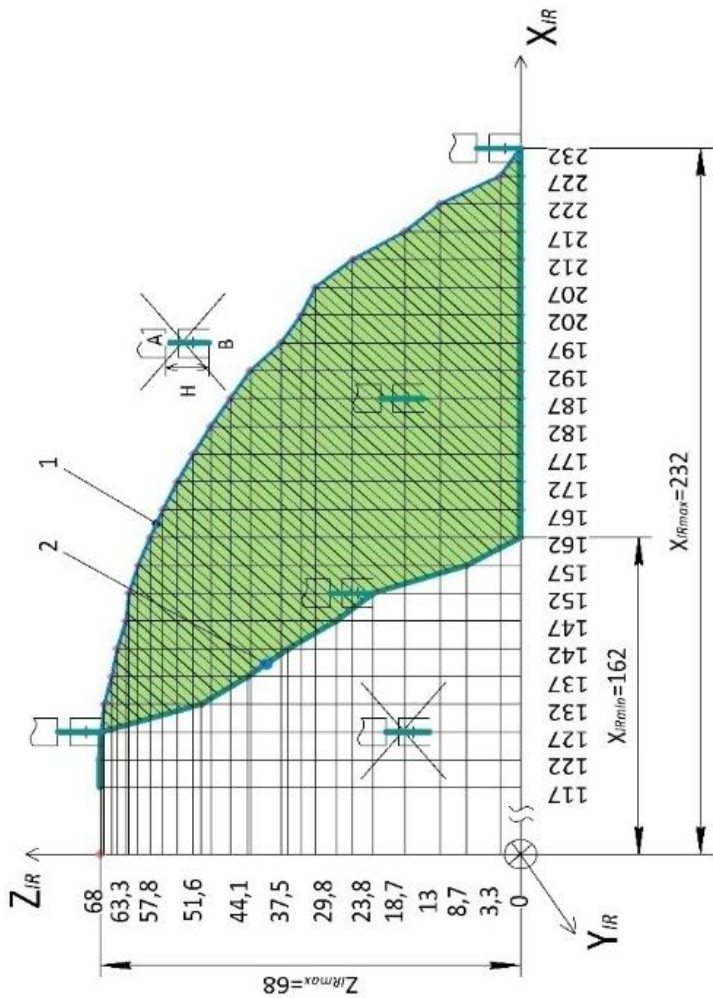


Рис. 4.30 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при вертикальній орієнтації параметра  $H_{max}=65$  мм без ОМ в ЗП вертикально вниз щодо основи ПР – H-Axis Vertical Down (WAVD)

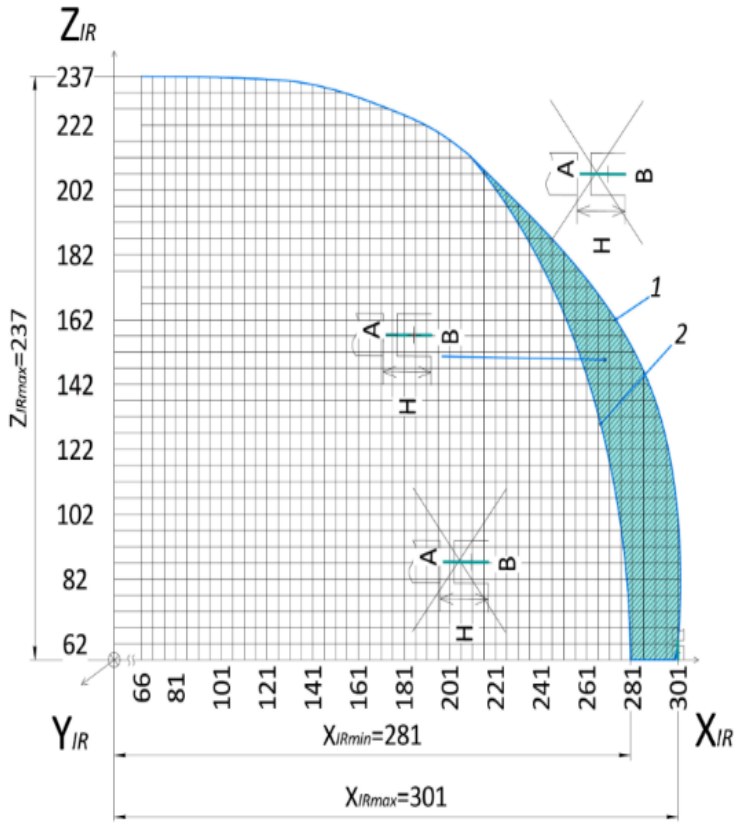
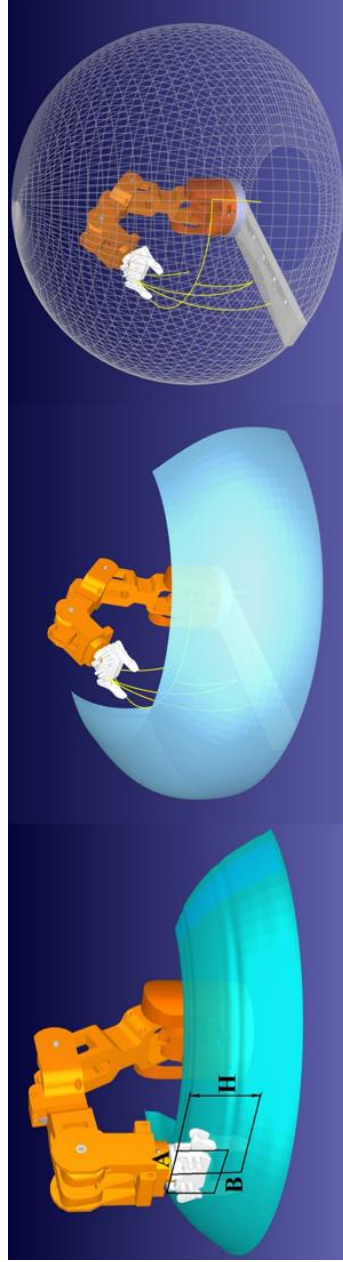


Рис. 4.31 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при горизонтальній орієнтації параметра  $H$  (без  $OM$  в  $3\Pi$ ) направлений вперед (вправо) від стійки робота (осі  $Z_{IR}$ ) в напрямку збільшення радіуса робочої зони ПП – H-Axis Horizontal Forward (WAHF)



РЗ з орієнтуванням осі Н  
вертикально  
Work area H-axis vertical  
(WAV)

РЗ з орієнтуванням осі Н  
горизонтально  
Work area H-axis horizontal  
(WAH)

Загальна РЗ  
Work area general  
(WAG)

Рис. 4.32 – 3D-візуалізація отриманих результатів атестації метрики МС робота Braccio WAV, WAH та WAG без ОМ

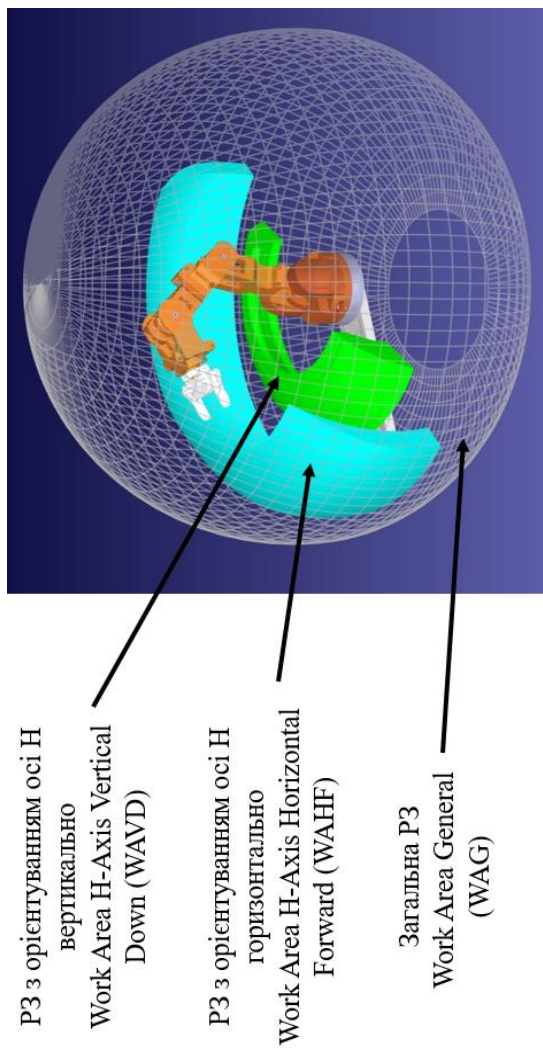


Рис. 4.33 – 3D-візуалізація узагальнених результатів атестації метрики WAG, WAF та WAG без OM

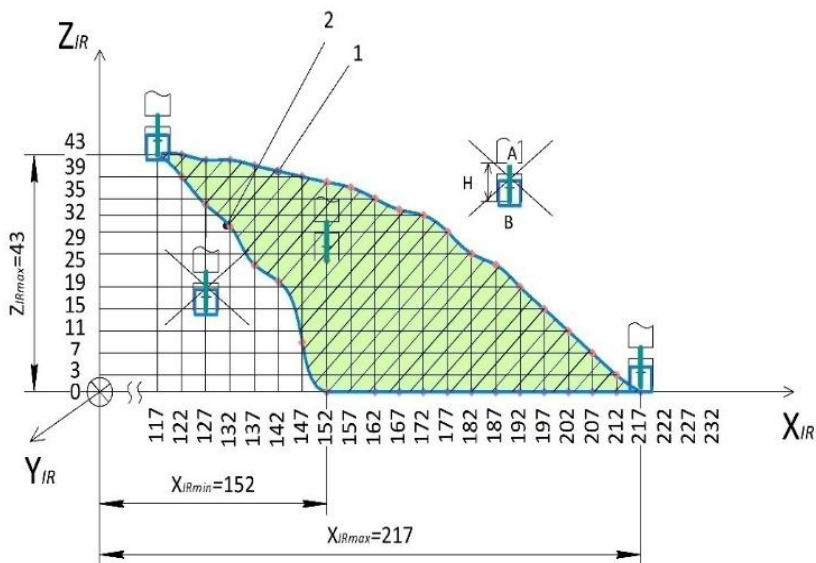


Рис. 4.34 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при вертикальній орієнтації параметра  $H=77$  мм (з ОМ в ЗП) вниз щодо основи ПР –  $H$ -Axis Vertical Down + ОМ, тобто (WAVD+OM)

Схожі результати показує аналіз дослідження координат та орієнтації параметра атестації  $H$  відносно площини, на якій закріплена основа робота (рис 4.34.). Характерною є різниця розмірів перетину між характеристиками параметра атестації  $H$  (WAVD) рис. 4.34 та (WAVD+OM) рис. 4.35, тобто без та з ОМ в ЗП. В даному випадку ця різниця становить приблизно 75%. Тобто площа перетину робочої зони робота для  $H_{max}=77$  мм з характеристикою (WAVD+OM) зменшилась приблизно у 4 рази відносно площі зони без ОМ в ЗП ПР з характеристикою (WAVD).

На рис. 4.35 графічно зображено 1 – криву зовнішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра  $H$  в інтервалі  $[X_{IRmin} \dots X_{IRmax}] = [291 \dots 296]$  мм; 2 – криву внутрішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра атестації  $H$  в інтервалі  $[Z_{IRmin} \dots Z_{IRmax}] = [62 \dots 242]$  мм.

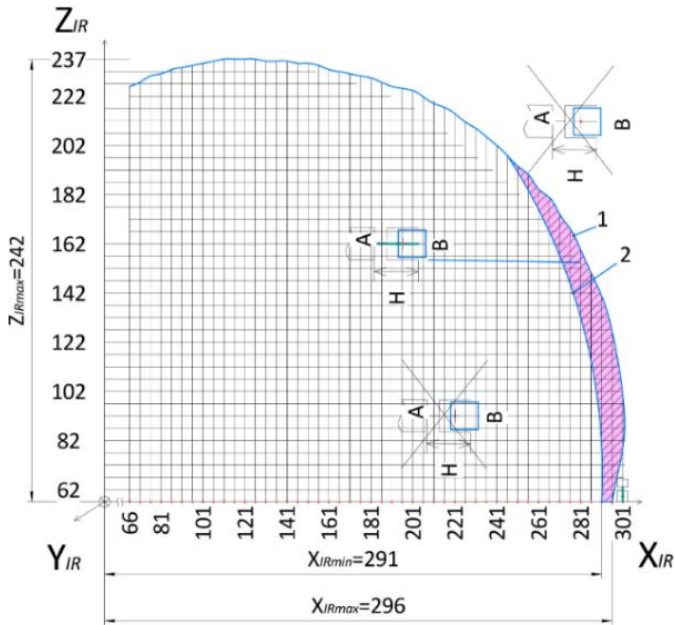
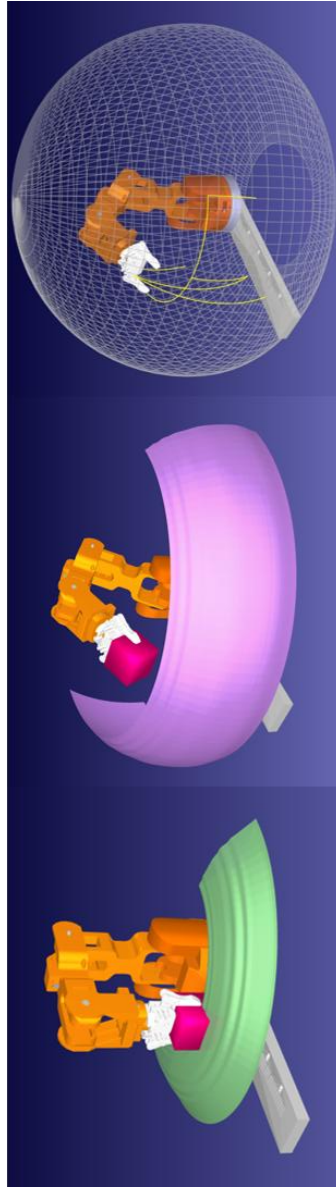


Рис. 4.35 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при горизонтальній орієнтації параметра  $H$  (з  $OM$ ) направлений вперед (вправо) від стійки робота (осі  $Z_{IR}$ ) в напрямку збільшення радіуса робочої зони ПР –  $H$ -Axis Horizontal Forward +  $OM$ , тобто із закріпленням в ЗП  $OM$  ( $WAHF+OM$ )

На рис. 4.36 та на рис. 4.37 представлена кінцева візуалізація отриманих результатів для параметра агедації  $H_{max}=65$  мм з  $OM$  в ЗП (див. рис. 4.33, рис. 4.34), а саме робочі зони, в яких гарантується положення параметра  $H$  кінцевого елемента (ЗП) з  $OM$ .

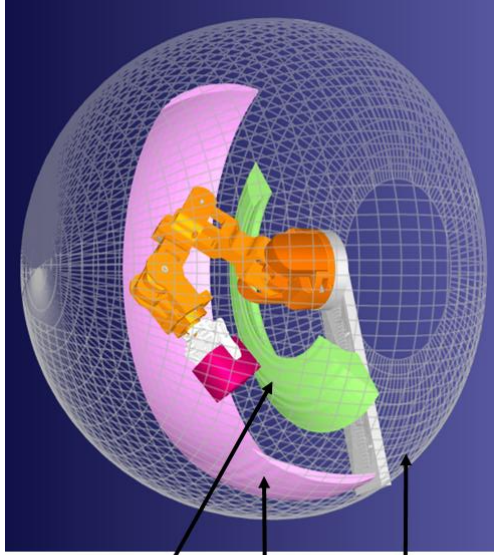


РЗ з орієнтуванням осі Н  
вертикально з ОМ  
Work area H3-axis vertical  
(WAV+OM)

РЗ з орієнтуванням осі Н  
вертикально з ОМ  
Work area H3-axis horizontal  
(WAN+OM)

Загальна РЗ  
Work area general  
(WAG)

*Рис. 4.36 – 3D-візуалізація отриманих результатів атестації метрики МС Власіо WAV, WAN та WAG з ОМ*



РЗ з орієнтуванням осі Н  
вертикально з ОМ  
Work Area H-Axis Vertical  
Down (WAVD+OM)

РЗ з орієнтуванням осі Н  
горизонтально з ОМ  
Work Area H-Axis Horizontal  
Forward (WANF+OM)

Загальна РЗ  
Work Area General  
(WAG)

*Рис. 4.37 – 3D-візуалізація узагальнених результатів атестації метрики МС робота Braccio WAV, WAN та WAG з ОМ*

Рожева зона відображає робочу область робота, де зберігається орієнтація кінцевого елемента з ОМ у положенні з характеристиками (WANF+OM), тобто ЗП утримує ОМ із збереженням заданої орієнтації на всій множині точок у визначеній зоні. Зелена зона відображає робочу зону робота, де зберігається орієнтація параметра атестації Н як складової ЗП кінцевого елемента з ОМ в ЗП робота з характеристиками (WAVD+OM).

На рис. 4.38 представлено узагальнену візуалізацію отриманих результатів. Даний рисунок виразно характеризує різницю розмірів робочих зон робота із ОМ та без ОМ в ЗП, що визначено розмірами параметра атестації Н.

Доцільно підкреслити, що у ПР, наприклад, KUKA [8] є відповідна опція при програмуванні переміщень ЗП, що відтворює, наприклад, вертикальну вісь параметра Н позначеної в контексті даної роботи як WAVD. Але вона не є відомою розробникам ГВК на початкових етапах ТПг КРМСВ, а використовується при безпосередньому програмуванні переміщень ЗП з/без ОМ. В цьому випадку очевидно необхідними є описані вище дослідження щодо атестації метрики МС ПР.

Зафіксовано величину кінематичного ресурсу при переміщенні робота від однієї точки до наступної по кожній з ланок, а також сумарний кінематичний ресурс. Отримані результати досліджень зафіксовано та представлено в табл. 4.1. та 4.2.

В табл. 4.1. представлено залежність мінімальної висоти, на якій ЗП знаходиться від поверхні, від відстані, на якій розташований ЗП відносно центру робота.

Тут  $X_{пр}$  – лінійна відстань від центра вертикальної осі обертання робота Вгассіо;

$Z_{пр}$  – мінімальна висота розміщення схвату в заданому положенні ( $90^\circ$ ) на відповідній відстані L;

$M_2$  – кут відпрацювання серводвигуна  $M_2$ , аналогічно для  $M_3$  та  $M_4$ ;

$\Delta M_2$  – різниця значення кута  $M_2$  на поточній відстані  $X_{пр}$  відносно попереднього значення кута  $M_2$  на попередній відстані  $X_{пр}$ . Аналогічно для  $M_3$  та  $M_4$ ;

$\sum \Delta M_2$  – сума накопичень  $\Delta M_2$  для кожного інтервалу переміщення. Аналогічно для  $\sum \Delta M_3$  та  $\sum \Delta M_4$ ;

$\sum \Delta M_2-4$  – сума значень різниць кутів повороту ротора двигунів  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ ;

$\sum$  – сума накопичень  $\sum \Delta M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  для кожного інтервалу.

Аналогічне дослідження щодо переміщення робота в межах робочої зони проведено для максимальної можливої висоти схвату від поверхні. Дані представлено в табл. 4.2.

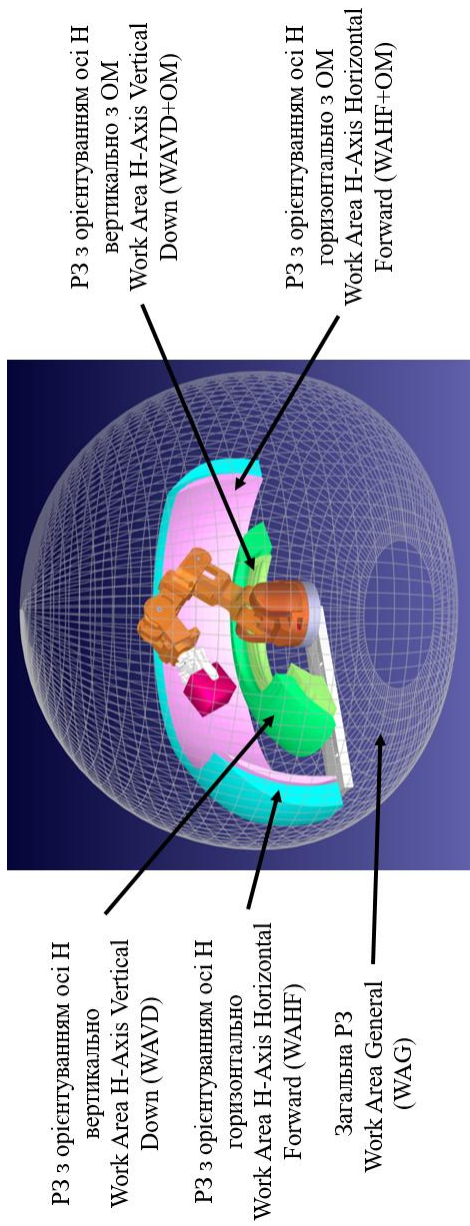


Рис. 4.38 – 3D-візуалізація узагальнених результатів атестації метрики МС робота Braccio WAVD та WANF як частина WAG з ОМ та без ОМ

Таблиця 4.1

Лінійні відстані дискретного переміщення ЗП в положенні  $90^\circ$  в нижній точці

№ З/П	$X_{дп}, \text{mm}$	$Z_{дп}, \text{mm}$	$M2, ^\circ$	$\Delta M2, ^\circ$	$\Sigma \Delta M2, ^\circ$	$M3, ^\circ$	$\Delta M3, ^\circ$	$\Sigma \Delta M3, ^\circ$	$M4, ^\circ$	$\Delta M4, ^\circ$	$\Sigma \Delta M4, ^\circ$	$\Sigma \Delta M2-4$	$\Sigma$
1	117	68	90			180			180				
2	122	68	92	2	2	180	0	0	177	3	3	5	5
3	127	67,8	94	2	4	180	0	0	175	2	5	4	9
4	132	51,6	96	2	6	180	0	0	173	2	7	4	13
5	137	44,1	100	4	10	180	0	0	169	4	11	8	21
6	142	37,5	103	3	13	180	0	0	166	3	14	6	27
7	147	29,8	106	3	16	180	0	0	163	3	17	6	33
8	152	23,8	109	3	19	180	0	0	160	3	20	6	39
9	157	8,7	113	4	23	180	0	0	156	4	24	8	47
10	162	0	117	4	27	180	0	0	152	4	28	8	55
11	167	0	120	3	30	176	4	4	154	2	30	9	64
12	172	0	122	2	32	173	3	7	155	1	31	6	70
13	177	0	123	1	33	171	1	8	155	0	31	2	72
14	182	0	125	2	35	167	4	12	157	2	33	8	80
15	187	0	128	3	38	163	4	16	159	2	35	9	89
16	192	0	130	2	40	159	4	20	160	1	36	7	96
17	197	0	133	3	43	154	5	25	163	3	39	11	107
18	202	0	135	2	45	150	4	29	164	1	40	7	114
19	207	0	138	3	48	145	5	34	167	3	43	11	125
20	212	0	141	3	51	140	5	39	169	2	45	10	135
21	217	0	144	3	54	135	5	44	171	2	47	10	145
22	222	0	147	3	57	129	6	50	175	4	51	13	158
23	227	0	150	3	60	122	7	57	177	2	53	12	170
24	232	0	154	4	64	115	7	64	180	3	56	14	184

Таблиця 4.2

Лінійні відстані дискретного переміщення схвату в положенні  $90^\circ$   
у верхній точці

№ з/П	$X_{\text{шп}}, \text{mm}$	$Z_{\text{шп}}, \text{mm}$	$M2, ^\circ$	$\Delta M2, ^\circ$	$\Sigma \Delta M2, ^\circ$	$M3, ^\circ$	$\Delta M3, ^\circ$	$\Sigma \Delta M3, ^\circ$	$M4, ^\circ$	$\Delta M4, ^\circ$	$\Sigma \Delta M4, ^\circ$	$\Sigma \Delta M2-4$	$\Sigma$
1	117	68	90			180			180				
2	122	68	92	2	2	177	3	3	180	0	0	5	5
3	127	67,8	94	2	4	175	2	5	180	0	0	4	9
4	132	67,3	96	2	6	173	2	7	180	0	0	4	13
5	137	66,1	99	3	9	170	3	10	180	0	0	6	19
6	142	65,2	102	3	12	168	2	12	180	0	0	5	24
7	147	63,8	104	2	14	165	3	15	180	0	0	5	29
8	152	63,3	106	2	16	163	2	17	180	0	0	4	33
9	157	61,8	108	2	18	161	2	19	180	0	0	4	37
10	162	59,9	111	3	21	159	2	21	180	0	0	5	42
11	167	57,8	113	2	23	156	3	24	180	0	0	5	47
12	172	55,5	116	3	26	153	3	27	180	0	0	6	53
13	177	52,9	118	2	28	151	2	29	180	0	0	4	57
14	182	50,1	121	3	31	148	3	32	180	0	0	6	63
15	187	46,9	123	2	33	145	3	35	180	0	0	5	68
16	192	43,7	126	2	35	143	2	37	180	0	0	4	72
17	197	38,7	129	3	38	140	3	40	180	0	0	6	78
18	202	35,5	132	3	41	137	3	43	180	0	0	6	84
19	207	33,2	135	3	44	135	2	45	180	0	0	5	89
20	212	27,1	138	3	47	130	5	50	180	0	0	8	97
21	217	18,7	143	5	52	127	3	53	180	0	0	8	105
22	222	13	146	3	55	123	4	57	180	0	0	7	112
23	227	3,3	151	5	60	118	5	62	180	0	0	10	122
34	232	0	154	4	64	115	3	65	180	0	0	7	129

Тут  $L$  – лінійна відстань від центра вертикальної осі обертання робота;

$H$  – максимальна висота розміщення схвату в заданому положенні ( $90^\circ$ ) на відповідній відстані  $L$ ;

$M2$  – кут відпрацювання валом серводвигуна  $M2$ , аналогічно для  $M3$  та  $M4$ ;

$\Delta M_2$  – різниця значення кута  $M_2$  на поточній відстані  $L_i$  відносно попереднього значення кута  $M_2$  на попередній відстані  $L_{i-1}$ . Аналогічно для  $M_3$  та  $M_4$ ;

$\sum \Delta M_2$  – сума накопичень  $\Delta M_2$  для кожного інтервалу. Аналогічно для  $\sum \Delta M_3$  та  $\sum \Delta M_4$ ;

$\sum \Delta M_{2-4}$  – сума значень різниць кутів  $M_2, M_3, M_4$ ;

$\sum$  – сума накопичень  $\sum \Delta M_{2-4}$  для кожного інтервалу.

На рис. 4.39 зображено графіки залежності  $\Delta M_2, \Delta M_3$  та  $\Delta M_4$ , а також  $\sum \Delta M_2, \sum \Delta M_3, \sum \Delta M_4, \sum \Delta M_{2-4}$  та  $\sum$  від  $X_{\text{пр}}$  (відстані від осі робота) при збереженні мінімальної можливої відстані від основи по координаті  $Z_{\text{пр}}$ .

А на рис. 4.40 зображено графіки залежності  $\Delta M_2, \Delta M_3$  та  $\Delta M_4$ , а також  $\sum \Delta M_2, \sum \Delta M_3, \sum \Delta M_4, \sum \Delta M_{2-4}$  та  $\sum$  від  $X_{\text{пр}}$  при збереженні максимальної можливої відстані від основи по координаті  $Z_{\text{пр}}$ .

Всі отримані в результаті експериментів дані було порівняно з реальними даними. Виявлено, що промодельовані та експериментальні дані відрізняються і різниця відхилень – величина випадкова.

Причинами таких відхилень можуть бути наступні фактори: вихрові струми що наводяться в серводвигунах, низька якість фільтрації ШІМ сигналів, обмеженість елементами управління тощо.

#### 4.3.4.2. Автоматизована атестація метрики з використанням Matlab та CoppeliaSim та інтерпретація отриманих результатів

Ефективність запропонованого підходу вище (див. п. 2.4.2.2) демонструється на прикладі автоматизованої атестації метрики маніпуляційної системи ПР моделі ABB IRB 140 і ЗП моделі RG2 з об'єктом маніпулювання (ОМ) в ній. Фрагменти отриманих результатів показані на рис. 4.41.

На рис. 4.41 в системі координат  $X^{IR} Y^{IR}$  представлено загальний вигляд аналізованої МС ПР моделі ABB IRB 140 у сферичній системі координат з вектором орієнтації ТРК навколо колінеарної осі  $Z^{IR}$ , що є з'єднанням ланок ⑤ та ⑥, тобто при кутовому зміщенні  $C5=+40^\circ$  (обертання ТРК за годинниковою стрілкою, зі знаком +). Модель ПР береться з бази даних програмного продукту CoppeliaSim. При цьому CoppeliaSim дозволяє користувачеві створювати будь-яку модель ПР з/без ТРК і з/без ОМ.

Вище наведено зміст кроку 1. Там у вигляді стрілки на умовному циферблаті з градацією в градусах вказується розроблений так званий встановлювач необхідної (досліджуваної) кутової орієнтації ТРК, який в цьому випадку повинен зберігати орієнтацію ТРК на рівні  $C5=+40^\circ$  і має лінійний розмір  $l_{\text{ТРК}}=0,21$  м з урахуванням фактичних розмірів ЗП моделі RG2 з ОМ в ньому (в одиницях довжини в CoppeliaSim).

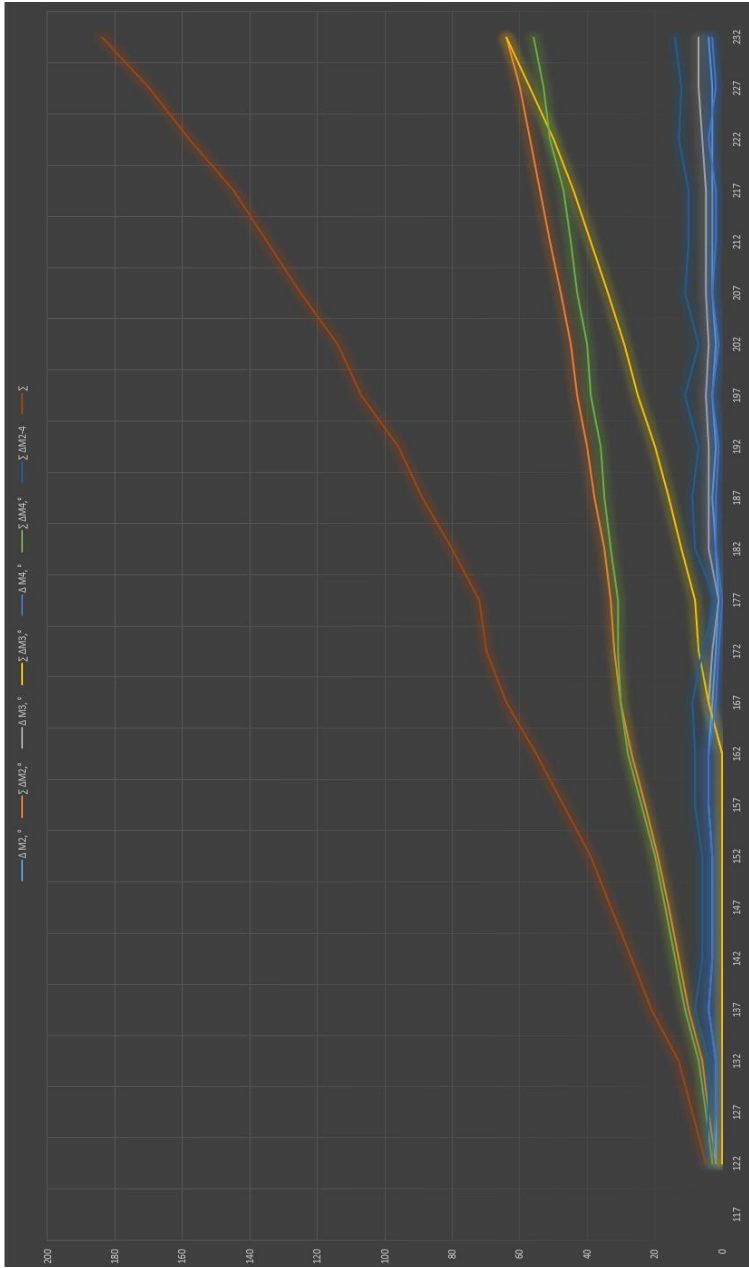


Рис. 4.39 – Визначення кінематичних ресурсів двигунів M2, M3, M4 за даними табл. 4.1

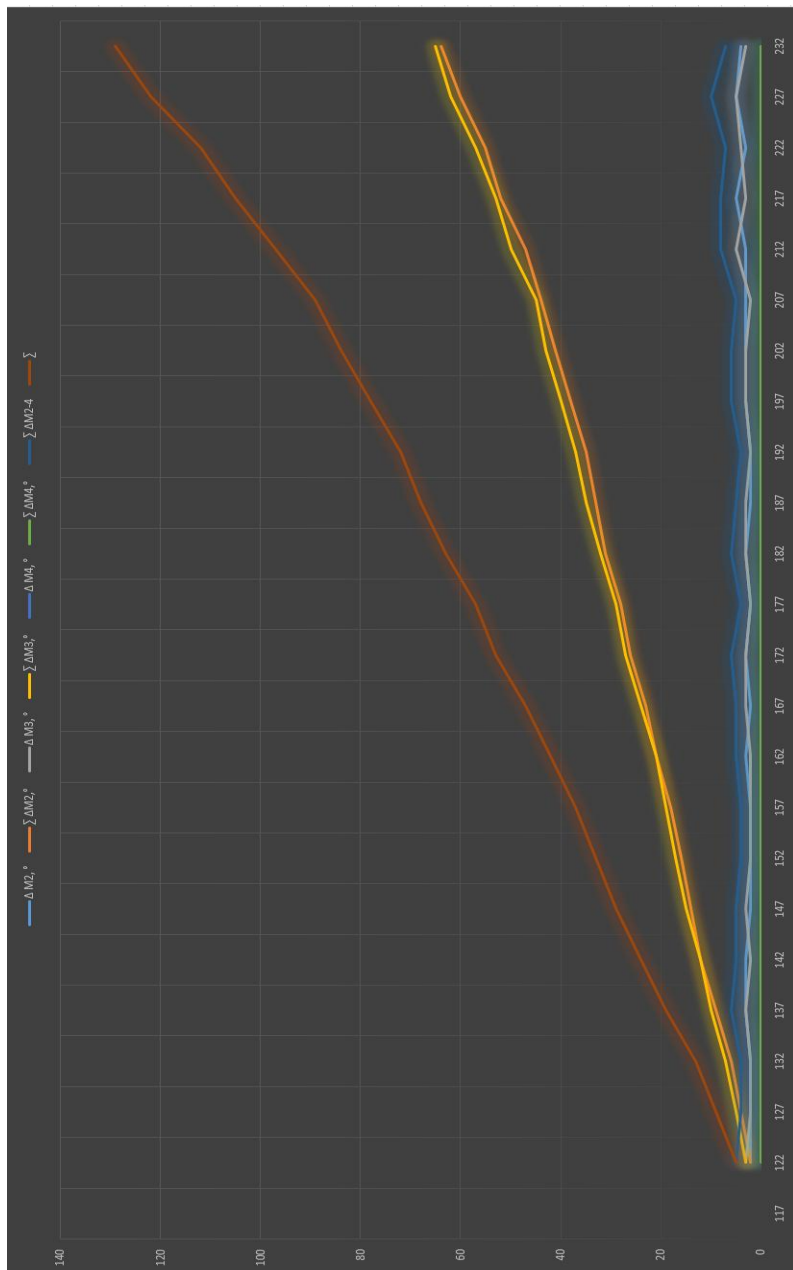


Рис. 4.40 – Визначення кінематичних ресурсів двигунів М2, М3, М4 за даними табл. 4.2

Для полегшення використання результатів кроку 1 та на основі рис. 4.41 авторами розроблена рамкова (ниткова) модель кінематичної структури робота ABB IRB 140 (див. рис. 4.41, б). У ній застосовано всього 7 ланок, які позначено як ①, ..., ⑦), типи переміщень (обертальні А, В, С) та їх кількість (6 ступенів рухомості), що позначаються правими нижніми індексами для зазначених обертальних рухів А, В, С відповідних ланок ПР навколо відповідної системи координат осей ПР в площині  $X^{IR} Y^{IR}$ .

Рис. 4.41, в та рис. 4.41, г ілюструють приклад визначених компонентів  $WA_{C5=+40}^{ABB IRB 140}$  при збереженні заданої орієнтації вектору  $V_{C5=+40}^{ABB IRB 140} = const$  відповідно до виразу (1) на рис. 4.41, а, які є частиною загальної РЗ  $WA_{C5=+40}^{ABB IRB 140}$ .

На рис. 4.41, в синім кольором позначена робоча зона, розташована в від'ємному напрямку осі  $X^{IR}$  цього робота (площина  $-X^{IR}Y^{IR}$ ). Її розташування визначається можливістю одночасних переміщень всіх обертальних переміщень ланок МС (ПР має систему ЧПУ) за координатами С та конструктивними і кінематичними особливостями ПР.

Рис. 4.41, в спрощується наступною функціональною залежністю (символ f):  $C=f(C_2, C_3, C_5)$ . На рис. 4.41, г зеленим кольором позначено зміщення РЗ  $TRK_{C5=+40}^{ABB IRB 140}$  у додатному напрямку  $+X^{IR}$  має наступне значення f:  $C=f(C_2, C_3, C_5)$ .

Червона лінія для РЗ вказує лінію їх взаємного поєднання з урахуванням напрямку осі  $X^{IR}$ . Результатом їх комбінації є 2D модель РЗ  $WA_{C5=+40}^{ABB IRB 140}$ , відображена на рис. 4.41, д. При цьому контури цих РЗ у всіх їх перерізах є результатом апроксимації відповідних точок контурів РЗ, що утворилися в результаті багаторазового розв'язування оберненої кінематичної задачі з урахуванням прийнятої кутової дискретизації  $WA_{C5=+40}^{ABB IRB 140}$ .

Функціонал програмного продукту CoppeliaSim це забезпечує. В результаті, рис. 12, е спрощує РЗ, в якій вектор орієнтації  $V_{C5=+40}^{ABB IRB 140} = const$ .

3D модель  $WA_{l=0,21m}^{ABB IRB 140}$ , що враховує поворот ланки ② на кут  $B1=180^\circ$ , як кінцевий результат процесу автоматизованої атестації метрики ПР моделі ABB IRB 140 та моделі системи координат моделі ЗП з ОМ у ньому при  $A=0^\circ$ ,  $B=0^\circ$ ,  $C=+40^\circ$  в ізометрії, показано на рис. 4.42. Тут фіолетовим кольором позначена площа  $WA_{R MAX}$ , що визначається її зовнішнім контуром з максимальним радіусом ланок МС ПР (рис. 4.41, в) і найменшим кінематично і геометрично допустимим її радіусом.

РЗ  $WA_{l=0,21m}^{ABB IRB 140}$  заданої орієнтації  $TRK_{C5=+40}^{ABB IRB 140}$  позначена зеленим кольором (рис. 4.41, г). Її координати легко визначаються з урахуванням ЗП масштабу ПР моделі ABB IRB 140. Для ілюстрації масштаб визначається стороною куба в 0,2 м (див. рис. 4.42). Це крок умовної сітки, вузли якої позначені мітками + білого кольору. РЗ

$WA_{l=0.21m}^{MIN}$  та  $WA_{l=0.21m}^{MAX}$  - це межі, в яких  $WA_{l=0.21m}^{ABB IRB 140}$  відбувається за заданих умов.

Таким чином, як впливає з представленої на рис. 4.42 3D-моделі, РЗ  $WA_{l=0.21m}^{ABB IRB 140}$ , остання лежить в межах таких координат:  $X_{l=0.21m}^{ABB IRB 140}_{MIN} = Z_{l=0.21m}^{ABB IRB 140}_{MIN} = 0.24m$ ;  $X_{l=0.21m}^{ABB IRB 140}_{MAX} = Z_{l=0.21m}^{ABB IRB 140}_{MAX} = 0.64m$ ;  $Y_{l=0.45m}^{ABB IRB 140}_{MIN} = 0.50m$ ;  $Y_{l=0.45m}^{ABB IRB 140}_{MAX} = 0.88$ .

Атестация метрики КПП/ПР, що проілюстрована вище на прикладі автоматизованого процесу атестації метрики МС ПР моделі АВВ ІRВ 140, дає можливість вважати її апіорі важливою складовою ТПг КРМСВ/РМСВ, зважаючи на наступне:

- визначення необхідної та/або можливої орієнтації ТРК в певній точці його розміщення в РЗ КПП/ПР, що обумовлено вимогами до реалізації конкретних технологій, що вимагають забезпечення геометричної та кінематичної доступності важкодоступних точок технологічного обслуговування робочих позицій ГВК (наприклад, при виконанні технологічних операцій зварювання, склеювання, складання і т.д.)

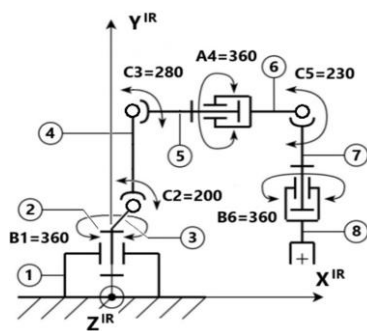
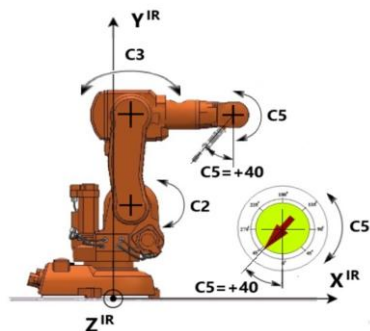
- аналіз можливості розміщення та планування технологічного обладнання з урахуванням необхідного забезпечення для певної орієнтації на ТРК в пункті технологічного обслуговування КПП/ПР на відповідній робочій позиції в гнучких виробничих комірках;

- синтез траєкторій руху ТРК в робототехнічних автоматизованих виробничих системах з урахуванням координат позиціонування робочої позиції в ГВК;

- використання результатів атестації метрики як при проектуванні нових ГВК, так і при переплануванні робочих позицій в існуючих ГВК;

- скорочення часових, інтелектуальних, фінансових та інших ресурсів при розміщенні та плануванні робочих позицій у РЗ ПР, одночасно підвищуючи рівень автоматизації цього процесу та візуалізації його результатів;

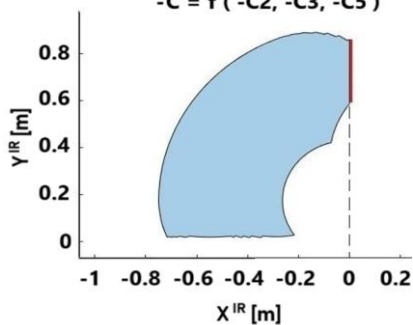
- у разі відсутності реального ПР для виробничої системи, атестація метрики виконується з використанням цифрових двійників ПР. Це значно здешевлює процес метричної сертифікації та підвищує ефективність роботи ТРК в роботизованих автоматизованих виробничих системах. Це створює передумови для моделювання складних траєкторій із заданою орієнтацією ТРК, що трактується як один з очевидних напрямків для подальших досліджень.



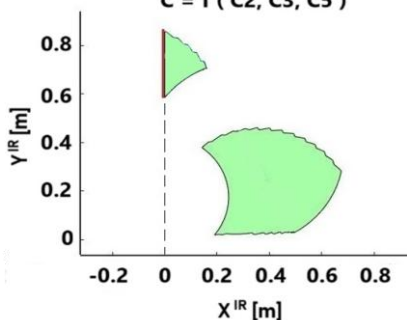
a)

б)

$$-C = f(-C2, -C3, -C5)$$



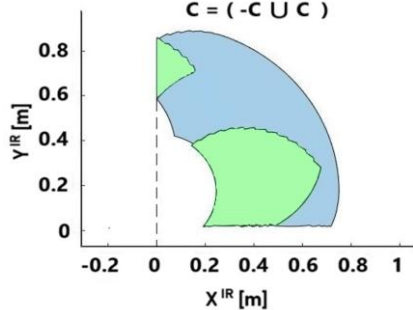
$$C = f(C2, C3, C5)$$



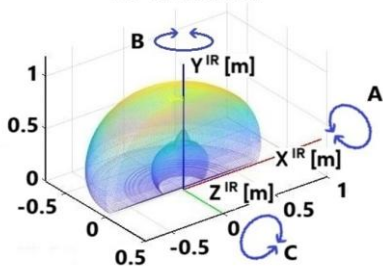
в)

г)

$$C = (-C \cup C)$$



3D Work Area



д)

е)

Рис. 4.41. Фрагменти ілюстрації автоматизованої атестації МС ПР моделі ABB IRB 140 і ЗП моделі RG2 з ОМ в ній

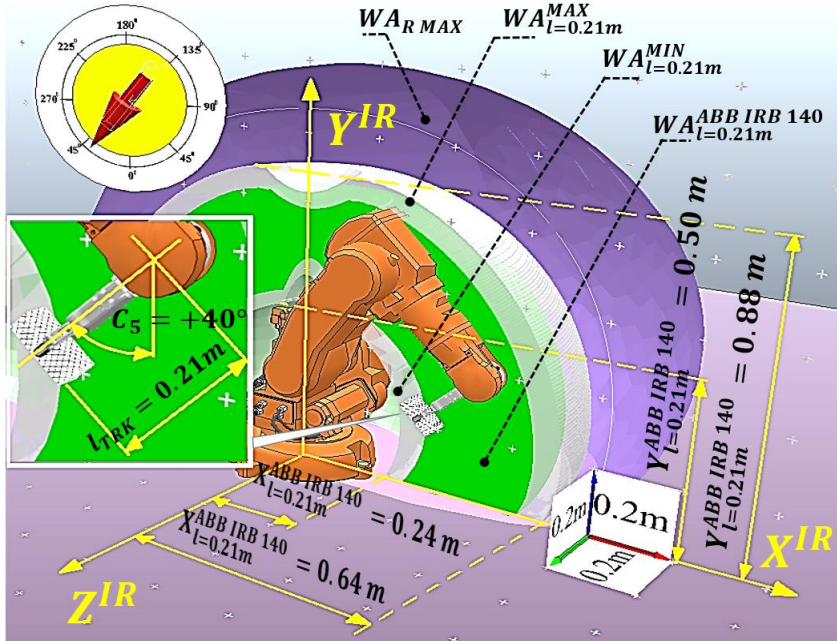


Рис. 4.42. Візуалізація кінцевого результату автоматизованого процесу атестації метрики МС ПР моделі ABB IRB 140 та ЗП моделі RG2 з призматичним ОМ розмірами  $0,04 \times 0,04 \times 0,11$  м при  $A = 0^\circ$ ,  $B = 0^\circ$ ,  $C_5 = +40^\circ$  (приклад)

#### 4.3.4.3. Особливості автоматизованої атестації метрики з використанням програмного продукту CoppeliaSim

Нижче подані складові автоматизованої атестації метрики з використанням програмного продукту CoppeliaSim для МС ПР моделі ABB IRB 140, що попередньо представлені в п. 2.4.2.

##### 4.3.4.3.1. Завантаження та розміщення моделі аналізованого КТР/ПР

Цілком можливою є розробка власної моделі ПР. Для уникнення розробки віртуальної моделі ПР можливо використати цифровий двійник ПР моделі ABB IRB 140 robot - CAD модель ПР (рис. 4.42), спеціально розроблений компанією ABB Robotics для використання в середовищі CoppeliaSim та подібних.

Технічні характеристики ПР моделі ABB IRB 140, що можуть бути корисними при атестації, подаються виробником і є наступними:

- точність позиціонування 0.03mm;
- кількість осей обертання ланок МС 6;
- максимальна досяжна точка ланкою осі 5 0.810 m;
- вантажопідйомність 6 kg;
- додаткове навантаження на підйомних ланках 1 kg;
- додаткове навантаження на ланці зап'ястя 0.5 kg.

Віртуальна модель ПР моделі ABB IRB 140 має координати, розмірність яких подано в метрах і цілком відповідає розмірам реального ПР. Це також справедливо для координат самого середовища CoppeliaSim.

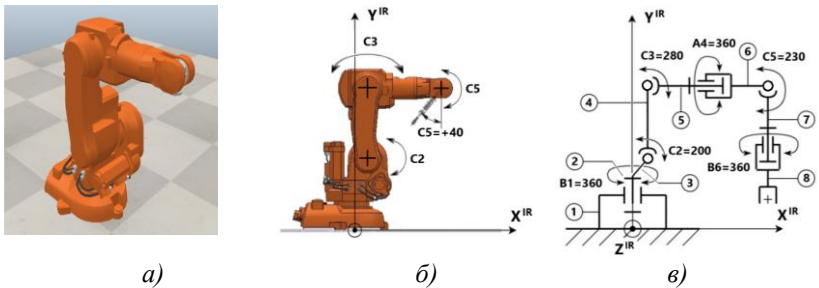
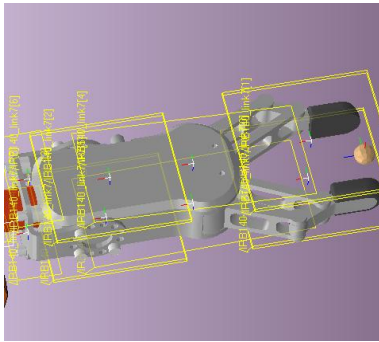


Рис. 4.43. Віртуальна модель ПР ABB IRB 140:

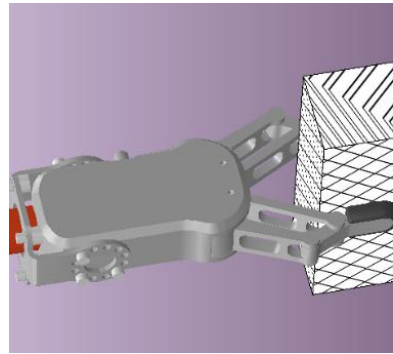
- а) загальний вигляд;
- б) бічна проєкція та система координат з урахуванням присьоданого ЗП (інструменту);
- в) фреймова (ниткова) модель кінематичної структури аналізованого ПР

Ця віртуальна модель постачається без конкретного механізму захвату. Тому цифрова модель ПР ABB IRB 140 може бути доукомплектована віртуальною моделлю затискного пристрою RG 2 (рис. 4.44), наданого компанією On Robot manufacturer.

З'ясовано, що подальше застосування моделі ЗП в експерименті щодо побудови РЗ з урахуванням колізій виявляє недолік моделі: можливо обмежити реальні кути повороту ланок ПР при їх переміщенні шляхом алгоритму, але неможливо контролювати колізії поверхні захвату з іншими елементами ПР або сторонніми об'єктами, оскільки ЗП складається з окремих ланок, які вже вступають у колізії у результаті виконання техншлогії його складання. Відтак система колізій CoppeliaSim буде завжди активована. Пропонується подолати це шляхом оточення ЗП наближеними до нього площинами контролю (рис. 4.44, а).



а)



б)

Рис. 4.44. Віртуальна модель затискного пристрою моделі RG 2:

а) загальний вигляд з урахуванням масиву площин контролю колізій;

б) загальний вигляд з урахуванням розташування заготовки у захваті

У випадку, якщо у ЗП ПР знаходиться ОМ, який за габаритами визначатиме зовнішні границі ЗП, то можливо не застосовувати оточуючі ЗП площини. Джерелом колізій виступатиме сам ОМ, який повинен не входити в колізію із ЗП, але входити в колізію з усіма іншими елементами моделі. Це можна забезпечити зняттям налаштування контролю колізій для накладок на кінцях пальців захвату.

ПР моделі ABB IRB 140, доповнений ЗП моделі RG 2, розміщено у центрі віртуальної сцени так, щоб центр системи координат першого поворотного з'єднання В1 співпадав з глобальним центром системи координат сцени. Це зроблено для того, щоб координати робочих зон, моделі отримані та оброблені далі відповідно до методики, можливо було повторно розмістити на сцені в тому ж координатному просторі з метою додаткової візуальної верифікації і як кінцевий результат моделювання.

#### 4.3.4.3.2. Початкове налаштування моделі ПР

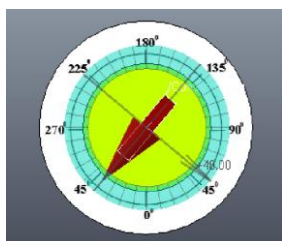
Методика передбачає виконання моделювання для певного, наперед заданого, кутового розміщення захвату у площині повороту головних "ліктювих" поворотних шарнірних з'єднань ПР. Поворот захвату здійснюється за рахунок передостаннього поворотного з'єднання ПР С5 (див. рис. 4.43, б, в), яке на практиці саме для цього і призначене.

Методика також передбачає початкове задання користувачем та підтримку програмно стабільності кутового положення захвату відносно глобальної системи координат впродовж всього процесу моделювання. З цією метою на віртуальній сцені було розроблено окремий елемент - задавач кутового положення захвату (рис. 4.45, а).

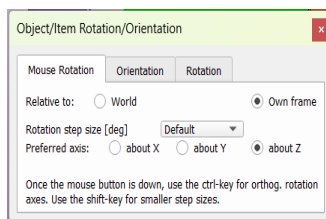
Це забезпечує певну зручність як для користувача, так і при подальшому функціонуванні моделі. Завдяки цьому вдається уникнути зайвої рутинної взаємодії користувача з віртуальним простором моделі при задаванні кутового положення захвату, а також безпосередньої взаємодії користувача з елементами конструкції ПР із захватом та, як результат, помилкових зміщень інших елементів моделі. Отже, окремий задавач відіграє роль елемента інтерфейсної частини.

Користувач взаємодіє із задавачем, переміщуючи його стрілку на певний кут по круговій шкалі за допомогою протягуючого руху вказівника мишки. Проте мінімальна дискретність такого задавання становить 1 градус.

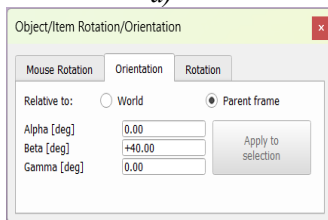
Користувач також може виконати поворот вказівника на круговій шкалі, скориставшись спеціальним вікном для задачі кутових положень віртуальних елементів, що передбачено у самому середовищі CoppeliaSim. У такому випадку мінімальна дискретність задавання становить 0.001 градуса (рис. 4.45, б).



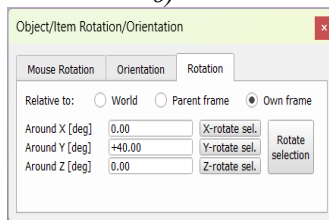
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.45. Задавач кутового положення (орієнтації) ЗП ПР:  
 а) безпосередньо віртуальний об'єкт - задавач;  
 б) параметри числового режиму задавання за кутами навколо осей координат

Перед початком моделювання також здійснюється задавання кількості дискретних кроків при відтворенні фіксованих кутових положень

в межах від 0 до 180 градусів для кожного поворотного з'єднання ПР окремо. Це виконується одним рядком безпосередньо у скрипті: `steps={0,90,90,0,90,0}`. Деякі позиції задані як 0, оскільки стосуються поворотних з'єднань, які забезпечують повороти ланок ПР в інших площинах від площини повороту головних поворотних з'єднань ПР: B1, A4, B6 (рис. 4.43, в).

Якщо робоча зона ПР є симетричною, то достатньо отримати напівпростір 0 – 180 градусів РЗ. При цьому буде досить чітко на віртуальній сцені унаочнений переріз РЗ для оцінки його форми.

По закінченню етапу підготовки запускається процес моделювання, яке виконується під керуванням скрипта програми.

#### 4.3.4.3.3. Складання скрипту програми на мові Lua

Задачами Lua-скрипту є керування основними етапами експерименту моделювання, які передбачають його виконання в автоматичному режимі.

Нижче стисло представлено визначальні фрагменти розробленого скрипта для кожного з етапів.

1) Виконання скриптом моделювання всіх можливих комбінацій кутів повороту ланок ПР. На початковому етапі потрібно отримати граничні кути взаємного кутового переміщення ланок в поворотних з'єднаннях. Ліміти кутів можливо попередньо задати за допомогою віконної форми (рис. 4.46)

Pos. min. [deg]	<input type="text" value="-60.00"/>	Pos. range [deg]	<input type="text" value="150.00"/>
-----------------	-------------------------------------	------------------	-------------------------------------

*Рис. 4.46. Віконна форма для вказівки граничних кутів для обраного поворотного з'єднання в середовищі CoppeliaSim*

Ліміти кутів можливо попередньо також задати програмно у скрипті Lua. Наприклад, масив `jointInit[ ]` для задавання початкових кутів, а масив `jointRange[ ]` для задавання меж кутового переміщення відносно початкового положення.

```
jointInit[i]=-180*math.pi/180 -- встановлення початкового кута;  
jointRange[i]=360*math.pi/180 -- встановлення меж кутового  
зміщення відносно початкової позиції.
```

Далі можливо виконувати почергове задавання у автоматичному режимі зміщень відносно початкового кута і у межах кутового переміщення для кожного поворотного з'єднання. Для цього варто використати структуру з вкладених циклів `for-do`, які почергово

звертатимуться до елементів масиву з'єднань `jointHandles[ ]` для задавання поточного кутового зміщення за допомогою команди `sim.setJointPosition( )`.  
`for i1=1,steps[1],1 do` - вибір поточного кроку для першої ланки (B1);

`local p1=jointInit[1]+i1*jointRange[1]/steps[1]` - розрахунок поточного кутового зміщення;  
`sim.setJointPosition(jointHandles[1],p1)` -- встановлення поточного кутового зміщення;  
`for i2=1,steps[2],1 do` - вибір поточного кроку для другої ланки (C2);  
`local p2=jointInit[2]+i2*jointRange[2]/steps[2]` - розрахунок поточного кутового переміщення;  
`sim.setJointPosition(jointHandles[2],p2)` -- встановлення поточного кутового зміщення.

Аналогічно і для інших поворотних з'єднань.

В якості альтернативи вкладеним циклам можна розглянути варіант створення рекурсивної функції. Такий підхід буде особливо зручним при довільній кількості ланок і з'єднань маніпуляційної системи ПР.

2) Витримка за допомогою команд скрипта фіксованого кутового положення захвату (інструменту) відносно системи координат аналізованого ПР. Під час задання комбінацій перебору кутових положень окремих ланок ПР скрипт одночасно відслідковує сталість кутового положення захвату, закріпленого на інструментальному фланці останньої ланки маніпуляційної системи ПР. Для цього за допомогою команд типу `sim.getObjectHandle( )` отримується вказівник на об'єкт ПР та на об'єкт задавача кутового положення ЗП. Далі за допомогою команди `sim.getObjectMatrix( )` потрібно зчитати матрицю кутів задавача в системі координат ПР, командою `sim.getEulerAnglesFromMatrix( )` отримати кути Ейлера з матриці задавача і командою `setObjectOrientation( )` виконати задавання кутів захвату по кутам задавача.

`irb140 = sim.getObjectHandle('IRB140')` -- отримання покажчика на ІЧ-об'єкт;

`tool = sim.getObjectHandle('IRB140_link6')` -- отримання покажчика на з'єднання, що відповідає C5;

`set = sim.getObjectHandle('SetBlock')` -- отримання покажчика на задавач кутових позицій;

`matr = sim.getObjectMatrix(set,irb140)` -- отримання матриці кутів задання в системі координат ПР;

`orient = sim.getEulerAnglesFromMatrix(matr)` -- отримання кутів Ейлера з матриці септера;

`setObjectOrientation(tool, irb140, orient)` – встановлення кутів захоплення за кутами задавача.

3) Під час задання комбінацій перебору кутових положень окремих елементів скрипт одночасно уникає виходу за лімітовані кути повороту

ланок, контролює колізію між ланками та захватом (інструментом) або перешкодами (у нашому випадку також з площиною встановлення ПР). Для цього застосовуються функція отримання вказівника на блок колізій `sim.getCollisionHandle()` та функція перевірки можливих колізій `sim.readCollision()`.

```
coll_check = sim.getCollisionHandle('CollisionBlock') - отримання показника на блок зіткнення;
```

```
coll=sim.readCollision(coll_check) -- перевірка на можливе зіткнення;
```

```
if ( coll == 1 ) then -- у разі зіткнення переміститися в наступне кутове положення.
```

```
counter=counter+1
```

```
end
```

4) Хмара (множина) точок безколізійної зони досяжності записується у файл для подальшої цільової обробки та аналізу. Тут можливо застосувати команди роботи з файловим потоком `io.open()` та `io.output()` і, виконуючи зчитування безколізійної позиції кінцевого елемента ПР командою `sim.getObjectPosition()`, паралельно виконувати її запис у файловий потік командою `io.write()`.

```
file = io.open('FileName.xyz','w') -- відкриття файлу для запису;
```

```
io.output(file) – прив'язка потоку виведення даних до відкритого файлу;
```

```
end_effector = sim.getObjectHandle('end_effector') - отримання показника на просторову точку кінцевого елемента IR;
```

```
position=sim.getObjectPosition(end_effector,-1) -- отримання вектора координат кінцевого елемента IR;
```

```
io.write(table.concat(position,"t")) -- запис у файл поточної вільної від колізій позиції кінцевого елемента IR;
```

```
io.write("\n") - вибір рядка для наступного запису.
```

Одночасно скрипт формує хмару точок РЗ ПР у вигляді точок досяжності центру захвату навколо ПР з урахуванням відсутності механічних колізій та сталості кутового положення захвату ПР за допомогою команди `sim.getObjectMatrix()`, яка забезпечує отримання матриці положення, та команд формування та відображення віртуального зображення 3D-фігури РЗ: `sim.getQHull()` та `sim.createShape()`.

```
matrix=sim.getObjectMatrix(end_effector,sim.handle) - отримання матриці позицій кінцевого елемента IR;
```

```
points[#points+1] = matrix[4] -- відокремлення координати X;
```

```
points[#points+1] = matrix[8] -- відокремлення координати Y;
```

```
points[#points+1] = matrix[12] -- відокремлення координати Z.
```

5) І на основі отриманої хмари точок формується 3D-фігура РЗ ПР.  
`vertices, indices = sim.getQHull(points)` -- формування вершин та індексів 3D-фігури;

`work_zone=sim.createShape(3,0,vertices,indices)` -- отримання віртуального зображення 3D-фігури P3.

б) Коли сформовано 3D-фігуру P3, можливо створити стандартний .stl файл, тобто експортувати віртуальну просторову модель P3 у файл стандартизованої форми для подальшої обробки в інших застосунках або для зберігання командою `sim.exportShape()`.

`filePath = 'path/file_name.stl'` -- підготовка шляху та імені STL файлу;

`sim.exportShape(work_zone, filePath)` -- експорт моделі в STL файлу.

#### **4.3.4.3.4. Безпосереднє виконання моделювання**

Моделювання запускається кнопкою запуску головного скрипта. На завершальному етапі моделювання 3D-фігури робочих зон досяжності захвату ПР, що отримані після обробки хмари робочих точок командами алгоритму та представлені у вигляді .stl файлів, завантажуються на віртуальну сцену і поєднуються з 3D-моделлю ПР (рис. 4.47).

На рис. 4.47. різні конструктивно-геометричні елементи подано різними кольорами, а саме: фіолетовим – зона максимальної досяжності центру захвату без урахування фіксованого кутового положення захвату ПР; зеленим – робоча зона з урахуванням безколізійної досяжності центру захвату та фіксованого кутового положення захвату ПР; сірим – робоча зона з урахуванням безколізійного просторового розміщення об'єкта маніпулювання (заготовки, деталі тощо), яка знаходиться в захваті ПР, який (захват) перебуває у фіксованому кутовому положенні (орієнтації).

Для уможливлення виконання просторової верифікації у сцені модельного простору нанесено горизонтальну та вертикальну сітку з міток. Напрявні горизонтальних та вертикальних міток добре розрізняються по відображенню (рис. 4.47). Сітка дозволяє оцінювати дійсні горизонтальні та вертикальні розміри 3D-моделей ПР та отриманих робочих зон.

На сцені простору також розміщено мірний куб (рис. 4.47 – знизу), який показує актуальну відстань в метрах між мітками у трьох просторових напрямках. Таким чином користувач може оцінити розмірності, отриманих 3D-фігур робочих зон ПР.

На сцену можливо завантажити також робочі зони, отримані для різних варіантів фіксованого кутового положення захвату для їх візуальної верифікації. Інструменти руху по 3D-простору сцени моделювання, які вбудовані у *SorreliaSim*, дозволяють переглянути робочі зони з різних ракурсів та проєкцій. Нанесена сітка міток дозволяє оцінити значення габаритів або відстані відхилень між окремими 3D-фігурами робочих просторів, або будь-які інші лінійні розміри.

Важливою є можливість отримати 3D-форму P3 з урахуванням знаходження у захваті затиснутої певної заготовки, враховуючи при цьому

розмір заготовки та можливі колізії при русі цієї заготовки захватом ПР, в тому числі колізії заготовки із самими елементами ПР.

Для оцінки розмірів робочих зон відносно базової системи координат ПР була необхідність розробити окремий інструмент, з яким можливо було б взаємодіяти користувачу на віртуальній 3D-сцені. Було прийнято рішення, яке часто практикується в подібних ситуаціях: відображення лише двох координатних вказівників – вказівників розміру (рис. 4.47, рис. 4.48). Рухаючи вказівники розміру, користувач має можливість верифікувати координати їх знаходження на сцені і, таким чином, реальні координати робочого простору, оскільки координати відповідають реальним фізичним розмірностям.

Зчитування показників координат здійснюється у окремому розробленому користувацькому вікні POSITIONS & DIMENSION (рис. 4.47,  $\delta$  – зверху справа, рис. 4.48) за напрямками осей:  $(X1, Y1, Z1)$  – для маркованого центру системи координат першого вказівника,  $(X2, Y2, Z2)$  – для маркованого центру системи координат другого вказівника,  $(dX, dY, dZ)$  – значення різниці між відповідними координатами, dimension – значення обчисленого розміру, який приймається як відстань між центрами координат осей. Розмір, очевидно, обчислюється як корінь суми квадратів значень  $dX, dY, dZ$ .

Таким чином, обґрунтовано можливість створення ефективної програмної системи автоматизованої атестації метрики для визначення та оцінки просторових параметрів ПР, які характеризують РЗ аналізованого ПР з урахуванням просторового положення ЗП ПР.

В якості середовища реалізації експериментального моделювання може бути ефективно використано кросплатформенне програмне середовище CoppeliaSim, яке відповідає за набором інструментів та функцій вимогам при побудові системи автоматизованої атестації метрики ПР. CoppeliaSim, окрім безпосередньої візуалізації просторових об'єктів, має функціонал побудови механічно зв'язаних багатоеlementних конструкцій та широкий набір необхідних інструментів для керування їх статикою та динамікою, в тому числі такі інструменти та функції, застосування яких не потребує знань у галузі програмування.

Завдання алгоритмізації при проведенні експерименту вирішується за рахунок застосування вбудованого в CoppeliaSim інтерпретатора програмної мови Lua. На базі скриптів цієї мови розробляється підсистема управління моделлю ПР при проведенні автоматизованої атестації метрики, результатом якої є просторові моделі РЗ ПР з урахуванням накладених обмежень щодо кутового положення захвату ПР. На базі інструментів програмного середовища CoppeliaSim вирішуються також завдання ініціалізації початкових даних для виконання головного алгоритму за рахунок розробки просторового візуального 3D-об'єкту задавача фіксованого кутового положення ЗП.

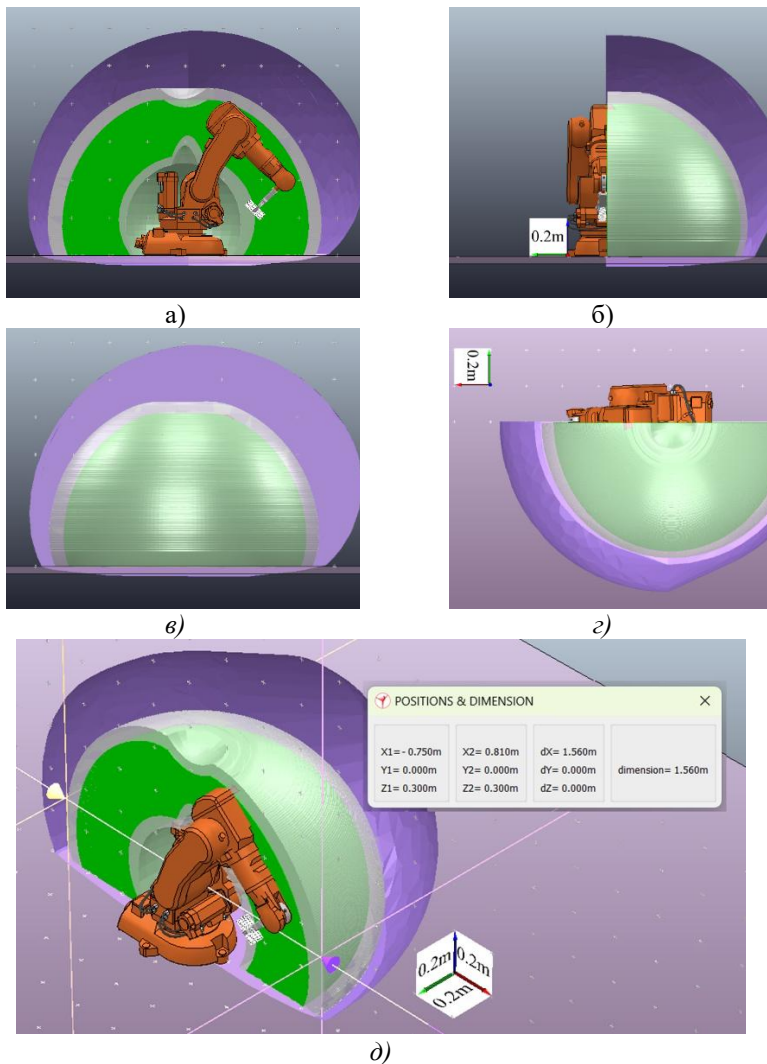
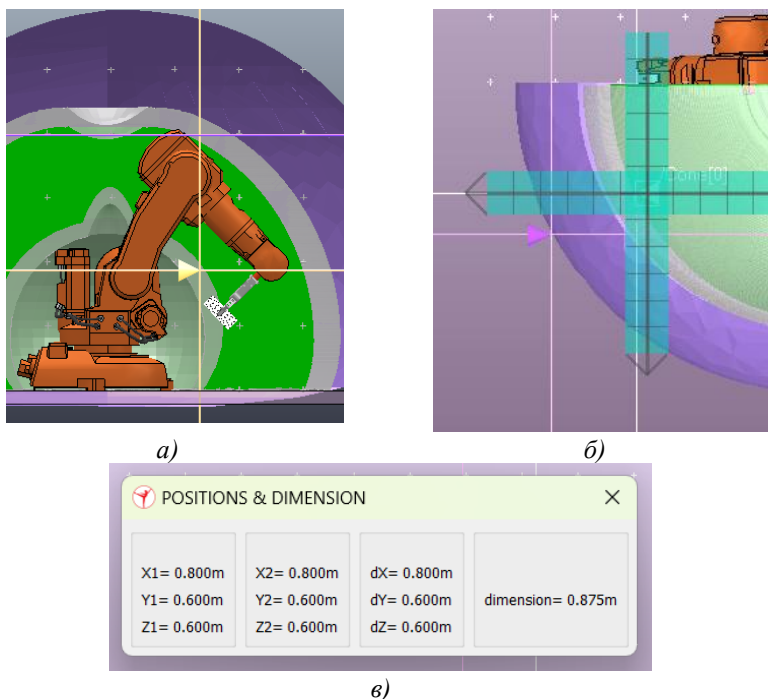


Рис. 4.47. Інтерфейс з можливістю відображення результатів моделювання робочих зон ПР в різних проєкціях (а, б, в, г, д) з урахуванням кутового положення (орієнтації) ЗП аналізованого ПР/КПР



*Рис. 4.48. Вимірювання рухомих показників розмірів робочих зон:  
 а - вибрані положення розмірних індикаторів (проекція: вид збоку);  
 б - візуалізація осей руху індикаторів (проекція: вид зверху);  
 в - вікно інтерфейсу, що відображає поточні вимірні координати  
 центрів осей індикатора та значення розрахункового розміру*

Завдання автоматичного формування та візуалізації РЗ ПР з урахуванням накладених початкових умов може бути вирішено за рахунок застосування спеціальних команд мови Lua для обробки множин точок: задавання кутових положень, контролю колізій, формування 3D-поверхонь за Convex Hull-алгоритмами. Завдання вимірювання розмірів РЗ вирішується шляхом розробки окремого інструменту, що складається з двох рухомих у 3D-просторі осьових вимірювачів розмірів та вікна відображення значень їх поточних координат та відстані між їх центрами, яка інтерпретується як вимірний розмір.

Актуальним залишається питання щодо доопрацювання програмного продукту і подібних до них до стану придатності для практичного використання користувачами, тобто до реального інженерного використання, в галузі конструювання, в т.ч. непідготовленими в частині навичок програмування, з орієнтацією на вимоги промислових підприємств.

## НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Загалом подальші дослідження направленні на поглиблення, деталізацію та повну автоматизацію функціонування складових запропонованого багаторівневого підходу, що вочевидь направлені на підвищення ефективності ТПг КРМСВ перш за все в частині:

- конкретизації рекомендацій при реалізації виконавського (L3) рівня запропонованого підходу;
- автоматизації виконання розрахунків для кожного із запропонованих рівнів (L1, L2, L3);
- автоматичної реалізації інтегрованої реалізації рівнів L1, L2, L3, що може розглядатись як компонент САПР КРМСТ. Вказане передбачає обґрунтовану інтеграцію задіяних та нових програмних продуктів в єдину систему автоматизації змісту виконуваних при цьому завдань.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі висвітлено зміст розробленого підходу, який підвищує ефективність роботизованих механоскладальних виробництв (КРМСВ), що містять КТР, за рахунок підвищення обґрунтованості прийняття системних технологічних рішень, які реалізовані на основі запропонованих інформаційно-методичного та алгоритмічно-програмного забезпечення його (підходу) як складової технологічної підготовки КРМСВ. Вищевказане є необхідною складовою початкових етапів проектування колаборативних роботизованих технологій (КТР).

2. На підставі проведеного аналізу сутності та стану напрацьовань щодо змісту та прояву КРМСТ визначено актуальність та доцільність проведення досліджень в частині колаборативності роботизованих технологій. Визначено, що на сьогодні має місце відсутність загально прийнятих методів та підходів щодо як проектування загалом, так і аванпроектування КРМСТ. Їх розробка та дослідження дає можливість підвищити ефективність ТПГ КРМСВ в частині обґрунтованості технологічних рішень, що приймаються при проектуванні КТР.

3. Розроблено підхід щодо початкових етапів проектування (аванпроектування) КРМСТ, що системно враховує сутність колаборації, представлену парадигму розвитку колаборативних роботизованих технологій (КТР) та конструктивно-технологічні особливості об'єктів виробництва. Підхід представлено тривірневою ієрархічною структурою, кожен рівень якої відтворює отримані розв'язки змістовних задач колаборативних технологій, а дуги відтворюють процеси прийняття технологічних рішень, що мають місце при цьому. Вказаний підхід дозволяє подальшу його алгоритмізацію та програмну реалізацію.

4. Стратегічний (перший) і тактичний (другий) рівні розробленого підходу за своїм змістом є інваріантними щодо об'єктів виробництва, галузей виробництва та серійності виробництва, де використовуються КТР. Всі інші параметри та характеристики визначаються на виконавському (третьому) рівні. Вказане тут і вище висвітлює доцільність використання запропонованого системного підходу, що відтворює його зміст та особливості.

5. Запропоновано формалізоване представлення розробленого тривірневого підходу до ТПГ КРМСВ, що системно відтворює його (підходу) структуру, зміст та особливості технологічної колаборації в роботизованих технологіях. Вказане представлення розробленого підходу можна розглядати як математичну основу створення об'єктно-незалежної складової автоматизованих систем ТПГ КРМСВ.

6. Розроблено інформаційно-методичне забезпечення, що системно реалізує запропонований багаторівневий підхід аванпроектування КРМСТ, передбачає методично обумовлене використання відомих методик прийняття рішень – методу аналізу ієрархій та нечіткого

багатокритеріального вибору альтернатив. Таке їх (методик) поєднання є одним із видів підвищення обґрунтованості системних технологічних рішень, що розглядаються в даній роботі.

7. Розроблено алгоритми для атестації метрики ПР, зміст яких визначається багаторазовим розв'язуванням прямої задачі кінематики на множині конструктивно-кінематичних особливостей ланок МС аналізованого ПР/КПР. На основі розробленої покрокової методики та запропонованого алгоритму реалізації процедури атестації метрики ПР за допомогою програмних продуктів SolidWorks та RoboDK розроблено процедуру автоматизованої атестації на прикладі робота моделі Врассіо. Результати досліджень зафіксовані, візуально проілюстровані та передбачають їх використання при проектуванні КРМСТ в ГВК на етапі ТПг КРМСВ.

8. Визначено особливості, розроблено та програмно реалізовано алгоритми автоматизованої реалізації процесу атестації метрики ПР/КПР за допомогою програмних продуктів CopeliaSim і MATLAB, а також CopeliaSim. Це вказує на варіативність методичних підходів з використанням різних програмних продуктів. Вказане акцентує увагу на принципову доступність процесу автоматизованої атестації метрики ПР/КПР, що є одним із напрямків підвищення ефективності ТПг РМСВ /КОМСВ.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tantawi K., Sokolov A., Tantawi O. Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration. *Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON)*. 2019. С. 1-4. DOI: 10.1109/TIMES-iCON47539.2019.9024658. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9024658>.
2. World Robotics Sales brochure, International Federation of Robotics. The International Federation of Robotics. 2023. URL: [https://ifr.org/img/worldrobotics/Digitalsheet\\_A4\\_World\\_Robotics\\_2023\\_low.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Digitalsheet_A4_World_Robotics_2023_low.pdf).
3. Stieber T. I, Cobot: Future collaboration of man and machine. *The Manufacturer*. 2016. URL: <https://cutt.ly/eNEgPMу>
4. Термінологічний та змістовний аспекти колаборативної робототехніки: аналіз та рекомендації / Кирилович В. А., Мельничук П. П., Кравчук А. Р., Яновський В. А. *Технічна інженерія*. 2022. № 2 (90). С. 13–21.
5. URs technical specification datasheet. *Офіційний сайт виробника промислових роботів Universal Robots*. URL: [https://www.universal-robots.com/media/1827367/05\\_2023\\_collective\\_data-sheet.pdf](https://www.universal-robots.com/media/1827367/05_2023_collective_data-sheet.pdf).
6. ABB Collaborative Robots official webpage. *Офіційний сайт виробника промислових роботів ABB*. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots>.
7. Fanuc Collaborative Robots official webpage. *Офіційний сайт виробника промислових роботів Fanuc*. URL: <https://www.fanuc.eu/ua/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots>.
8. Cobots: Your entry into automation with collaborative robots. *Офіційний сайт виробника промислових роботів Kuka*. URL: <https://www.kuka.com/en-us/future-production/human-robot-collaboration/cobots>.
9. Кирилович В. А., Кравчук А. Р. 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*. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022.
10. Кирилович В. А., Кравчук А. Р. Проблеми розподілу завдань між людиною та роботом у колаборативних механоскладальних технологіях. *Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки 15, 26 травня*. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2023.
11. Lightweight robots in manual assembly – best to start simply! Examining companies’ initial experiences with lightweight robots / W. Bauer et al. 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/327744724\\_Lightwei](https://www.researchgate.net/publication/327744724_Lightwei)

ght\_robots\_in\_manual\_assembly\_\_best\_to\_start\_simply\_Examining\_companie  
s'\_initial\_experiences\_with\_lightweight\_robots.

12. Example of Machining Robotic Cell. *Used Robots Trade official website*. URL: <https://usedrobotstrade.com/milling-machining-robotic-cell>.

13. Benotsmane R., Dudás L., Kovács Gy. Collaborating robots in Industry 4.0 conception. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 448*, 2018. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/448/1/012023/meta>.

14. Interact Analysis robotics market study report. *Interact Analysis official website*. URL: <https://interactanalysis.com/research/collaborative-robots/>.

15. Robotic System for Post Office Package Handling / O. Vismanis et al. *Applied Sciences*. 2023. № 13. DOI: 10.3390/app13137643.

16. An overview of robot applications in automotive industry / M. Bartoš et al. *Transportation Research Procedia*. 2021. № 55. P. 837–844. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.052.

17. Francesco P., Paolo G. G. AURA: An Example of Collaborative Robot for Automotive and General Industry Applications. *Procedia Manufacturing*. 2017. № 11. C. 338–345. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.116.

18. Gusan V., Titu A. The Implementation Process and Factors that Influence the Quality of the Integration of Collaborative Robots in the Automotive Industry. *New Technologies, Development and Application V* : Part of the Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, 2022. № 472. C. 46–57. DOI: 10.1007/978-3-031-05230-9\_5.

19. An application of collaborative robots in a food production facility / R. Accorsi et al. *Procedia Manufacturing*. 2019. № 38. C. 341–348. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.044.

20. Dalle Mura M., Dini G. Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach. *CIRP Annals*. 2019. № 68. C. 1–4. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.006.

21. Trends in Smart Manufacturing: Role of Humans and Industrial Robots in Smart Factories / Evjemo L., Gjerstad T., Grøtli E., Sziebig G. *Robotics in Manufacturing, Current Robotics Reports*. 2020. № 1. C. 35–41. DOI: 10.1007/s43154-020-00006-5.

22. Weidong L., Yudie H., Duc P. Truong Safe human–robot collaboration for industrial settings: a survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. DOI: 10.1007/s10845-023-02159-4.

23. System and Structural Approach to Interaction of Components in Collaborative Flexible Production Systems / V. Kyrylovych et al. *Proceedings of the Technical University of Sofia*. 2022. № 72. C. 10–14.

24. Automated Attestation of Metrics for Industrial Robots' Manipulation Systems / Kyrylovych V., Kravchuk A., Melnychuk P., Mohelnyska L.; in Tonkonogyi V. et al. (ed.). *Advanced Manufacturing Processes II* : Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. C. 813–822. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_79.

25. Кравчук А. Р. Аналіз мовної складової в програмних продуктах колаборативної робототехніки для вирішення технологічних завдань. *Технічна інженерія*. 2023. № 91. С. 50–56.
26. ДСТУ 2960-94 Організація промислового виробництва. Основні поняття. Терміни та визначення.
27. Павленко І. І., Мажара В. А. Роботизовані технологічні комплекси : монографія / за ред. Павленка І. І. Кропивницький : КОД, 2019. 382 с.
28. System and Structural Approach to Interaction of Components in Collaborative Flexible Production Systems / V. A. Kyrylovych et al. *Proceedings of the Thechnical University of Sofia*. 2022. Vol. 72, № 3. P. 10-14. URL: <https://proceedings.tu-sofia.bg/>.
29. Positioning Paper. Demystifying Collaborative Industrial Robots. International Federation of Robotics Frankfurt, Germany. 2020. URL: <https://www.ppma.co.uk/static/d013864e-f944-4028-bc14eee8dd62b6e8/IFRDemystifyingCollaborativeRobotsUpdatev03Dec2020.pdf>
30. Кирилович В. А., Кравчук А. Р., Гриневич М. С. Щодо атестації геометричних характеристик робочих зон промислових роботів. *Інформаційно-комп'ютерні технології 2019* : збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції, 18–20 квітня. Житомир : ЖДТУ, 2019. С. 126–126.
31. Кравчук А. Р., Кирилович В. А. Алгоритм атестації метрики промислових роботів. *Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки 11–15 травня*. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. С. 191–192.
32. Collaborative Robot-ASSISTA general information and datasheet. *Mitsubishi Electric official website*. URL: <https://www.mitsubishielectric.com>.
33. Robotics model list (ABB portfolio). URL: <https://new.abb.com/products/robotics/robots>.
34. FANUC Robot CRX series datasheet. URL: [https://www.fanuc.co.jp/en/product/robot/f\\_r\\_collabo.html#crx10ia](https://www.fanuc.co.jp/en/product/robot/f_r_collabo.html#crx10ia).
35. *Kuka Homepage*. URL: <https://www.kuka.com/>.
36. Кирилович В. А., Кравчук А. Р., Мельничук П. П. Атестація метрики промислових роботів як напрям підвищення ефективності технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв. *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент* : збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю 6–9 листопада. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. С. 118–119.
37. Determination of optimal samples for robot calibration based on error similarity / W. Tian et al. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2015. № 28. P. 946–953.
38. Bader A. M., Maciejewski A. A. Maximizing the failure-tolerant workspace area for planar redundant robots. *Mechanism and Machine Theory*

143. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X19310055>.
39. Existence Conditions and General Solutions of Closedform Inverse Kinematics for Revolute Serial Robots / Wang S., Luo X., Luo Q., Han B. *Applied Sciences*. 2019. № 9. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20>.
40. Кирилович В. А., Кравчук А. Р. Автоматизована атестація геометричних характеристик робочих зон промислових роботів: необхідність та сутність. *IV Міжнародна науково-технічна конференція теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій 20–21 червня*. Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2019. С. 190–191.
41. Study on Improving Accuracy in Robotic Milling of Aluminum Alloy / Shaochun Sui, Kai Guo, Jie Sun, Yiran, Zang *ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. DOI: 10.1115/MSEC2018-6476.
42. Khaled Assad, Arrouk B. Chedli, Bouzgarrou Grigore Gogu. Workspace characterization and kinematic analysis of general spherical parallel manipulators revisited via graphical based approaches. *Mechanism and Machine Theory*. 2018. Vol. 122. P. 404–431.
43. Carlos Viegas, Mahmoud Tavakoli, Anibal T. De Almeida. A novel grid-based reconfigurable spatial parallel mechanism with large workspace. *Mechanism and Machine Theory*. 2017. Vol. 115. P. 149–167.
44. Existence Conditions and General Solutions of Closed-form Inverse Kinematics for Revolute Serial Robots / Wang Shanda, Luo Xiao, Luo Qingsheng, Han Baoling. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, Issue 20. DOI: 10.3390/app9204365.
45. RobotMaster. *Homepage* URL: <https://www.robotmaster.com/en/>.
46. ROS. *Homepage* URL: <https://www.ros.org/>.
47. RobotWorks. *Homepage* URL: <http://www.fange.com/RobotWorks>.
48. RobotExpert. *Homepage* URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/>.
49. RobotAnalyzer. *Homepage* URL: <http://www.roboanalyzer.com/>.
50. RoboDK. *Homepage* URL: <https://robodk.com/simulation>.
51. Market presentation World Robotics. *The International Federation of Robotics*. 2022. URL: <https://ifr.org/freedownloads/>.
52. Steuer R. E. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application. NewYork: John Wiley & Sons, Inc., 1986.
53. Automation Pyramid as Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study: A Didactic Manufacturing System / Edwin Mauricio, Martinez Pedro Ponce, Israel Macias, Arturo Molina *Sensors*. 2021. Vol. 21, Issue 14, 7 July. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4656/htm>.
54. Кирилович В.А. Автоматизований синтез роботизованих механоскладальних технологій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня

- д.т.н.: 05.02.08 Технологія машинобудування. Київ, 2015. 48 с.  
URL: [http://rada.kpi.ua/files/aref\\_Kurylovych\\_V.A.pdf](http://rada.kpi.ua/files/aref_Kurylovych_V.A.pdf).
55. Dave Levitt. Introduction to Structured Analysis and Design. CS 2000: Systems Analysis & Design.
56. John Mylopoulos. Conceptual Modelling III. Structured Analysis and Design Technique (SADT). 2004.
57. Ross D. T., Schoman K. E. Structured analysis for requirements definition. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1977. Vol. 3, № 1. P. 6–15.
58. Saaty T. L. Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. Belmon: Lifetime Learning Publications, 1982. 291 p.
59. Bevel gearbox by Dmitriy Babych. *Grabcad open-source hardware designs*. URL: <https://grabcad.com/library/bevel-gearbox-2>.
60. SolidWorks 3D CAD. *Homepage*. URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>.
61. Kurylovych V., Kravchuk A., Dobrzhanskyi O., Kryzhanivska I., and Dimitrov L. Automation of the Process of Attestation of Metrics for Industrial Robots Using Software Products CoppeliaSim and MATLAB. *Engineering Proceedings*, 2024, Vol. 70, Pp.1-9. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4591/70/1/9/pdf?version=1721986228>.
62. Добржанський О.О., Кирилович В.А., Кравчук А.Р., Пуховський С.С., Підтиченко О.В. Елементи програмування та 3D-моделювання при автоматизованій атестації метрики промислових роботів // Науковий журнал "Технічна інженерія". 2024. №1 (93). С.105-113.
63. Dobrzhanskyi O., Kurylovych V., Kravchuk A., Puhovsky E., and Savkiv V. Features of Software Implementation and Three-dimensional Modelling of the Automated Certification of Industrial Robot Metrics in CoppeliaSim Environment. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 2024, № 4 (116), Pp.135-148. URL: <https://visnyk.tntu.edu.ua/pdf/116/816.pdf>
64. *Tinker Kit Braccio. Homepage*. URL: <https://store.arduino.cc/tinkerkit-braccio-robot>.
65. A case study in human–robot collaboration in the disassembly of press-fitted components / J. Huang et al. *Journal of Engineering Manufacture: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B*. 2020. № 234 (3). P. 654-664. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0954405419883060>.
66. On a human-robot collaboration in an assembly cell / Panagiota Tsarouchi, Alexandros-Stereos Matthaiakis, Sotiris Makris, George Chryssolouris. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2017. № 30:6. P. 580–589. DOI: 10.1080/0951192X.2016.1187297.
67. Heydaryan S., Suaza Bedolla J., Belingardi G. Safety Design and Development of a Human-Robot Collaboration Assembly Process in the

Automotive Industry. *Applied Sciences*. 2018. № 8 (3). P. 344. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/3/344>. DOI: 10.3390/app8030344.

68. Efficient Use of Human-robot Collaboration in Packaging through Systematic Task Assignment / Blankemeyer Sebastian et al.; in Nyhuis P., Herberger D., Hübner M. (ed.). *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2020*. Hannover: publish-Ing., 2020. P. 297–306. URL: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/9727>. DOI: 10.15488/9671.

69. Digital Manufacturing Tools in the Simulation of Collaborative Robots: Towards Industry 4.0. / F. Lima et al. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 2019. № 16 (2). P. 261–280. URL: <https://bjopm.org.br/bjopm/article/view/785>. DOI: 10.14488/BJOPM.2019.v16.n2.a8.

70. Rainer Müller, Matthias Vette, Aaron Geenen. Skill-based Dynamic Task Allocation in Human-Robot-Cooperation with the Example of Welding Application. *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 11. P. 13–21. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917303177>. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.113.

71. Iina Aaltonen, Timo Salmi, Ilari Marstio. Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 72. P. 93–98. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118303743>. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.214.

72. Marrone D. The implementation of collaborative robots in production environments: a review of academic literature and industrial applications. 2022. URL: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-320107>.

73. A Morphology of Human Robot Collaboration Systems for Industrial Assembly / Ranz Fabian et al. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 72. P. 99–104. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118301094>. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.011.

74. Ali Ahmad Malik, Arne Bilberg. Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 665–670. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119304780>. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.173.

75. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів / О.М. Величко та ін. Одеса: Одеська державна академія технічного регулювання та якості, 2015. – 286 с.