

Міністерство освіти і науки України  
Державний університет «Житомирська політехніка»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Кравчук Антон Романович

УДК 621.865.8

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**БАГАТОРІВНЕВА СИСТЕМА ПОЧАТКОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ**  
**КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТИЗОВАНИХ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ**  
**ТЕХНОЛОГІЙ**

131 Прикладна механіка

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ /Кравчук А.Р.

Науковий керівник: Кирилович Валерій Анатолійович, доктор технічних наук, професор кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Кравчук А.Р.* Багаторівнева система початкового проєктування колаборативних роботизованих механоскладальних технологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”. – Державний університет «Житомирська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Житомир, 2023.

Дисертаційна роботи присвячена вирішенню актуальної та важливої науково-прикладної задачі підвищення ефективності технологічної підготовки на початкових етапах проєктування колаборативних роботизованих механоскладальних виробництв.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у чотирьох розділах, в яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та вказано поставлені завдання дослідження, описано методи дослідження, представлено інформацію про наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, їх апробацію та публікації по роботі.

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» 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 блоками поділені на вказані вище рівні. Кожний блок детально описано та визначено його інформаційні зв'язки з іншими блоками.

Представлено методику прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні КРТ, а саме проведення експертного опитування МАІ при виконанні (реалізації) трирівневого підходу, а саме описано МАІ та його використання для пропонованого підходу. Розроблені та представлені схеми ієрархій для реалізації МАІ на стратегічному рівні L1 та тактичному рівні L2.

Реалізовано проведення експертного опитування МАІ для: визначення можливості впровадження КРТ у виробництво на стратегічному рівні L1; розподілу завдань між людиною, роботом та обладнанням на тактичному рівні L2.1; визначення виду взаємодії людина робот на тактичному рівні L2.2. Отримані результати графічно представлено стовпчиковими та пелюстковими діаграмами, що візуалізують інформацію про отримані результати.

Висвітлено розроблену методику атестації метрики як необхідну складову реалізації виконавського рівня L3. Пропонована методика передбачає покрокове виконання певних операцій з 3D-моделями КТР та ОМ у спеціалізованих програмних продуктах, а саме підготовка і налаштування 3D-моделі та віртуального середовища (робочого простору), багаторазове розв'язування зворотної задачі кінематики, збереження та візуалізація отримуваних результатів дослідження.

У третьому розділі розроблене інформаційне забезпечення для реалізації пропонованого в розділі 2 методичного забезпечення. Представлено інформаційний базис та описано його складові. Висвітлено інформаційне забезпечення для атестації метрики маніпуляційної системи колаборативних промислових роботів.

У четвертому розділі розроблено узагальнений алгоритм реалізації методики прийняття технологічних рішень на основі МАІ для пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні колаборативних роботизованих механоскладальних технологій, який доповнив та розширив опис розробленого та пропонованого методичного та інформаційного забезпечення, які висвітлені відповідно в розділі 2 та розділі 3. Вище вказані алгоритми висвітлюють

реалізацію стратегічного рівня L1, тактичного рівня L2 та виконавського рівня L3.

Висвітлено узагальнений алгоритм роботи МАІ для прийняття технологічних рішень при аванпроектуюванні 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 дисертаційній роботі отримано наступні нові наукові результати дослідження:

- вперше з єдиних системних позицій запропоновано багаторівневий підхід реалізації початкових етапів проектування КРМСТ машино- та приладобудування, що комплексно враховує сутність колаборативних технологій, конструктивно-технологічні особливості КТР, 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 за рахунок розробки та проведення автоматизованої атестації метрики МС ПР 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 КТР.

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 КПР;

– розроблено інженерну методику реалізації процесу атестації ПР та КПР, що придатна до використання при ТПг РМСВ, включаючи КРМСВ;

– результати роботи в частині визначення доцільності впровадження КПР прийняті для майбутніх впроваджень у СП ТОВ «RIF-1» (м. Житомир);

– методика автоматизованої атестації метрики МС ПР та КПР як складова проведених досліджень впроваджена в навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка».

*Ключові слова:* колаборативний промисловий робот, колаборативна технологія, промисловий робот, автоматизація, роботизоване складання, безпека, ISO стандарти, методи прийняття рішень, оптимізація, алгоритм, кінематика, 3D-модель, об'єкт маніпулювання, альтернативи, комп'ютерна симуляція.

## SUMMARY

*Kravchuk A.R.* Multilevel system of initial design of collaborative robotic mechanical assembly technologies.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 131 "Applied Mechanics." - State University "Zhytomyr Polytechnic" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr, 2023.

The dissertation is devoted to solving an urgent and important scientific and applied problem of increasing the efficiency of technological training at the initial stages of designing collaborative robotic mechanical assembly facilities.

The content of the dissertation research is outlined in four chapters, in which the main results of the work are presented and substantiated.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the study, describes the research methods, provides information on the scientific novelty and practical significance of the results, their testing and publications.

The first section analyses the current state of collaborative robotic technologies. The available information sources on the application of collaborative robotic technologies in production are analysed. The paradigm of development of robotic technologies in terms of their transition from "classical" to collaborative ones is highlighted.

The second section develops a methodological support for the system for determining the level of collaboration in technological robotic systems of human-robot in the form of a three-level approach, consisting of the strategic level L1, the tactical level L2 and the executive level L3. The proposed three-level approach is described using a formalised representation and SADT diagrams, which are divided into the above levels by blocks. Each block is described in detail and its information links with other blocks are identified.

The methodology for making technological decisions in the advance design of CRT, namely, conducting an expert survey of MAI in the implementation of the three-level approach, is presented, namely, MAI and its use for the proposed approach are

described. The hierarchy diagrams for the implementation of MAI at the strategic level L1 and the tactical level L2 are developed and presented.

An expert survey of MAI was carried out to: determine the possibility of introducing CRT into production at the strategic level L1; distribute tasks between humans, robots and equipment at the tactical level L2.1; determine the type of human-robot interaction at the tactical level L2.2. The obtained results are graphically represented by bar and pie charts that visualise information about the results obtained.

The article highlights the developed methodology for metric certification as a necessary component of the implementation of the L3 executive level. The proposed methodology involves the step-by-step performance of certain operations with 3D models of CRC and OM in specialised software products, namely, preparation and configuration of the 3D model and virtual environment (workspace), repeated solution of the inverse kinematics problem, saving and visualisation of the obtained research results.

The third section develops information support for the implementation of the methodological support proposed in section 2. The information base is presented and its components are described. The information support for the certification of the metric of the manipulation system of collaborative industrial robots is highlighted.

Chapter 4 develops a generalised algorithm for implementing the methodology for making technological decisions based on MAI for the proposed three-level approach to the advance design of collaborative robotic mechanical assembly technologies, which complements and expands the description of the developed and proposed methodological and information support, which are covered in Chapter 2 and Chapter 3, respectively. The above algorithms cover the implementation of the strategic level L1, tactical level L2 and executive level L3.

A generalised algorithm of MAI operation for making technological decisions in the advance design of collaborative robotic mechanical assembly technologies is presented on the basis of existing methodological developments described in Section 2.2.1.

On the basis of the proposed methodological support described in Section 2, the general algorithm of the process of certification of the manipulation system metric of collaborative industrial robots as a meaningful and necessary component of the implementation of the L3 performance level is highlighted.

The following new scientific results were obtained in the dissertation:

- For the first time, a multi-level approach to the implementation of the initial stages of designing machine and instrumentation CMMSTs is proposed from a unified systemic perspective, which comprehensively takes into account the essence of collaborative technologies, design and technological features of CRC, and design and technological properties of production facilities;
- the procedure for systematic technological decision-making in defining CRT tasks as fuzzy multicriteria optimisation problems solved with the integrated use of hierarchy analysis (HA) and fuzzy multicriteria selection of alternatives (FMSA) methods was further developed;
- for the first time, a new approach to the study of technological capabilities of the PR has been developed through the development and implementation of automated certification of the PR MS metric as an integral part of the CMMCS TG, which increases the efficiency and reduces the labour intensity of its (TG) implementation when designing new and/or modernising existing flexible production cells (FPCs) in machine and instrumentation engineering, including the use of CR.

The practical significance of the results is determined by the following:

- an approach has been developed that can be used in real production conditions to solve the problems of designing CMMCs at their initial stages, which is recommended for use in the machine and instrumentation industry, including with the use of CRC;
- an engineering methodology for implementing the process of certification of PRs and CRCs was developed, which is suitable for use in the TPg of the RIF, including the CRCS;

- the results of the work on determining the feasibility of implementing the CRC were adopted for future implementations in the JV LLC "RIF-1" (Zhytomyr);
- the methodology of automated certification of the MS PR and CRC metrics as a component of the conducted research was introduced into the educational process of the State University "Zhytomyr Polytechnic".

*Keywords:* collaborative industrial robot, collaborative technology, industrial robot, automation, robotic assembly, safety, ISO standards, decision making methods, optimization, algorithm, kinematics, 3D model, object manipulation, alternatives, computer simulation.

*Список публікацій здобувача*

1. Kyrylovych V., Kravchuk A., Melnychuk P., Mohelnytska L. Automated Attestation of Metrics for Industrial Robots' Manipulation Systems. *Advanced Manufacturing Processes*: Springer. 2021. P. 813-822. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-68014-5\\_79](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-68014-5_79)

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

3. Кирилович В.А., Мельничук П.П., Кравчук А.Р., Яновський В.А. Термінологічний та змістовний аспекти колаборативної робототехніки: аналіз та рекомендації. *Державний університет "Житомирська політехніка". Технічна інженерія*. 2022. №2 (90). С. 13-21.

4. Кравчук А.Р. Аналіз мовної складової в програмних продуктах колаборативної робототехніки для вирішення технологічних завдань. *Державний університет "Житомирська політехніка". Науковий журнал «Технічна інженерія»*. 2023. №1 (91). С. 50-56.

5. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Трирівневий підхід до початкових етапів проектування колаборативних роботизованих технологій, *Науковий журнал Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні науки»*, 2023. №4. С. 188-195.

6. Кирилович В.А., Кравчук А.Р., Мельничук П.П. Атестація метрики промислових роботів як напрям підвищення ефективності технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв. *Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент»*, 6–9 листопада 2019 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». С. 118-119.

7. 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 2019 року, м. Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя. С. 190-191.

8. Кирилович В.А., Кравчук А.Р., Гриневич М.С. Щодо атестації геометричних характеристик робочих зон промислових роботів. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології 2019», 18-20 квітня 2019 р. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. С. 126-126.

9. 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 2020 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. С.191-192.

10. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Проблеми використання програмних продуктів для атестації метрики промислових роботів. Тези Всеукраїнської науково-практичної online конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки. м. Житомир, 11–15 травня 2021 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. 646 с. С. 117.

11. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Проблеми промислової колаборативної робототехніки в гнучких механоскладальних виробництвах. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 16-20, 26 травня 2022 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. С. 72.  
URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/06/5-2.pdf>

12. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Проблеми розподілу завдань між людиною та роботом у колаборативних механоскладальних технологіях. Тези Всеукраїнської науково-практичної online конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 15-19 травня 2023 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С. 114.  
URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/3-tendentsiyi-rozvytku-tekhnologiy-v-avtomatyzatsiyi.pdf>

13. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Парадигма розвитку роботизованих колаборативних технологій. Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційно-комп'ютерні технології - 2023", 30-31 березня 2023 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С. 198. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/198.pdf>



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОЛАБОРАТИВНИХ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	23
1.1. Аналіз сучасного стану розвитку колаборативних роботизованих технологій при технологічній підготовці роботизованих виробництв .	23
1.1.1. Зміст, структура та місце колаборативних систем у промислових технологічних задачах та їх застосування.....	23
1.1.2. Прояви колаборативних технологій в різних галузях виробництв.	30
1.1.3. Компоненти та структура технологічної підготовки роботизованих виробництв .....	33
1.1.4. Місце колаборативних роботизованих технологій в технологічній підготовці роботизованих виробництв .....	36
1.1.5. Аналіз інформаційних джерел щодо атестації метрики.....	40
1.2. Парадигма розвитку роботизованих технологій .....	45
1.3. Висновки до розділу 1 .....	49
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КОЛАБОРАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ РОБОТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ ЛЮДИНА-РОБОТ .....	51
2.1. Загальне системне представлення послідовності розв’язування завдань.....	51
2.1.1. Пропонована багаторівнева схема системного підходу при аванпроектуюванні колаборативних роботизованих технологій .....	51
2.1.2. SADT-представлення загальної схеми послідовності розв’язуваних завдань.....	61
2.2. Методика проведення експертного опитування методу МАІ для пропонованого трирівневого підходу .....	70
2.2.1. Загальні положення.....	70
2.2.2. Використання МАІ при аванпроектуюванні КРМСТ.....	72
2.3. Стисла методика використання НБВА .....	77

2.4. Методика атестації метрики маніпуляційних систем колаборативних промислових роботів .....	78
2.4.1. Загальні положення.....	78
2.4.2. Опис процедури атестації метрики маніпуляційних систем колаборативних промислових роботів .....	80
2.5. Висновки за розділом 2 .....	83
<b>РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КОЛАБОРАЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ РОБОТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ ЛЮДИНА-РОБОТ .....</b>	<b>85</b>
3.1. Інформаційний базис розв'язування задач в технологічній колаборативній системі людина-робот.....	85
3.2. Методичне забезпечення як постійна складова інформаційного базису пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ .....	88
3.3. Змінна складова інформаційного базису пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ .....	89
3.4. Інформаційне забезпечення атестації метрики маніпуляційних систем КТР .....	91
3.5. Інформаційне забезпечення щодо рекомендаційної складової реалізації КРТ.....	93
3.6. Висновки за розділом 3 .....	94
<b>РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМІЧНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ АВАНПРОЄКТУВАННІ КРМСТ .....</b>	<b>96</b>
4.1. Алгоритмічне забезпечення пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ .....	96
4.1.1. Алгоритм прийняття рішень на основі МАІ.....	96
4.1.1.1. Стислий алгоритм роботи МАІ прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні КРМСТ .....	96
4.1.1.2. Узагальнений алгоритм роботи МАІ прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні КРМСТ .....	99
4.1.2. Узагальнений алгоритм НБВА при аванпроектуванні КРМСТ ....	108
4.1.3. Узагальнений алгоритм атестації метрики МС КТР .....	110

4.2. Програмне забезпечення реалізації пропонованого підходу .....	114
4.2.1. Програмна реалізація МАІ .....	114
4.2.2. Програмна реалізація НБВА .....	117
4.2.3. Програмна реалізація атестації метрики ПР та КПП .....	119
4.3. Перевірка працездатності функціонування пропонованої багаторівневої системи початкового проєктування КРМСТ.....	121
4.3.1. Загальне тлумачення отримуваних результатів МАІ .....	121
4.3.2. Загальне тлумачення отримуваних результатів при застосуванні НБВА.....	123
4.3.3. Результати застосування МАІ для пропонованого трирівневого підходу при аванпроєктуванні КРТ .....	128
4.3.4. Результати застосування атестації метрики для пропонованого трирівневого підходу при аванпроєктуванні КРТ.....	137
4.4. Висновки за розділом 4 .....	150
НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	152
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155
ДОДАТКИ.....	163
Додаток А1 .....	164
Додаток А2.....	165
Додаток Б.....	166
Додаток В .....	175

## ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЗ	– алгоритмічне забезпечення
ГВК	– гнучка виробнича комірка
ДТО	– допоміжне технологічне обладнання
ЗП	– затискний пристрій
ІЗ	– інформаційне забезпечення
КПР	– колаборативний промисловий робот
КРМСВ	– колаборативне роботизоване механоскладальне виробництво
КРМСТ	– колаборативна роботизована механоскладальна технологія
КРТ	– колаборативна роботизована технологія
МАІ	– метод аналізу ієрархій
МС	– маніпуляційна система
НБВА	– нечіткий багатокритеріальний вибір альтернатив
ОМ	– об’єкт маніпулювання
ОТО	– основне технологічне обладнання
ПЗ	– програмне забезпечення
ПП	– програмний продукт
ПР	– промисловий робот
РЗ	– робоча зона
РМСТ	– роботизована механоскладальна технологія
РТК	– роботизований технологічний комплекс
СК	– система координат
ТП	– технологічний процес
ТПг	– технологічна підготовка
УК	– узагальнена координата
УП	– управляюча програма
FMCSA	– Fuzzy Multi Criteria Selection of Alternatives (Нечіткий багатокритеріальний вибір альтернатив)

## ВСТУП

### **Актуальність роботи.**

Сучасна промислова робототехніка є невід'ємною складовою автоматизованих виробництв, що відповідає вимогам концепції Industry 4.0 [1]. На сьогодні ПР завдяки своїм функціональним можливостям та гнучкості у застосуванні широко використовуються в різних галузях виробництв. Найпоширенішими галузями, де використовуються ПР, є електроніка, приладобудування, машинобудування, автомобільна галузь тощо. ПР, які сьогодні використовуються на різногалузевих виробництвах, зарекомендували себе як надійне та ефективне технологічне обладнання, особливістю якого є можливість переналаштуватись під мінливі вимоги виробництв.

Але існують технології і виробництва, де використання «класичних» ПР є неможливим, неефективним або небезпечним для людини через особливості виконання певних технологій. Вищевказана проблема призвела до появи нового напрямку промислової робототехніки, а саме колаборативної промислової робототехніки [1]. В цілому колаборативна робототехніка є необхідним технологічним етапом розвитку на шляху до когнітивної робототехніки, яка також розвивається та має спільні задачі та проблеми з колаборативною та «класичною» промисловою робототехнікою. У зв'язку з стрімким розвитком технологій, мікропроцесорної техніки, нейронних мереж, штучного інтелекту, технічного зору, мов програмування тощо з'являються нові технічні та інженерні рішення в сфері промислової колаборативної робототехніки. Тому сьогодні відокремлюють новий вид ПР, які призначені для спільної роботи та/або взаємодії з людиною, і які називаються колаборативні промислові роботи (КПР). Для потреб колаборативної робототехніки з кожним роком збільшується як обсяги випуску КПР, так і обсяги їх впровадження на виробництвах у всьому світі, що пояснюється функціональними та апаратними можливостями останніх.

Перевагами КПР є забезпечення вищих показників безпеки при роботі з людиною у порівнянні з «класичними» ПР, легкість налаштування траєкторій

переміщення за допомогою методу навчання оператором, підтримка сучасних технологій на кшталт технічного зору та штучного інтелекту, більш ергономічне програмне забезпечення та реалізація в цілому у порівнянні з «класичними» ПР тощо. Конструктивна та апаратна реалізація КПР фрагментарно відрізняється від технічних та інженерних рішень, які використовуються в ПР, тобто явні відмінності присутні в програмному забезпеченні, функціональних можливостях, інтерфейсах підключення тощо. Проте, не зважаючи на очевидні переваги КПР перед «класичними» ПР, існують ряд проблемних питань та завдань, які на сьогодні не мають єдиного системного підходу або методики вирішення, проте мають фрагментарні технологічні напрацювання для певних технологічних задач на виробництвах. Одними з таких проблемних завдань є, наприклад, задачі визначення доцільності впровадження КПР у виробництво, розподіл завдань між людиною та КПР при виготовленні продукції, визначення виду взаємодії між людиною та КПР тощо.

Вказане разом із значними темпами випуску КПР [2] порівняно із «класичними» ПР є підтвердженням актуальності досліджень будь-якого виду та форми, що відтворюють колаборативні роботизовані технології.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Обраний напрям досліджень відповідає пріоритетним науковим напрямам «Технічні науки» Державного університету «Житомирська політехніка», а саме: з бюджетною програмою 2201390 «Підтримка пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок у закладах вищої освіти»; з дербюджетною темою «Приладова інформаційно-вимірювальна система для проведення розвідувальних операцій на базі рухомої гусеничної роботизованої платформи» (номер державної реєстрації 0121U109532); з госпдоговірною темою «Розробка заходів та засобів для оптимізації техніко-економічних показників роботи робота-маніпулятора в системі автоматичного фарбування елементів виробів взуттєвого виробництва» (номер державної реєстрації 0121U112907).

## Мета і завдання дослідження

*Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності роботизованих механоскладальних виробництв (РМСВ), що містять КІР, за рахунок підвищення обґрунтованості прийняття системних технологічних рішень, які базуються на розробці багаторівневого підходу початкових етапів проектування колаборативних роботизованих механоскладальних технологій (КРМСТ), інформаційно-методичному та алгоритмічно-програмному забезпеченні його (підходу) реалізації як складової технологічної підготовки КРМСВ.*

Досягнення мети передбачає розв'язання наступних *завдань*:

1. Провести аналіз сутності та стану напрацювань щодо змісту та прояву КРМСТ.
2. Запропонувати багаторівневий підхід початкових етапів проектування (авантпроектування) 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 реалізовує запропонований багаторівневий підхід при авантпроектуванні КРМСТ.
4. Запропонувати формалізоване представлення розробленого трирівневого 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 КІР як складової ТПГ КРМСТ та проілюструвати її (атестації) сутність.
6. Продемонструвати працездатність запропонованого трирівневого підходу при авантпроектуванні КРМСВ на прикладі складання реального механічного вузла.
7. Впровадити результати досліджень у виробництво та навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка».

**Об'єкт досліджень:** технологічна підготовка колаборативних роботизованих механоскладальних виробництв.

**Предмет дослідження:** колаборативні роботизовані механоскладальні технології.

**Методи дослідження:** основні положення технології машинобудування, системний аналіз, теорія множин, графів, матриць, методи оптимізації, комп'ютерне моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

– вперше з єдиних системних позицій запропоновано багаторівневий підхід реалізації початкових етапів проєктування КРМСТ машино- та приладобудування, що комплексно враховує сутність колаборативних технологій, конструктивно-технологічні особливості КТР, 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 за рахунок розробки та проведення автоматизованої атестації метрики МС ПР як невід'ємної складової ТПг КРМСВ, що підвищує ефективність та зменшує трудомісткість її (ТПг) виконання при проєктуванні нових та/або модернізації існуючих ГВК машино- та приладобудування, в тому числі з використанням КТР.

**Практична значимість отриманих результатів** визначається наступним:

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



- розроблено інженерну методику реалізації процесу атестації ПР та КПР, що придатна до використання при ТПГ РМСВ, включаючи КРМСВ;
- результати роботи в частині визначення доцільності впровадження КПР прийняті для майбутніх впроваджень у СП ТОВ «RIF-1», м. Житомир;
- методика автоматизованої атестації метрики МС ПР та КПР як складова проведених досліджень впроваджена в навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка».

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні ідеї та наукові результати дисертаційної роботи отримані автором особисто і висвітлено у 13 наукових працях.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні результати дисертації пройшли апробацію на наступних конференціях:

1. X Міжнародної науково-технічна конференція «Інформаційно-комп'ютерні технології 2019», 18-20 квітня 2019 р. Житомир: ЖДТУ.
2. Міжнародна науково-технічна конференція теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій, 20-21 червня 2019 року, м.Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя.
3. X Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка».
4. Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 11-15 травня 2020 року. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка».
5. 2nd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes September 8-11, 2020. – Sumy.
6. Всеукраїнська науково-практична online конференція аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки. м. Житомир, 11–15 травня 2021 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка».

7. Всеукраїнська науково-практична онлайн-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 16-20, 26 травня 2022 року. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка».

8. Всеукраїнська науково-практична online конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 15-19 травня 2023 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка».

**Публікації.** По результатах проведених досліджень опубліковано 13 наукових праць, із них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах WoS та Scopus, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій та отримано 2 документи інтелектуальної власності, а саме свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об'єм дисертації складає 177 сторінок, з них 115 сторінки основного тексту, 3 таблиці, 68 рисунків, 72 літературних джерела та 4 додатки.

## **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. КПП 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 КПП 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 затискному 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 перевищення 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 КПР. Зазвичай КТС складається з КПР, 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 КПР, і які в свою чергу базуються на оригінальних методиках, підходах, технічних рішеннях та інших напрацювання щодо проєктування, програмування, налаштування та реалізації поняття явища колабративності в промисловій робототехніці. КРТ, які застосовуються на виробництвах, передбачають постійну або фрагментарну взаємодію людини та КПР 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.



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

Вищевказана відмінність КПР від ПР реалізується за допомогою апаратних та програмних технічних рішень, які забезпечують функціональні можливості КПР 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 КПП, так і активною участю людини.

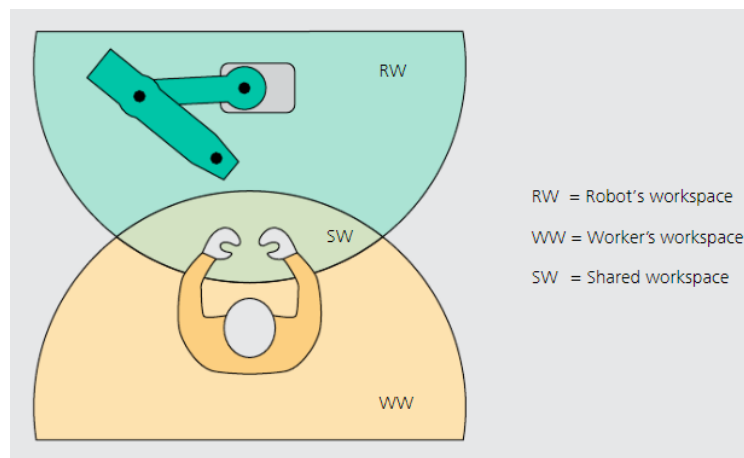


Рис. 1.3 – Робочі простори людини та КПП [11]

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

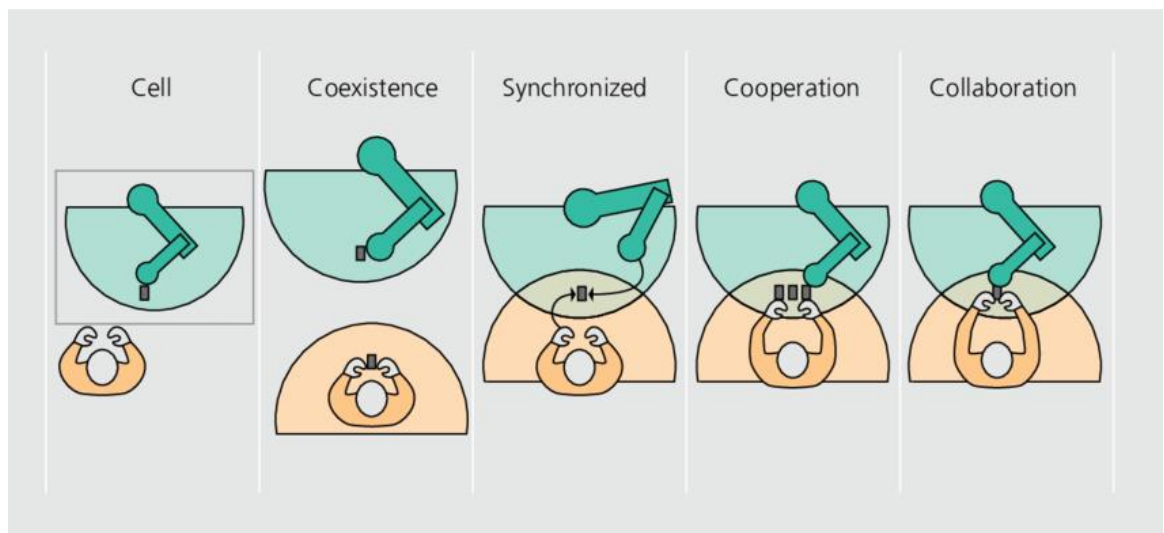


Рис. 1.4 – Ілюстрація видів взаємодії між людиною і КТР [11]

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 КТР



на виробництвах зростає набагато сильніше, ніж обсяги використання «класичних» ПР [13].

Колаборативні 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 ПР 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.

КРТ є вирішенням даних компромісів, так як мають людську гнучкість та когнітивні можливості, а також продуктивність, надійність та потужність роботизованих технологій. Тобто КРТ 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). КРТ 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 КРТ в різний час займались 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. Bohušík, 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.

### 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 КПР, на виробництві забезпечує автоматизацію неергономічних для працівників завдань, наприклад, допомагати людям переміщувати важкі об'єкти, або операції подачі деталей чи складання машини. Застосування КПР 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 КПР є електроніка, автомобільна індустрія та напівпровідникове мікропроцесорне виробництво (рис. 1.5).

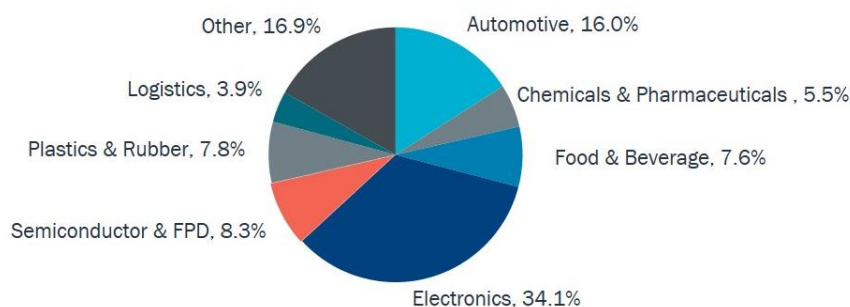


Рис. 1.5 – Розподіл застосування КПР за галузями [14]

Проведений аналіз доступних інформаційних джерел підтвердив вищевказану інформацію щодо використання КПР. Відомі роботи [15-19], які висвітлюють різноманітність застосування колаборативних технологій, а саме застосування КПР у різних галузях сучасного виробництва. Наприклад, робота [15] вказує на можливість використання КПР 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.

Робота [20] висвітлює проблемні питання, які виникають на етапі проектування автоматизованих гнучких ліній для складання виробів з

використанням КПП. Автори вказують на важливість встановлення правильного розподілу завдань між людиною та КПП для поєднання продуктивності роботів з гнучкістю людини. В даній роботі акцентується увага на спільній праці людини та КПП, а саме на проблемні питання, способи їх вирішення та перспективи в подальших розробках.

У статті [21] представлено огляд ролі людей і КПП 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 КПП. Виконано огляд окремих технологій, що застосовуються на "розумних заводах", та розглянуто майбутні перспективи розвитку даного напрямку.

Колаборація людини та КПП 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 КПП.

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 КПП на виробництві тощо.

Проведений вище стислий аналіз доступних інформаційних джерел вказує на найбільш поширені галузі сучасних автоматизованих виробництв, в

яких використовуються КРТ, 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 КРТ 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 проєкту; 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.

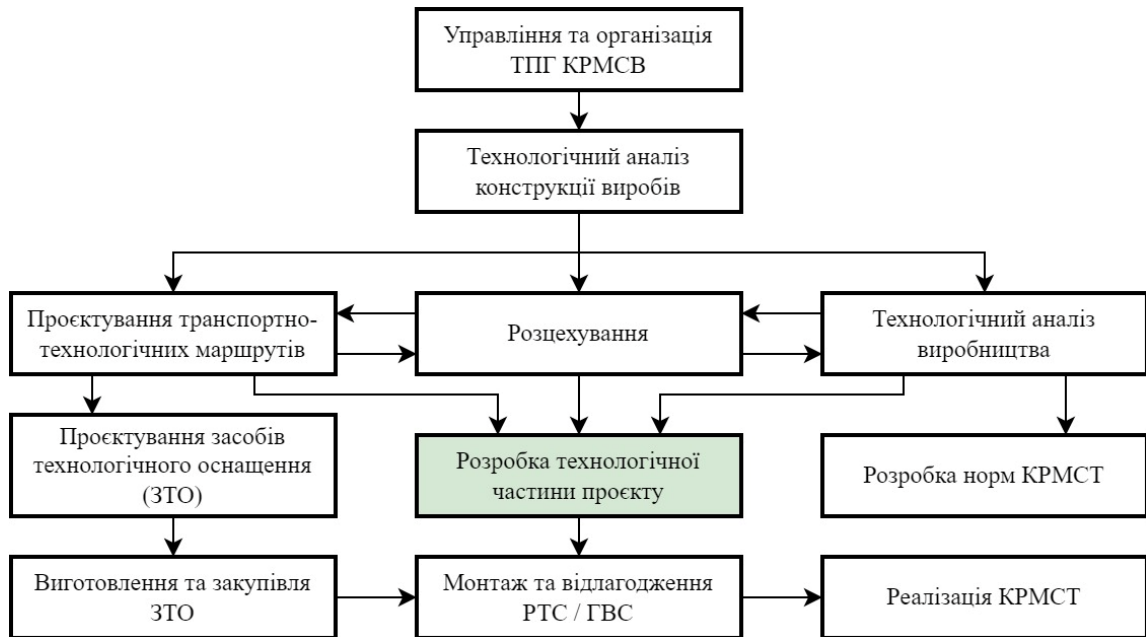


Рис. 1.6 – Спрощена схема основних етапів ТПг КРМСВ

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.

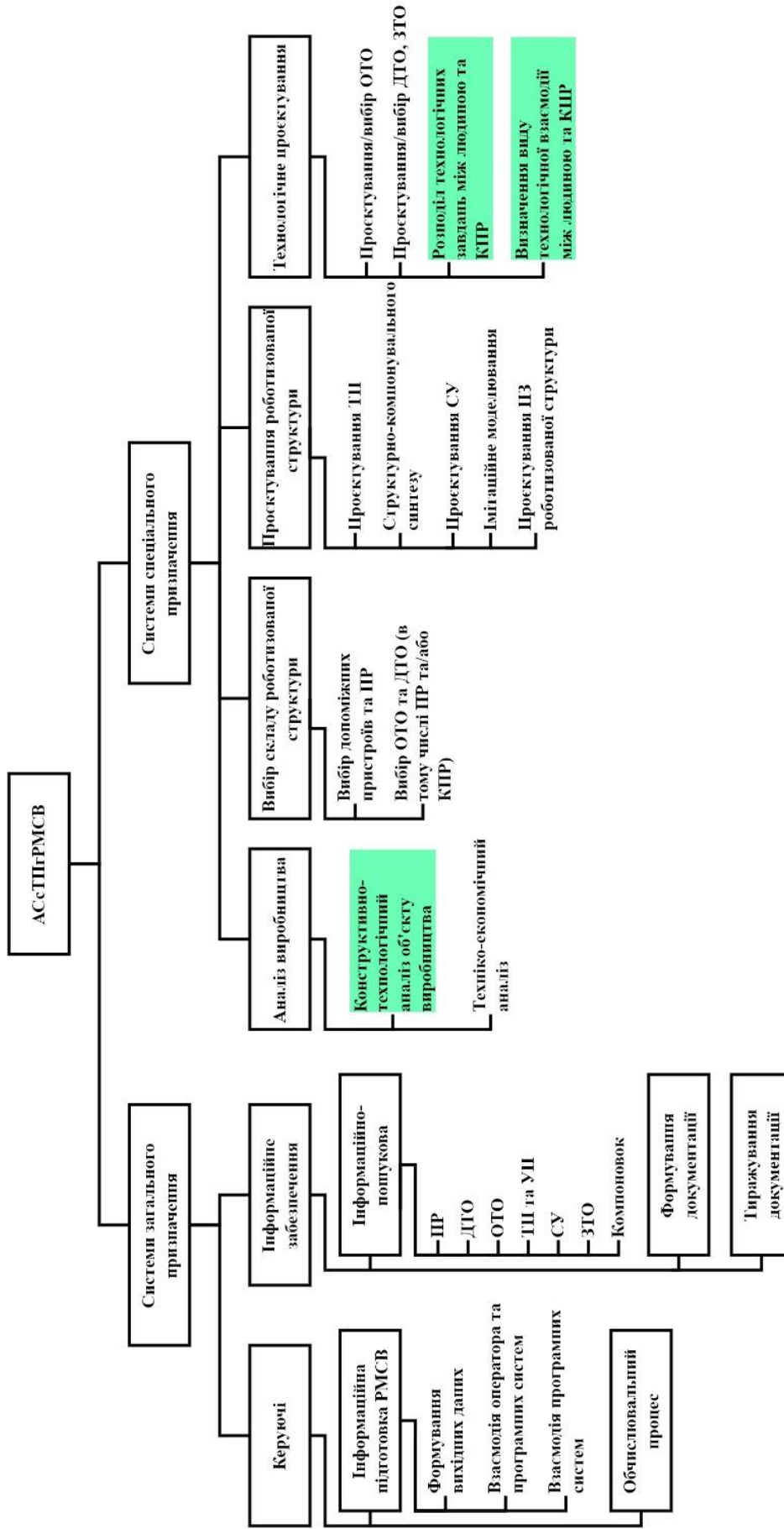


Рис. 1.7 – Структурна схема АССТІГРМСВ

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

В сучасних технічних інформаційних джерелах широко використовуються два фактично ідентичних терміни 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.

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 КПР, 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).



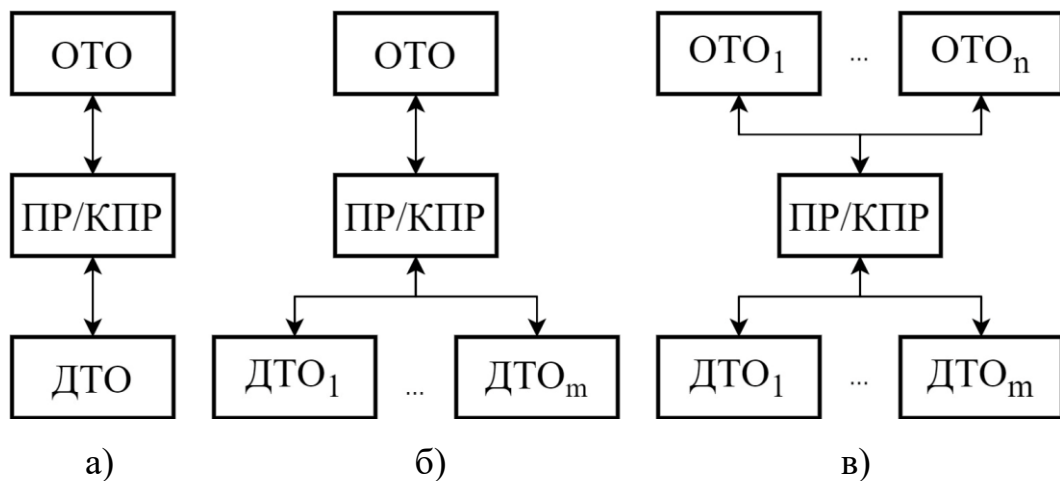


Рис. 1.8 – Приклади структур побудови ГВК

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 Н (human – людина) характеризуються фізичними здібностями та можливими алгоритмами реакції при взаємодії Н 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 Н, 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).

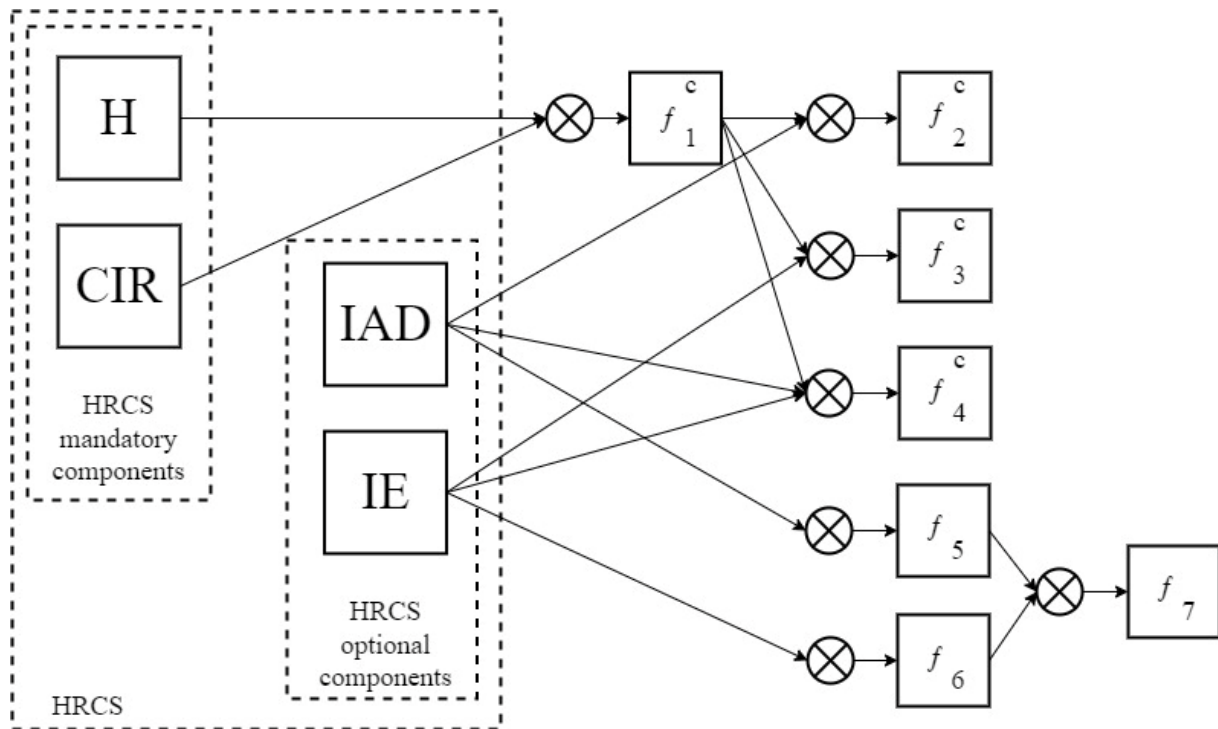


Рис. 1.9 – Структура та зв'язки графа, що ідентифікує HRCL

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 бієктивне відображення виділених обов'язкової та необов'язкової складових HRCS на множину параметрів, що змістовно мають місце при реалізації виділеної виконавсько-апаратно-управлінської складових 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 колаборації 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 швидкістю 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  $\alpha^c$  та  $\alpha$ . 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.

### **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 апріорі 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 затискних

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 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], АВВ [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 апріорі 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 напрямних 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 КІР на виробництві на 33% [51].

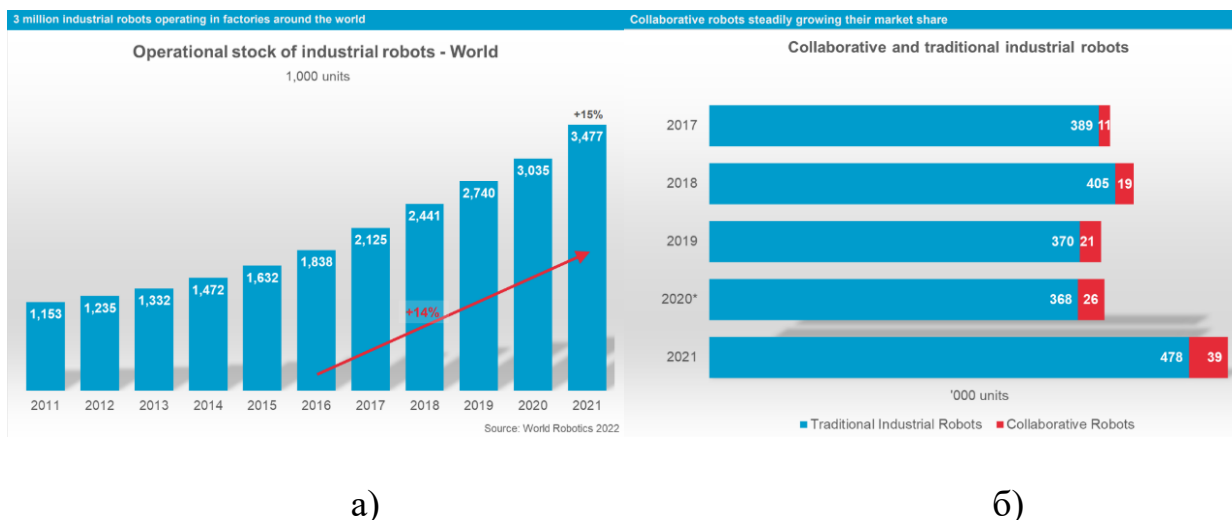


Рис. 1.10 – Інформація щодо росту застосування ПР та КІР: а) – світовий приріст виготовлення ПР;  
б) – світовий приріст використання ПР та КІР у порівнянні [51]

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

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 багатоміковому процесі розвитку науки, техніки та технологій, зменшувалась роль H, підвищувалась роль механізації та автоматизації до періоду 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;

А – 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 (А) має свої обмеження, зокрема, у гнучкості та можливостях переналагодження для виготовлення нових виробів тощо;

Р – промислова робототехніка дозволила вирішити технологічні проблеми, які були характерними для класичної автоматизації в різних типах виробництв, дозволяючи використання 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 А із (1.8), за рахунок використання CAD/CAM/CAE та CALS-технологій;

FM – гнучке виробництво, яке на різних рівнях його організації відоме такими технологічно-органіційними 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 Н, і КПР не мають загальної робочої зони і не контактують безпосередньо та одночасно з об’єктом виробництва;

- CooCR – Cooperative Collaborative Robotics, означає таку взаємодію Н та КПР, яка характеризується виготовленням продукції за однією технологією. Але при цьому і Н, 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 Н, 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 Н як невід'ємну складову КТС.

Тому парадигма процесу розвитку колаборативних технологій в частині участі людини Н 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 Н в (1.8)) – max-min (поступове зменшення участі людини в технологіях, змістовний символ М в (1.8)) – min (змістовні символи А, FM в (1.8), що вказують на неактивну участь Н 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.

### **1.3. Висновки до розділу 1**

Виконано аналіз доступних інформаційних джерел щодо сучасного стану розвитку колаборативних роботизованих технологій при технологічній підготовці роботизованих виробництв, а саме:

- визначено її зміст, структуру та місце в промислових технологічних задачах та їх застосування;

- вказані галузі застосування КРТ, серед яких найбільшу частку займають автомобільна галузь, електроніка та мікропроцесорна техніка. Основні операції, які виконують КТР, технологічно взаємодіючи з людиною, це переміщення, утримування об'єктів, їх складання та зварювання;

- визначено місце КРТ в ТПг роботизованих виробництв;

Узагальнюючи вищевказане, можна констатувати, що колаборативна промислова робототехніка є логічним продовженням, або еволюцією «класичної» промислової робототехіки. Завдяки своїм технологічним та функціональним особливостям колаборативна промислова робототехніка застосовується в тих технологічних процесах, де «класична» робототехніка в силу ряду причин не може бути застосована, або не є ефективною. Тобто це ТП, де присутня спільна технологічна взаємодія людини та КТР.

На сьогодні не існує загальноприйнятих методів та підходів щодо однозначного трактування ряду проблемних питань при ТПг КРМСВ, наприклад, щодо розподілу завдань між людиною та роботом. Вказане є змістовною та необхідною складовою ТПг КРМСВ.

На підставі змісту розділу 1 визначено мету та завдання даних досліджень, що представлені на С. 19.

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

Графічна інтерпретація запропонованого 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.

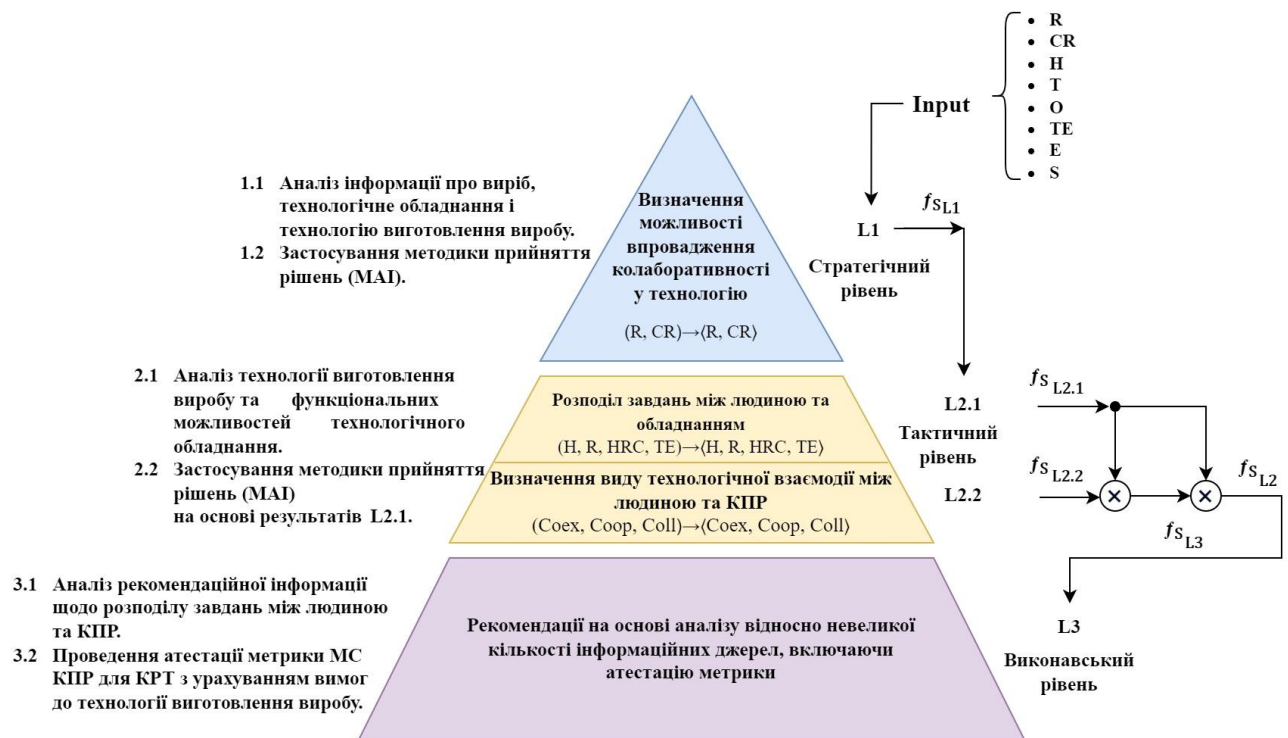


Рис. 2.1 – Спрощена схема запропонованого системного підходу при аванпроектванні КРТ



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 – ПР, CR – КПР, 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» ПР (R), або КПР (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 КПР 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), КПР (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 КПР 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 ПР, яка досліджується оригінальним підходом атестації метрики маніпуляційних систем ПР [24], що може бути використана і для КПР. При цьому визначаються робочі зони ПР із збереженням орієнтації в просторі затискного пристрою з/без об’єкта маніпулювання за допомогою атестації метрики маніпуляційної системи ПР.

Отримана таким чином інформація дозволяє розробити рекомендації щодо застосування КПП разом з людиною в КРТ на виконавському рівні L3.

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:

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

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), КПП (CR), людину (H), об’єкт (O), технологічне обладнання (TE), технологію виготовлення продукції (T), множину експертів (E) та множину локальних критеріїв прийняття рішень (S):

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

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 – КПП 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  $|E|=1$ , 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  $|E| > 1$ , 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 МАІ та НБВА. При цьому передбачено використання інформації або від одного експерта  $|E|=1$ , або від їх кінцевої множини  $|E| > 1$ .

Формалізований вигляд вище вказаного виражається наступною залежністю:

$$f_{S_{L1}}: \left( \langle R \times CR \rangle \times (E_i | i = \overline{1, n_E}) \times (S_{L1} | i = \overline{1, n_{S_{L1}}}) \right) \rightarrow \nabla$$

$$\begin{array}{c} \text{АНР} \\ \downarrow \\ \nabla \left[ \begin{array}{l} |E| > 1 \\ |E| = 1 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \left( \langle R_i, CR_i \rangle | i = \overline{1, n_E} \right) \xrightarrow{\text{FMCSA } \forall i = \overline{1, n_E}} \langle R, CR \rangle_{|E| > 1} \\ \langle R, CR \rangle_{|E|=1} \end{array} \right. \rightarrow \langle R, CR \rangle \end{array} \quad (2.3)$$

$$\begin{array}{c} \text{АНР} \\ \uparrow \end{array}$$

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 – англomовне визначення МАІ;  $\rightarrow$  – символ наступного слідкування;  $\langle \rangle$  – позначення узгоджуваної множини;  $\times$  – символ Декартового добутку.

Після визначення пріоритету  $CR$  на стратегічному рівні  $L1$  наступним кроком реалізації пропонованого 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:

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

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 прийняття 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 кількість експертів  $|E| > 1$  та друга, де кількість  $|E|=1$ .

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

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 прийняття рішень  $f_{S_{L2.1}}$ . Результатами вищевказаної обробки отриманих результатів є впорядкована множина видів технологічної взаємодії, тобто видів колаборації,  $\langle \text{Coex}, \text{Coop}, \text{Coll} \rangle$  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  $\langle \text{Coex}, \text{Coop}, \text{Coll} \rangle$  є кінцевими. Тобто визначається нечітка оцінка між видами колаборації з наданням пріоритетів одному з них, що може бути представлено нижче наведеним кортежем (2.6):

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

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) КПП висвітлено нижче наведеним виразом (2.7):

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

Процес атестації метрики, що представлений виразом (2.7), визначається наступними параметрами:  $l_i$  – це позначення кожної  $i$ -ої ланки МС КПП, тому відповідно  $n_l$  – це загальна кількість ланок МС КПП;  $q_j$  – це символ узагальненої координати (УК), тому відповідно  $n_j$  – 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  $(f_{L3k} \mid k = \overline{1, n_{L3}})$  загальною кількістю  $n_{L3}$ , що перетворює параметри метрики МС ПР множини ланок  $(l_i \mid i = \overline{1, n_l})$  загальною кількістю  $n_l$ , множини узагальнених координат  $(q_j \mid j = \overline{1, n_j})$  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  $V \hat{=} H$ .

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 (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 КПП 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 КПП див. далі.

Системність та комплексність пропонованого трирівневого 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 трирівневому 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 трирівневий 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 визначати можливість впровадження КРТ у виробництво, визначати розподіл завдань між людиною, обладнанням, КПП або взаємодію людини та КПП та визначати вид технологічної взаємодії між людиною та КПП. В даному варіанті прийняття технологічних рішень базується на експертних оцінках при застосуванні МАІ, що дає нечітку оцінку в комплексних питаннях, на які на разі одностайних рішень та відповідей не існує



не тільки у дослідників з України, але й у дослідників всього світу.

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

### **2.1.2. SADT-представлення загальної схеми 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 ТПГ 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 проєктування 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. Проєктування – 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 подробности 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.

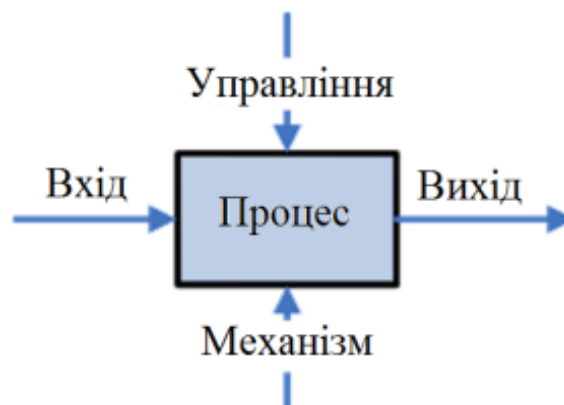


Рис. 2.2 – Елементарний функціональний блок SADT та інтерфейсні дуги, що формують його системність [55]

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.

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 пропонуваним 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 пропонуваного 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  $A2_{L1}$ , для підрівнів тактичного рівня L2.1 та L2.2 – відповідно блоками  $A3_{L2.1}$  та  $A3_{L2.2}$ , а виконавський рівень L3 – блоком  $A4_{L3}$  (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 САD-системи, наприклад, Solidworks.

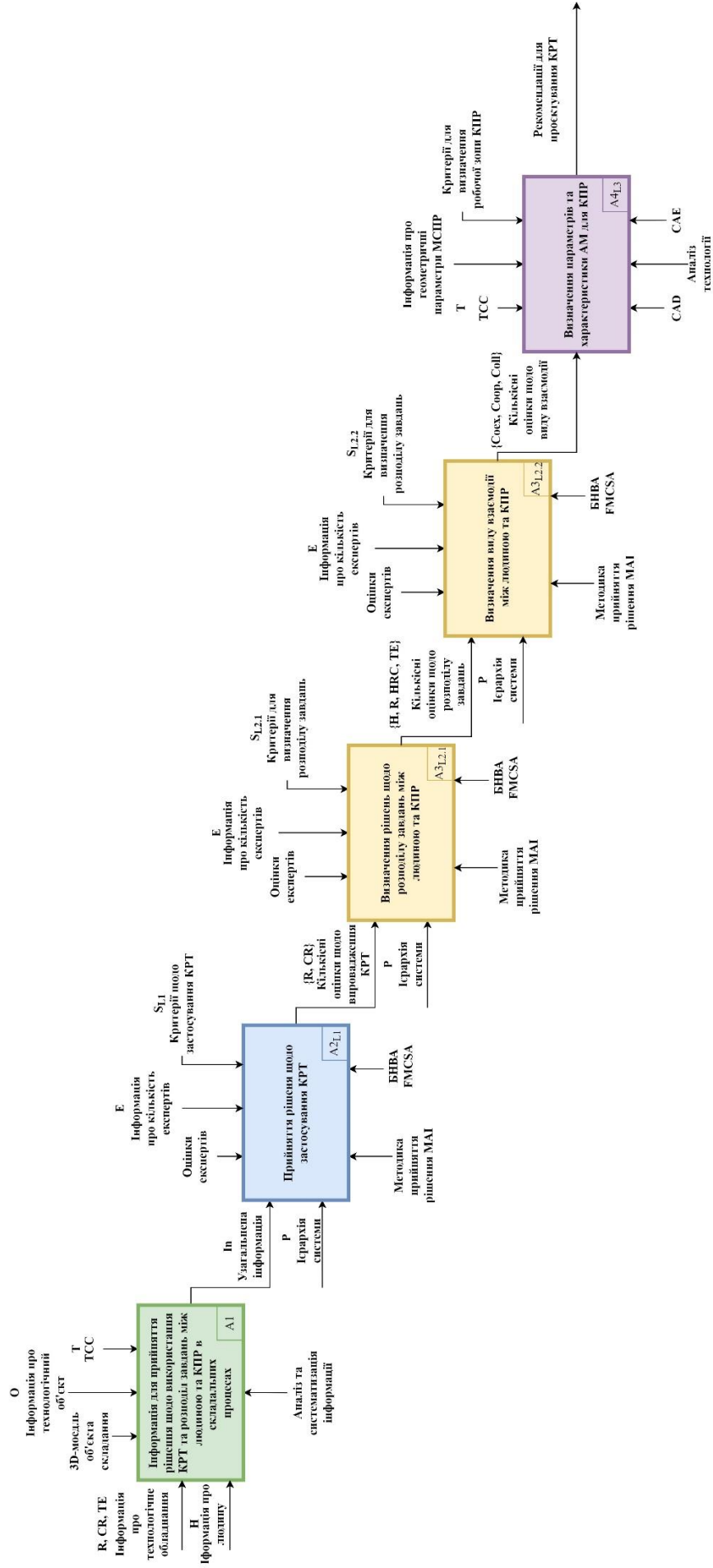


Рис. 2.3 – SADT-представлення сутності пропонованого тривіневого представлення аванпроектування КРТ

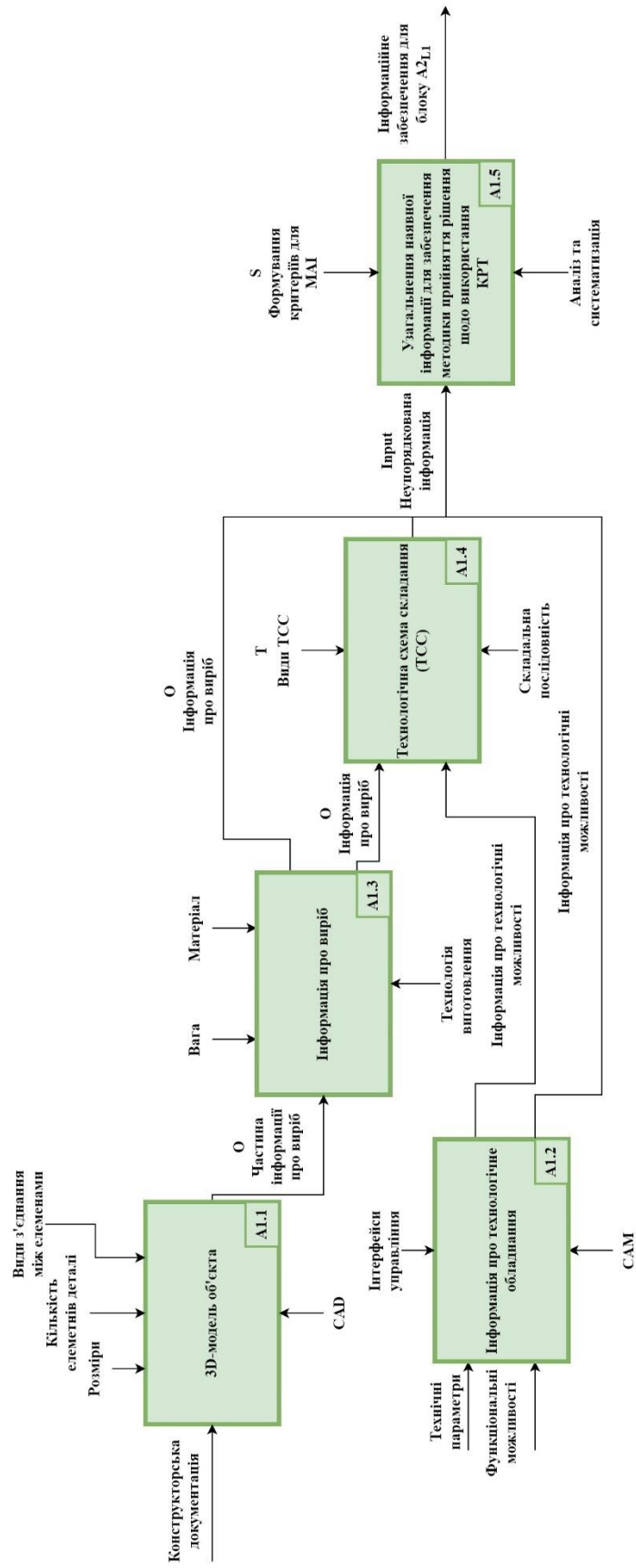


Рис. 2.4 – SADT-діаграма змісту блоку AI

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 A2<sub>L1</sub>.

Для детального опису процесів та потоків даних в блоці A2<sub>L1</sub> (рис. 2.3), який відображає стратегічний рівень L1, розроблено SADT-діаграма змісту блоку A2<sub>L1</sub> (рис. 2.5).

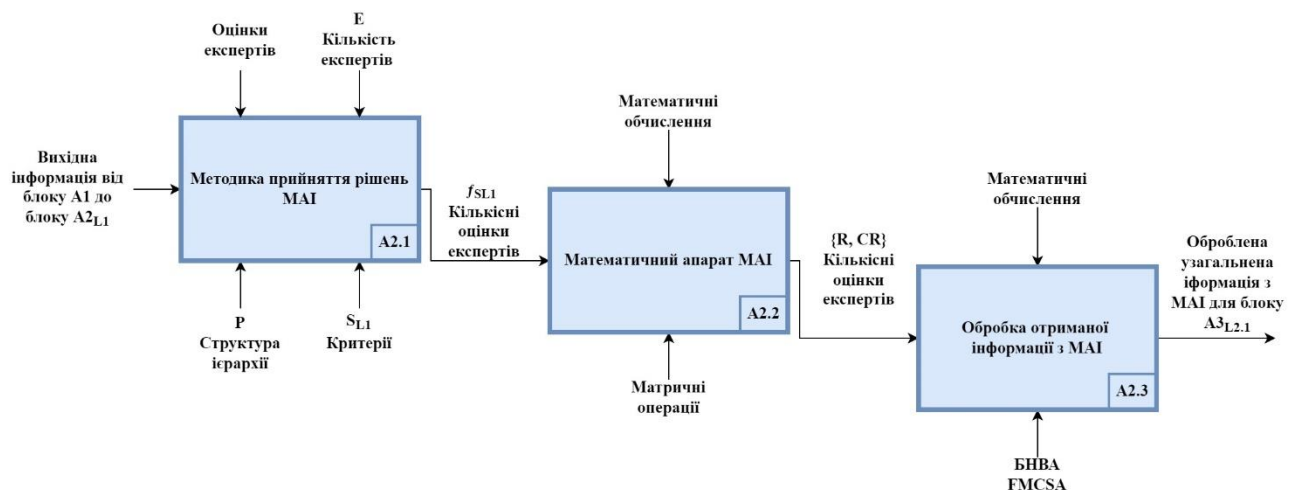


Рис. 2.5 – SADT-діаграма змісту блоку A2<sub>L1</sub>

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 ( $S_{L1}$ ) 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  $f_{S_{L1}}$  (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  $A3_{L2.1}$ ) та рис. 2.7 (SADT-діаграма змісту блоку  $A3_{L2.2}$ ). Послідовність дій роботи з інформацією в блоках  $A3_{L2.1}$  та  $A3_{L2.2}$  ідентична діям в попередньому блоці  $A2_{L1}$ , 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  $A2_{L1}$ , методи обробки та роботи з вхідною інформацією ідентичні вищевказаним в блоці A2.1 (рис. 2.5), проте вихідна інформація



сформована функцією  $f_{S_{L2.1}}$ , що є частиною вихідної інформації тактичного рівня L2, що загалом відтворюється функцією  $f_{S_{L2}}$ .

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  $\langle N, R, HRC, TE \rangle$ , 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, КПР та технологічного обладнання.

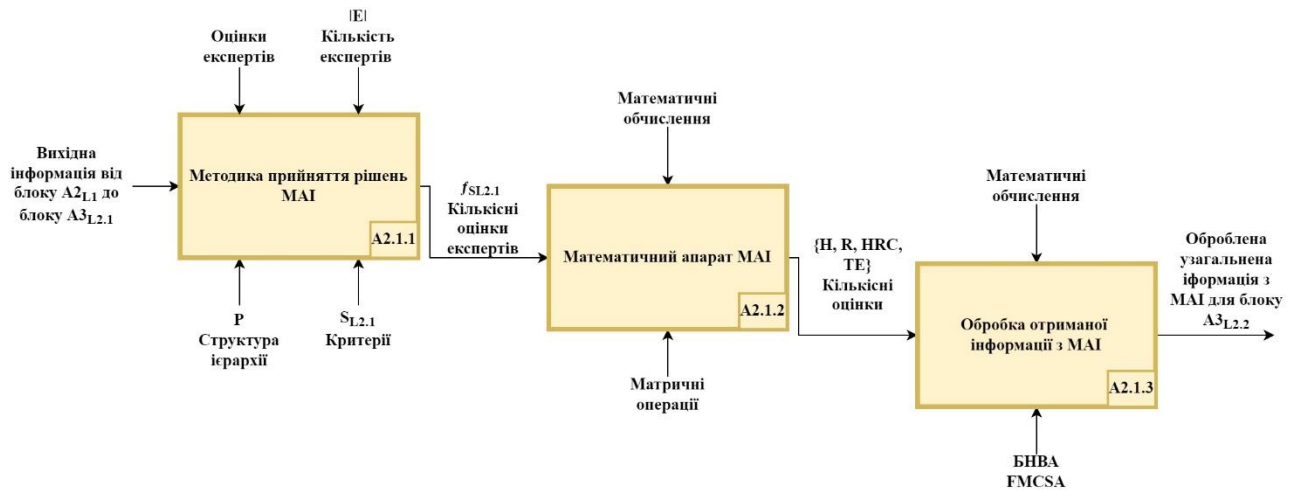


Рис. 2.6 – SADT-діаграма змісту блоку A3L2.1

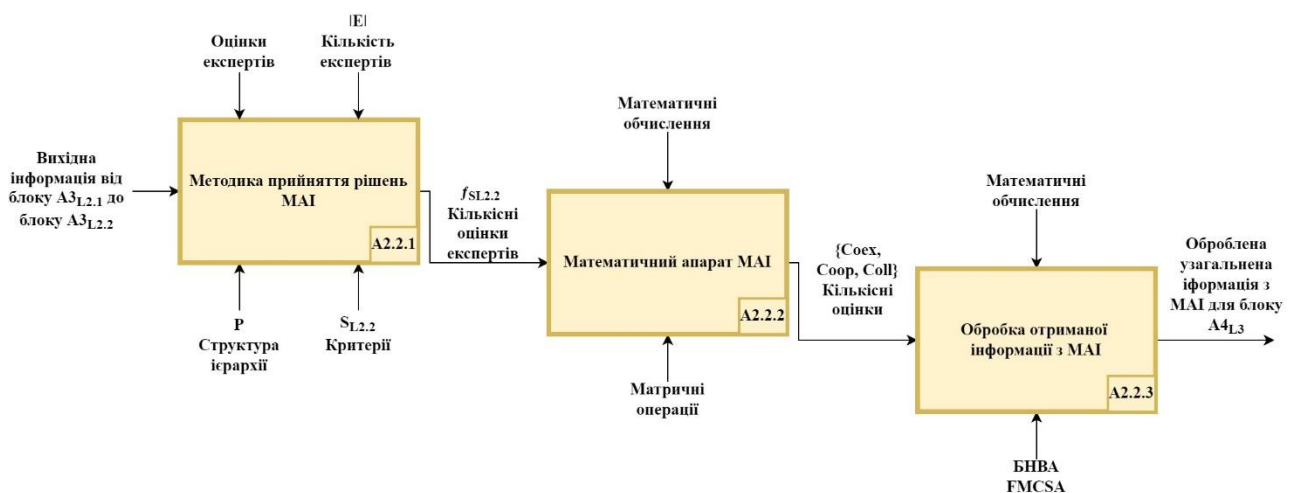


Рис. 2.7 – SADT-діаграма змісту блоку A3L2.2

Блок  $A3_{L2.2}$ , SADT-діаграма якого зображена на рис. 2.7, відтворює вище вказану послідовність обчислень блоку  $A3_{L2.1}$  з відмітністю у вхідній і вихідній інформації. Вхідною інформацією блоку  $A3_{L2.2}$  є вихідна інформація блоку  $A3_{L2.1}$ , а вихідною інформацією є оброблена узагальнена інформація кількісних оцінок експертів щодо виду взаємодії між людиною та КІПР {Сох, Соор, Соll}, 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 пропонуваного трирівневого 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 (див. додаток Б), 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 (див. додаток Б). 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 (див. додаток Б, табл. ДБ.1). 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 попарного порівняння, то будується множина матриць попарних 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 попарних 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 (див. додаток Б).

### *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  $A$ ;

$$W = \begin{pmatrix} w_1 \\ \ddots \\ w_l \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix} - \text{головний власний вектор матриці } A. \quad (2.11)$$

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 аванпроектуванні 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).

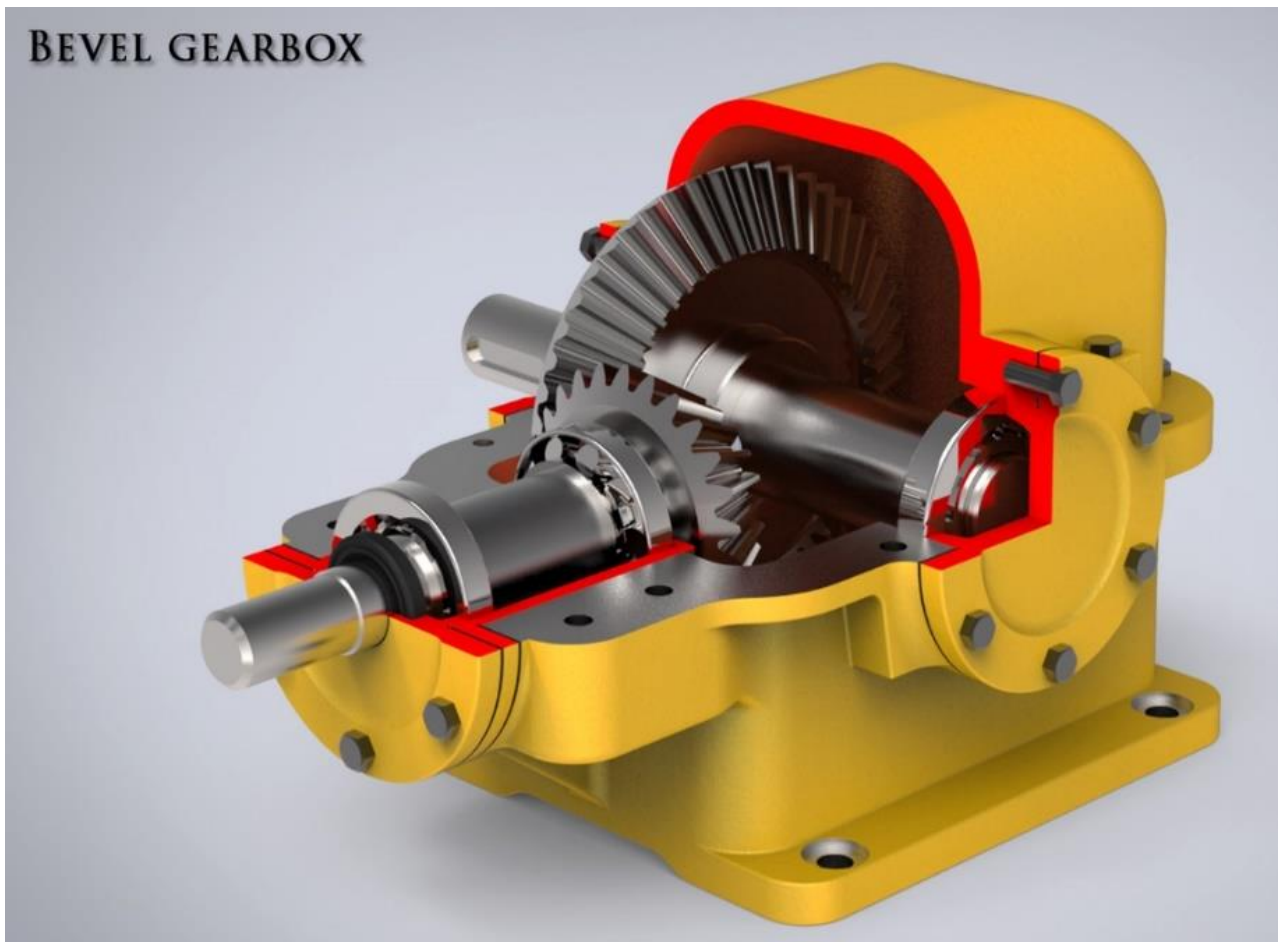


Рис. 2.8 – Редуктор одноступінчастий конічний, загальний вигляд [59]

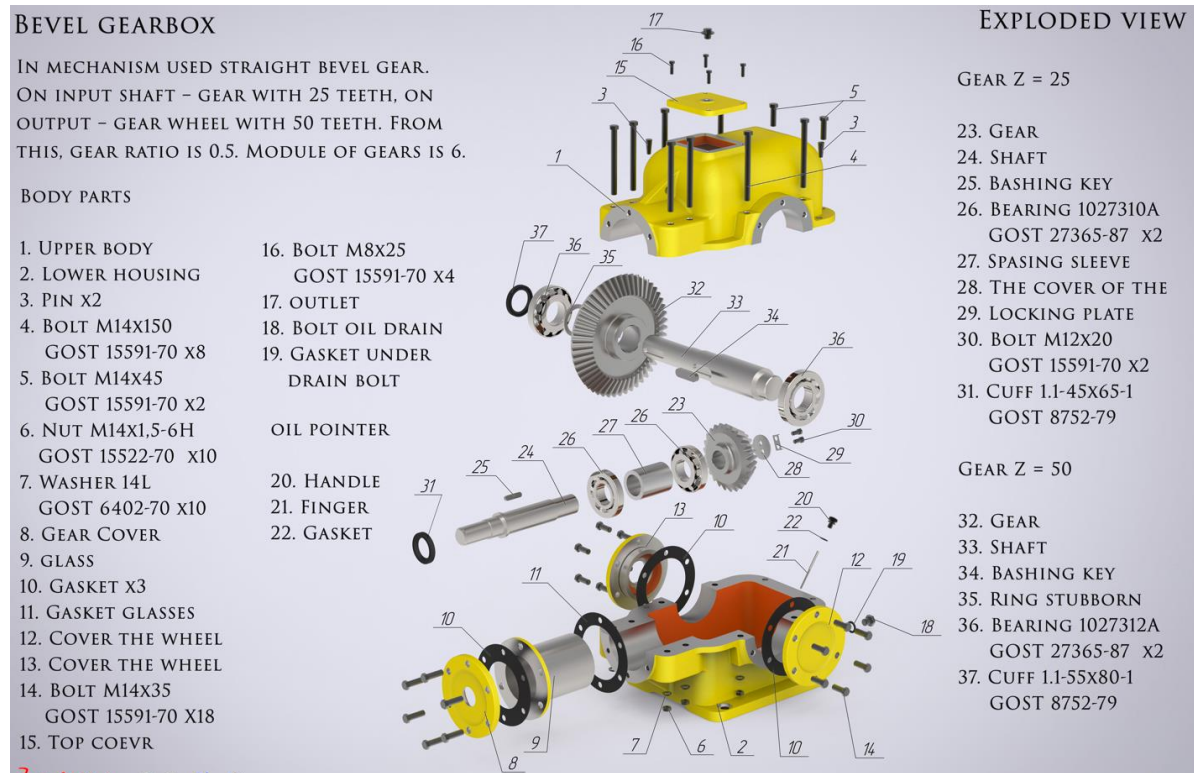


Рис. 2.9 – Редуктор одноступінчастий конічний, подетальна декомпозиція [59]

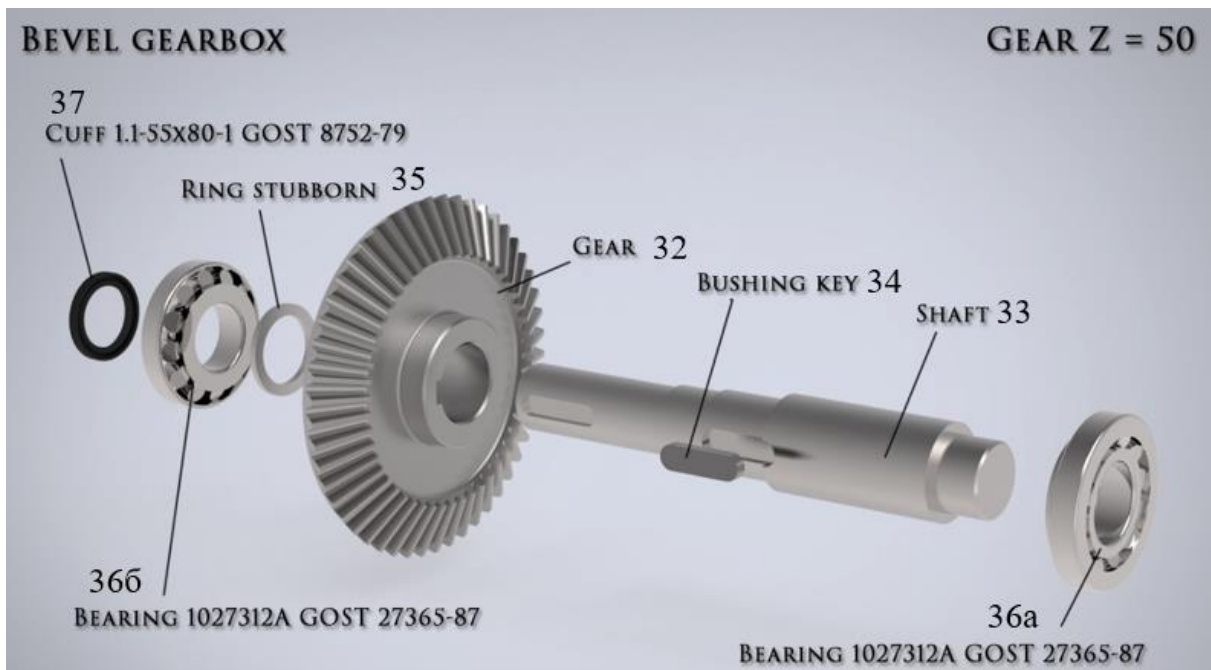


Рис. 2.10 – Вал ведучий редуктора конічного одноступінчастого [59]

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 тривірневого 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.

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 36б 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.

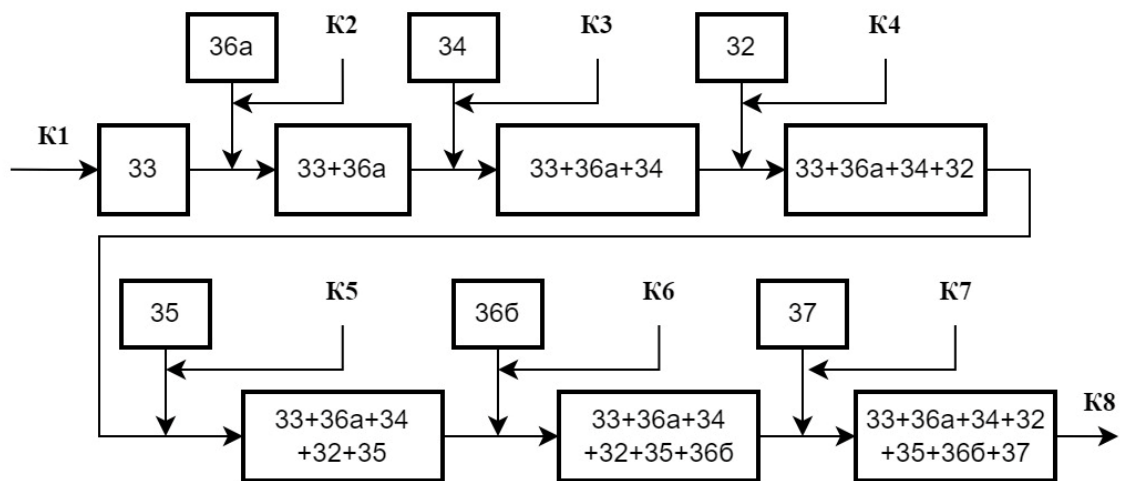


Рис. 2.11 – ТСС подетально-вузлового складання валу ведучого редуктора  
одноступінчастого конічного

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.

Відповідно до вищеописаного трирівневого 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  $S1_{L1} - S4_{L1}$  є безпека, продуктивність, гнучкість налаштування та простота використання. Вище вказані критерії є найпоширенішими атрибутами автоматизованих, роботизованих та колаборативних виробництв. Альтернативами є  $CR_{L1}$  та  $R_{L1}$ , тобто застосування КРТ або «класичних» роботизованих та/або автоматизованих технологій.



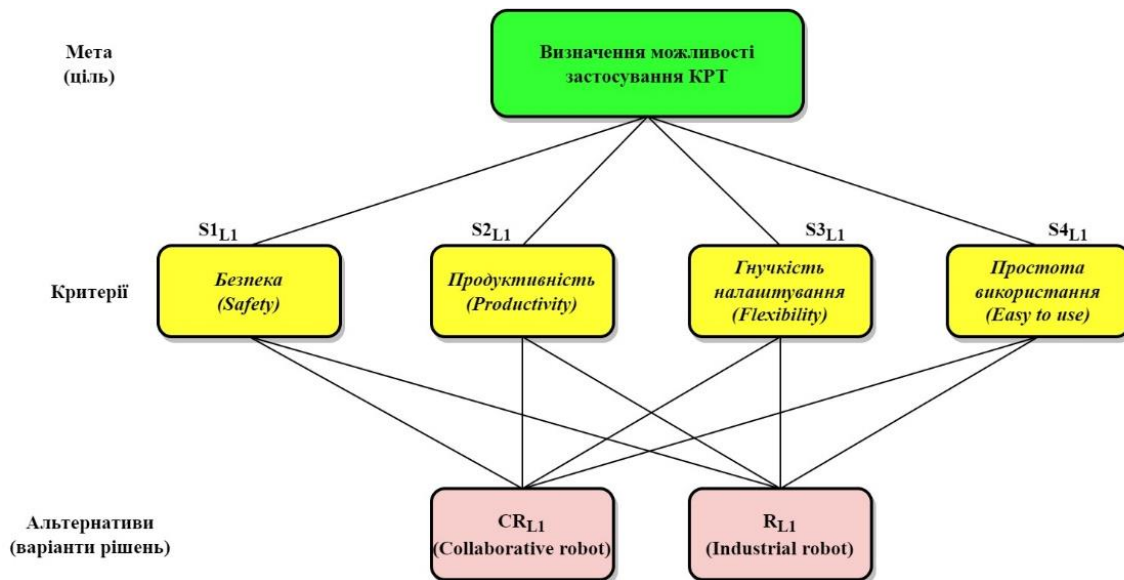


Рис. 2.12 – Схема ієрархії при використанні МАІ для складання валу ведучого редуктора одноступінчастого конічного, рівень  $L1$

Методика визначення альтернатив, тобто варіантів визначення критеріїв між  $CR_{L1}$  та  $R_{L1}$ , 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  $R_{L1}$ , після чого виконується визначення альтернатив. Кінцевим результатом використання МАІ є кількісна оцінка щодо альтернатив  $CR_{L1}$  та  $R_{L1}$  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.

### 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 6-му кроці в результаті отримуються як неупорядковані нечіткі оцінки, а результатом 7-го кроку є упорядкована множина нечітких оцінок.

Не розкриваючи всіх особливостей обчислювальних процедур в даному ПП, методика використання НБВА з його використанням 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. Методика атестації метрики маніпуляційних систем колаборативних промислових робіт**

### **2.4.1. Загальні положення**

Методика проведення атестації метрики МС КПР відповідає формалізованому представленню, яке висвітлене вище виразом (2.7) та

алгоритмічному представленні, 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 або ПР з даними про їх технічні параметри та функціональні можливості. Підготовка 3D-моделі виконується в одному програмному середовищі, наприклад, САD-програми, наприклад SolidWorks, а інформація про параметри вводиться в іншому програмному продукті, наприклад, RoboDK.

Стисло зміст пропонованої 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).

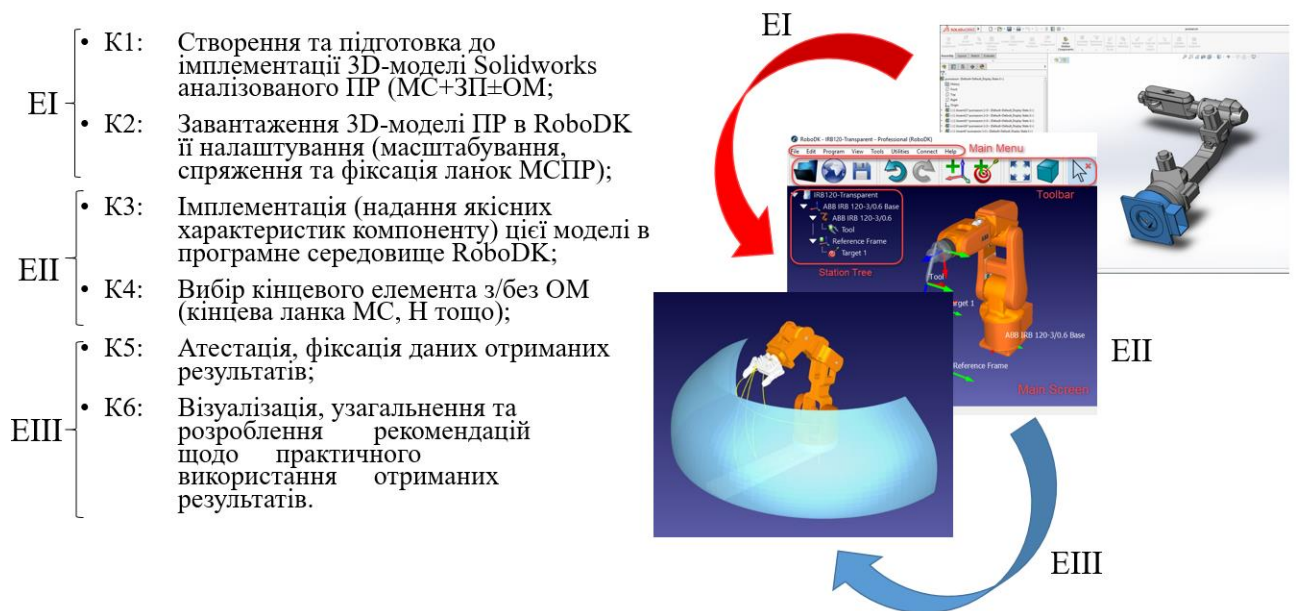


Рис. 2.13 – Спрощена схема розробленої методики автоматизованої атестації метрики МС ПР

### **2.4.2. Опис процедури атестації метрики маніпуляційних систем колаборативних промислових роботів**

Перший етап ЕІ (кроки К1 та К2 на рис. 2.13) передбачає створення 3D-моделі ПР або КПР в САD-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 функціональної 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 КПР або ПР якісно та кількісно залежні від виду конвертації та налаштування збереження деталізації 3D-моделі при конвертації. Вищевказані функціональні можливості є необхідною вимогою до САD-програм для повної реалізації (К1).

Змістом кроку К2 є почергове завантаження 3D-моделей компонентів складових аналізованого КПР або 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 КПР та виконується їх взаємне розміщення. Компоненти МС КПР мають бути розміщені один відносно одного за правилами, які визначають рухомі та фіксовані ланки або компоненти МС КПР. При завершенні налаштування розміщення та фіксації ланок та компонентів МС КПР необхідно їх перевірити за допомогою консолі керування мехатронною системою (див. рис. 2.14).

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

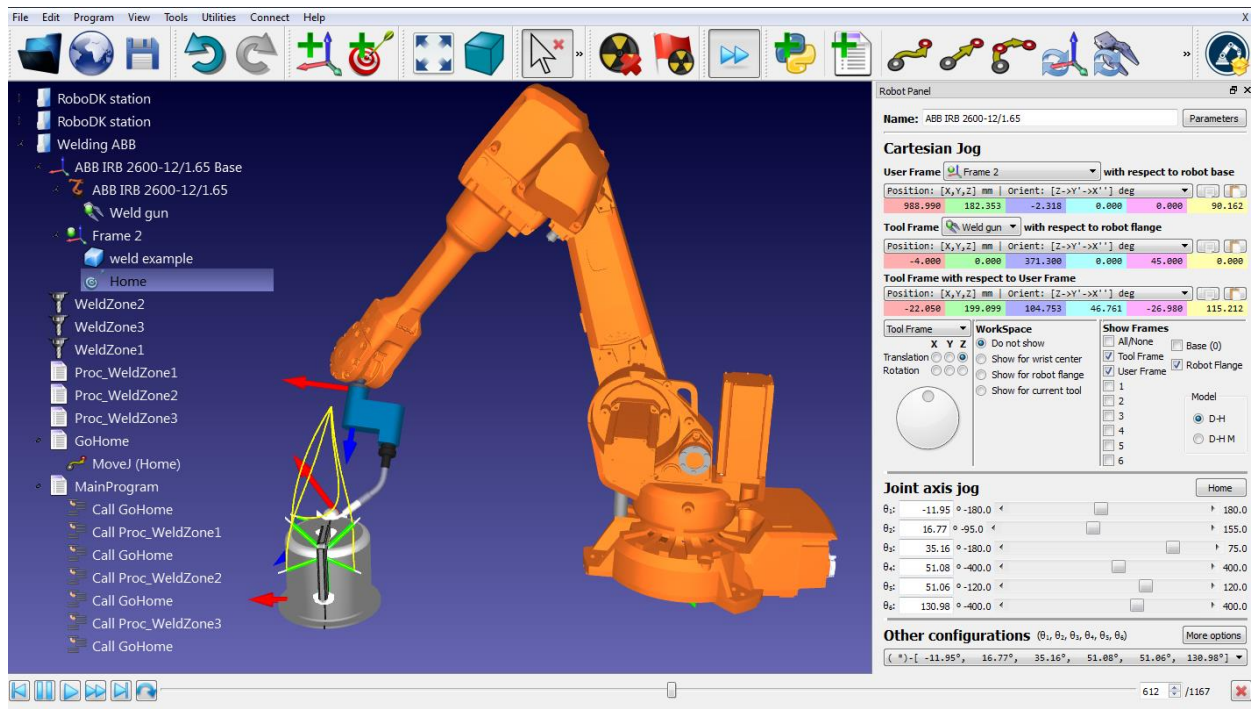


Рис. 2.14 – Графічний інтерфейс програмного продукту RoboDK [50]

На другому етапі виконується вибір СК КІР 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 САД-програмі SolidWorks, а продовження відбувається в програмному продукті RoboDK. На рис. 2.15 висвітлено створення 3D-моделі компонента ланки робота Врассіо в SolidWorks на К1, далі процес інтеграції та налаштування МС робота (кроки К2-К3) та вибір кінцевого елемента, а саме ЗП і його налаштування.

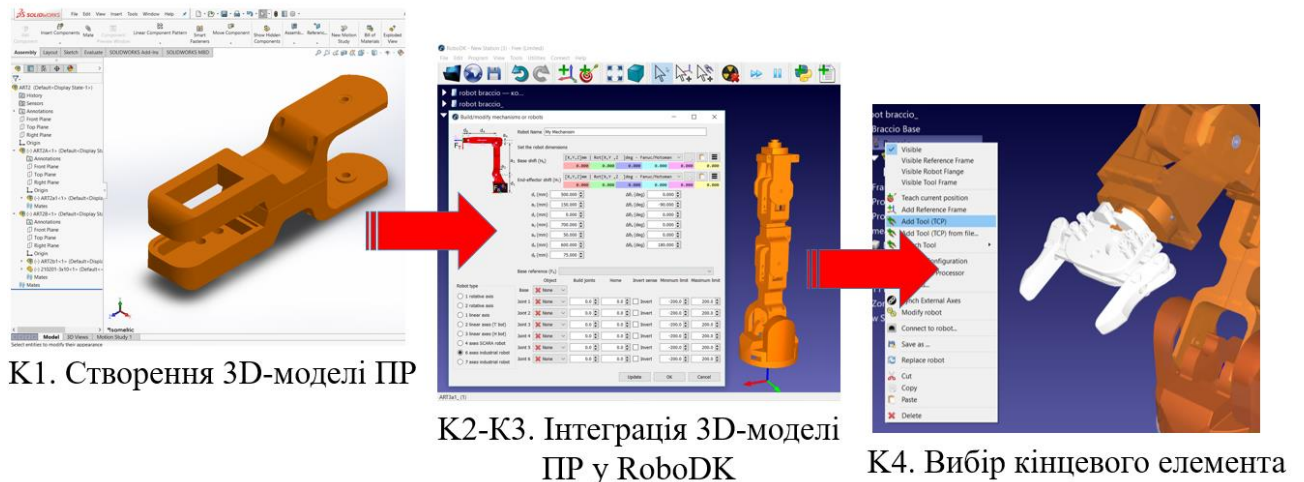


Рис. 2.15 – Покрокова методика атестації МС КПП Е1 та Е2 (К1-К4)

Виконання кроку К4 на Е2 передбачає комплексну операцію, яка передбачає вибір виду ЗП КПП 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 (див. рис. 2.16).

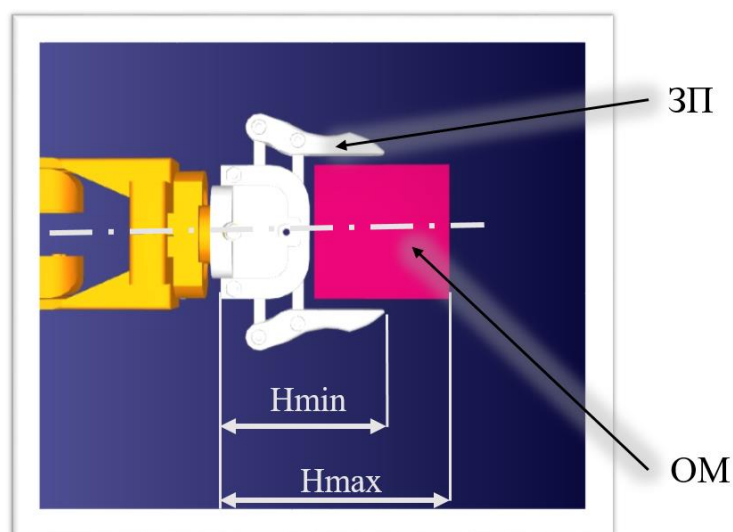


Рис. 2.16 – Конструктивні параметри  $H_{\max}$  та  $H_{\min}$  (приклад)

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 як 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 (п. 4.3).

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

## **2.5. Висновки за розділом 2**

1. Розроблено методичне забезпечення системи визначення рівня колаборації у технологічній роботизованій системі людина-робот у вигляді трирівневого підходу, який складається із стратегічного рівня L1, тактичного рівня L2 і виконавського рівня L3. Пропонований трирівневий підхід описано за допомогою формалізованого представлення та SADT-діаграмами, які структуровано відтворюють трирівневий підхід та інформаційні зв'язки між компонентами. Розроблене методичне забезпечення дозволяє його алгоритмічну реалізацію. Представлено методику прийняття технологічних рішень, а саме проведення експертного опитування МАІ при виконанні (реалізації) трирівневого підходу. Розроблені та представлені схеми ієрархій для реалізації МАІ на стратегічному рівні L1 та тактичному рівні L2. Методичне забезпечення за вхідними рівнями та функції, які при цьому виконуються, є основою для

формування інформаційного забезпечення, без якого не можлива програмна реалізація запропонованого трирівневого підходу.

2. Розроблено методику атестації метрики як одну із можливих складових виконавського рівня L3. Пропонована методика передбачає покрокове виконання комплексних операцій з 3D-моделями КПП та ОМ у спеціалізованих програмних продуктах, а саме підготовка і налаштування 3D-моделі та віртуального середовища (робочого простору), багаторазове розв'язку зворотної задачі кінематики, збереження та візуалізація отримуваних результатів дослідження. Вказане необхідним для подальшої алгоритмічно-програмної реалізації запропонованого трирівневого підходу при аванпроектівані КРТ.



## **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 в розділі 2.



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

Постійна інформація  $I_{\text{const}}$  (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.  $I_{\text{const}}$  – це інформація, що змістовно є методичними розробками. Наприклад, методика використання МАІ, яка забезпечує прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні 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  $I_{\text{var}}$  (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 трирівневого 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 ( $I_{\text{c.const}}$ ) змістовно є інформацією щодо елементів (складових)  $I_{\text{var}}$  та  $I_{\text{const}}$ .  $I_{\text{c.const}}$  може бути подана двома складовими:

–  $I_{\text{cf.const}}$  – 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  $I_{\text{cf.const}}$  віднесена методика реалізації НБВА, яка має незмінний математичний інструмент обробки вхідних даних, і в залежності від вхідних даних видає різний результат;

–  $I_{\text{cr.const}}$  – це інформація, що є результатом переопрацювання частини інформації  $I_{\text{c.const}}$  і є різницею множин ( $I_{\text{c.const}} \setminus I_{\text{cf.const}}$ ). Це, наприклад, величини

технологічних переміщень рухомих ланок МС КІР (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 ІР, їх паспортах, іншій технічній документації, а також як результат розв'язування певних проміжних задач.

### **3.2. Методичне забезпечення як постійна складова інформаційного базису пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ**

Постійною інформацією (див. рис. 3.1) є методичне забезпечення пропонованого підходу ТІГ КРМСВ. До її складу віднесені методики роботи з МАІ, НБВА та процедури атестації метрики маніпуляційної системи аналізованих КІР. 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 ТІГ КРМСВ. Проте реалізація вище вказаного можлива лише за умови виконання пропонованих методик.

Постійність та незмінність методик МАІ, НБВА та атестації метрики МС КІР 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 ІР та КІР, що дає змогу констатувати факт працездатності підходу.

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

Змінною інформацією  $I_{var}$  (див. рис. 3.1) є інформація, яка використовується при виконанні МАІ. Дана інформація описує основні елементи проектованої КРТ та виступає в ролі критеріїв оцінювання в МАІ, а саме R – ПР, CR – КПР, Н – людина, О – інформація про об'єкт виготовлення, ТЕ – технологічне обладнання, Т – технологію виготовлення продукції, Е – 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 КПР або ПР, тобто дані про можливості керування КПР або ПР, підтримувані мови

програмування, можливість підключення до інших програмних продуктів та загальну підтримку API тощо.

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

О – 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 КІР 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 КПР**

Інформаційне забезпечення атестації метрики включає в себе інформацію про МС аналізованого КПР 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 КПР 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 КПР 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/КПР 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 КПР 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 [61] 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 вагому цінність:

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

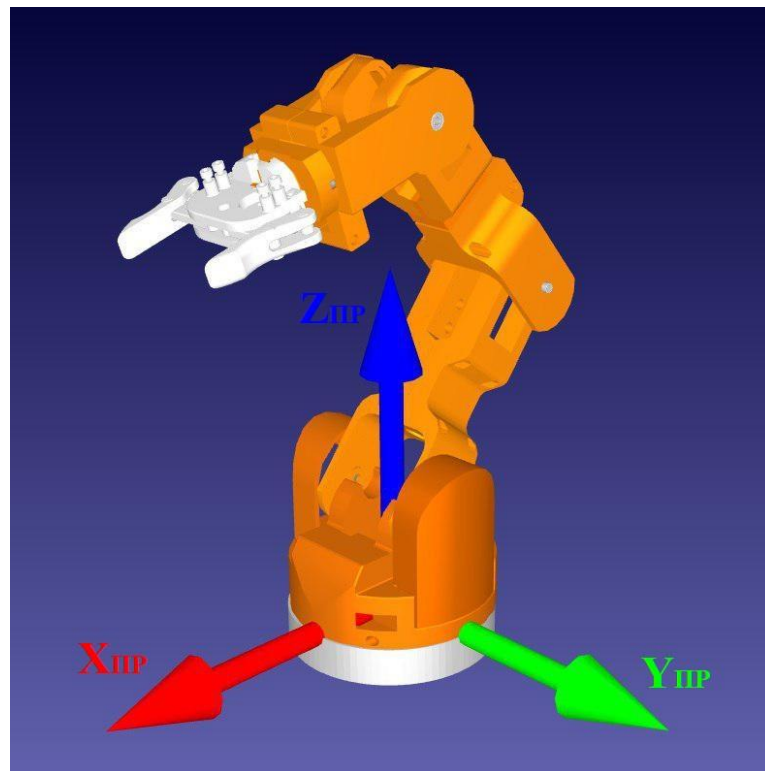


Рис. 3.2 – Система координат робота TinkerKit Braccio

Атестація метрики має місце при проєктуванні КРТ на етапі ТПг РМСВ та КРМСВ, а саме в частині визначення інформації про координати точок робочої



зони КНР, в яких забезпечується задана орієнтація ЗП КНР. Вищевказане фрагментарно відтворює реалізацію виконавського рівня L3.

### 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 використанням КНР.

Таблиця 3.1

#### Рекомендації з доступних інформаційних джерел для початкового проектування КРТ

№	Інформаційне джерело	Сфера застосування	Короткий опис, рекомендації
1	A case study in human-robot collaboration in the disassembly of press-fitted components [62]	1. Складання в автомобільній галузі; 2. Складання в електроніці приладобудування	Напрацювання можуть бути використані в складальних процесах та/або в процесах розбирання виробу. Особливості застосування КНР 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 КНР 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 КНР в даному випадку полягає у реалізації ергономічного складання автомобільних гальмівних дисків у колаборації КНР 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 КНР 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 КНР полягає у дослідженнях впливу впровадження колаборативного робота на виробничій автоматизованій лінії заводу по виготовленні авто та їх деталей.

## Закінчення табл. 3.1

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 електроніки приладобудування	Напрацювання можуть бути використані в складальних 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.
10	Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution [71]	Складання електроніки приладобудування	Напрацювання можуть бути використані в складальних процесах, та/або в процесах розбирання виробу. Особливості застосування КПП 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.

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

### 3.6. Висновки за розділом 3

1. На основі розробленого методичного забезпечення реалізації пропонуваного трирівневого підходу щодо аванпроекування КРМСТ вказаного в розділі 2 представлено інформаційний базис, який вказує на постійні та змінні дані, а також потоки і зв'язки між ними. Вищевказане системно доповнює

інформацію, висвітлену в п. 2.1 при формалізованому описі процесу прийняття рішень та є необхідною складовою, що використовується для подальшого формування алгоритмічного забезпечення.

2. Розкрито змістовну сутність змінної та постійної складових інформаційного базису, описано їх складові та вказано їх цінність. Вказане використовується для реалізації методичного та алгоритмічно-програмного забезпечення прийняття технологічних рішень при ТПг КРМСВ.

3. Описано інформаційну складову атестації метрики, зміст якої зводиться до наявності інформації про положення ланок ПР/КПР із збереженням певної їх орієнтації у просторі ЗП. Отримувана інформація є необхідною при ТПг КРМСТ та фрагментарно відтворює реалізацію виконавського рівня L3.

4. Викладено приклад представлення інформації щодо рекомендацій для реалізації КРТ у різних виробничих сферах. Це може розглядатись як основа для подальшого надання рекомендацій при реалізації виконавського рівня L3 пропонованої трирівневої методики.

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

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

На базі запропонованого системного трирівневого підходу при аванпроектуюванні КРТ (див п. 2.1) розроблено алгоритмічне забезпечення, що являє як 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 і т.д. 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 аванпроектуюванні 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 аванпроектуювання 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  $S_{Ln}$ .

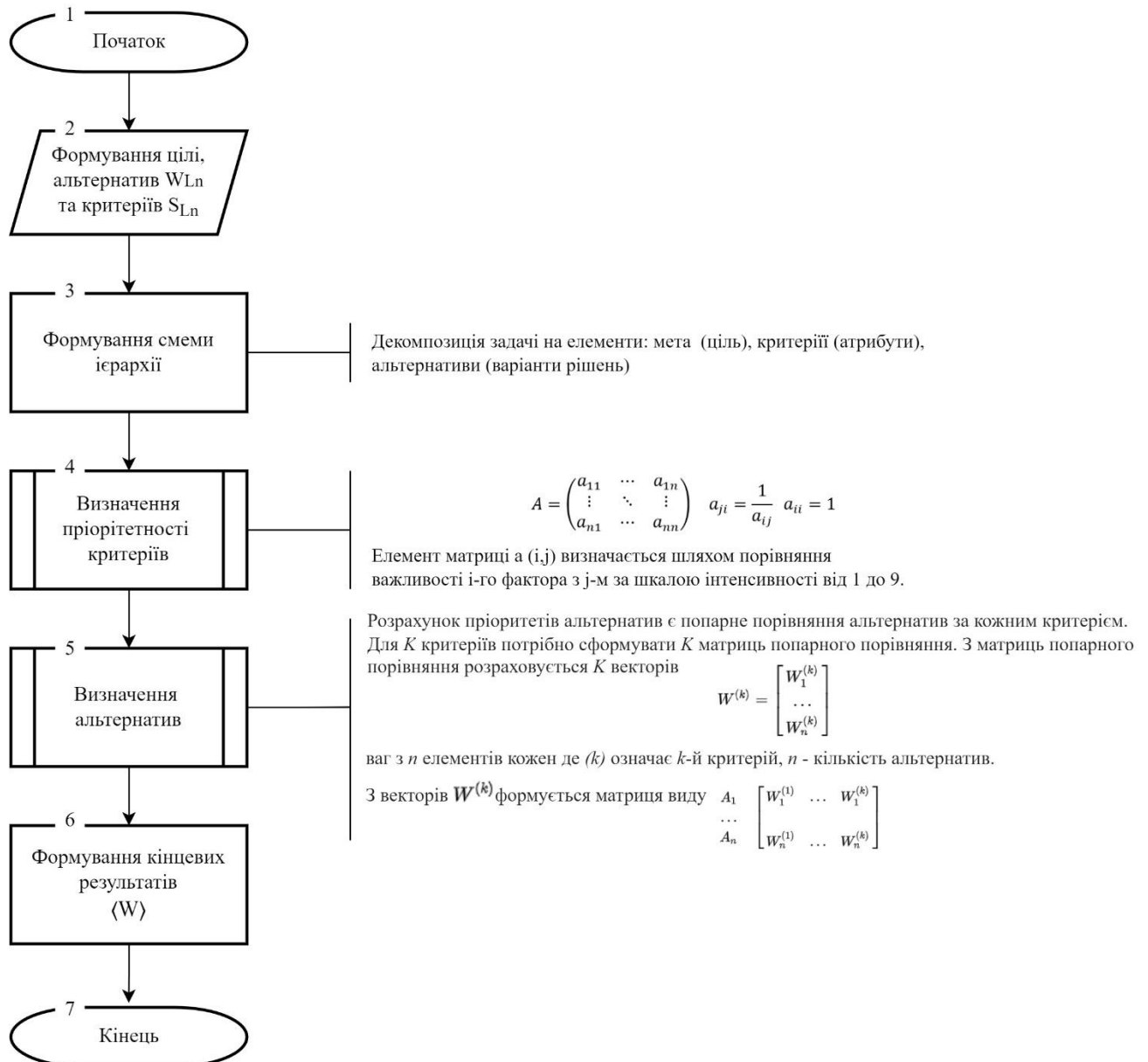


Рис. 4.1 – Блок-схема загального алгоритму роботи МАІ для пропонуваного підходу при ТПГ КРМСВ

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 КІПР.

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 аванпроектуванні КРМСТ**

Узагальнений алгоритм прийняття рішень на основі МАІ представлений на рис. 4.2–4.5. В ньому блоки 2–7 відповідають блоку А1, блоки 8–20 відповідають блоку А2<sub>L1</sub>, блоки 21–32 відповідають блоку А3<sub>L2.1</sub>, а блоки 33–44 відповідають блоку А3<sub>L2.2</sub> SADТ-діаграми (рис. 2.3).

Робота запропонованого алгоритму представлена нижче.

На початку (блок 2 – за рис. 4.2) виконується загальне формування вхідної інформації для пропонованого трирівневого підходу при аванпроектуванні 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 (Н), 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 (Н), (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 трирівневим 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 (Н), яка є безпосереднім учасником процесу виготовлення виробу.

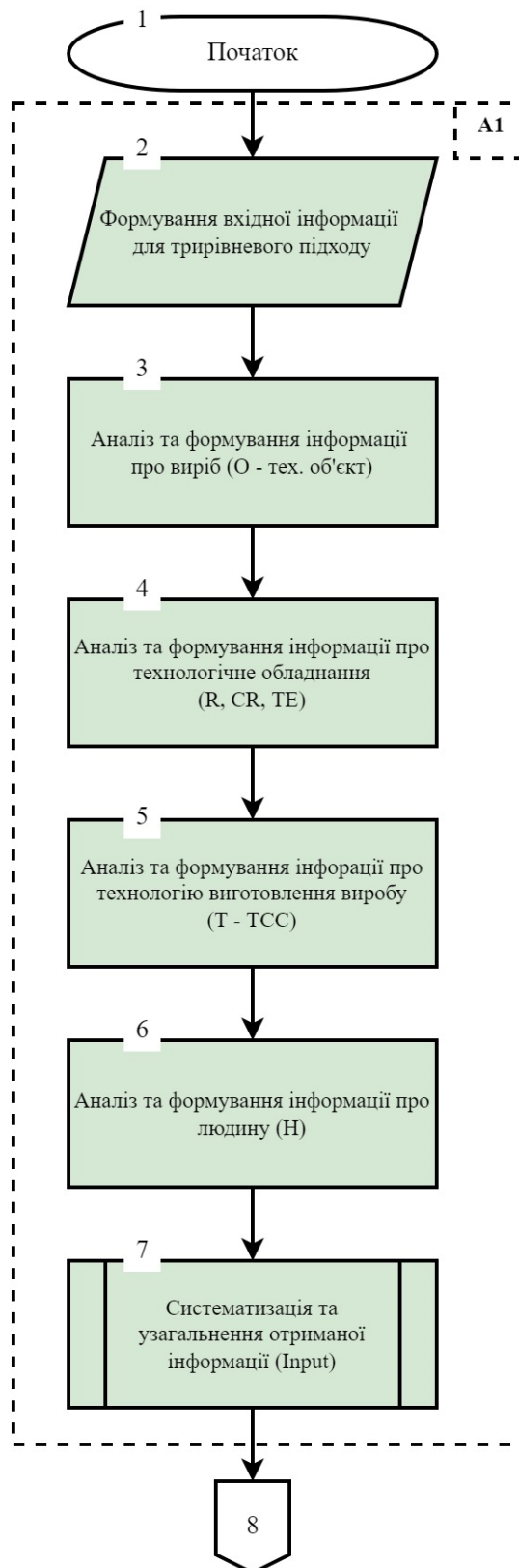


Рис. 4.2 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі МАІ



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 пропонованого 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  $\langle R, CR \rangle$ .

В наступному блоці 9 формується схема ієрархії за локальними критеріями, наприклад, в даному випадку з використанням локальних критеріїв  $S_{L1}$ , 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.

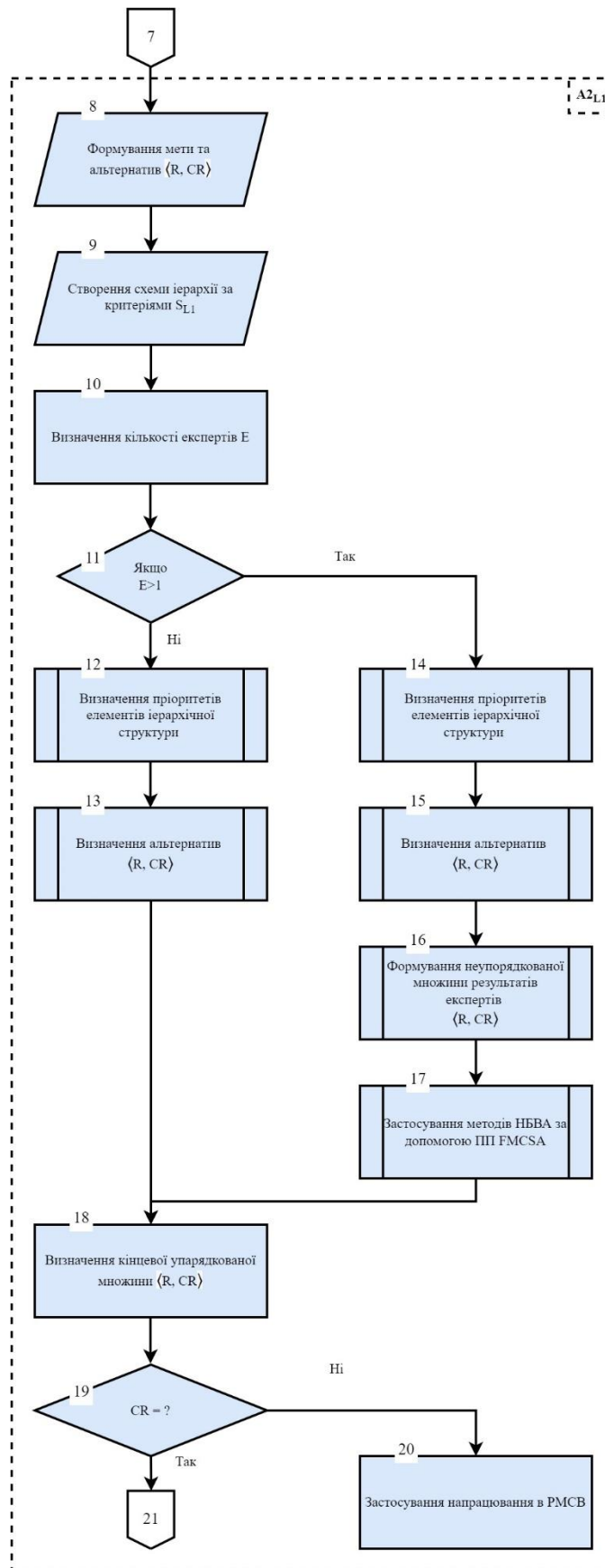


Рис. 4.3 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі MAI, блок  $A2_{L1}$  за рис. 2.3

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  $S_{L1}$ . 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).

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 ваговою 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  $A_{Z_{L2.1}}$  та його реалізація за пропонуваним системним трирівневим підходом при аванпроектванні 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  $A_{Z_{L2.1}}$  подано на рис. 4.4. Загальна послідовність дій зберігається як в блоках 8-19 блок-схеми алгоритму стратегічного рівня L1 (рис. 4.3).

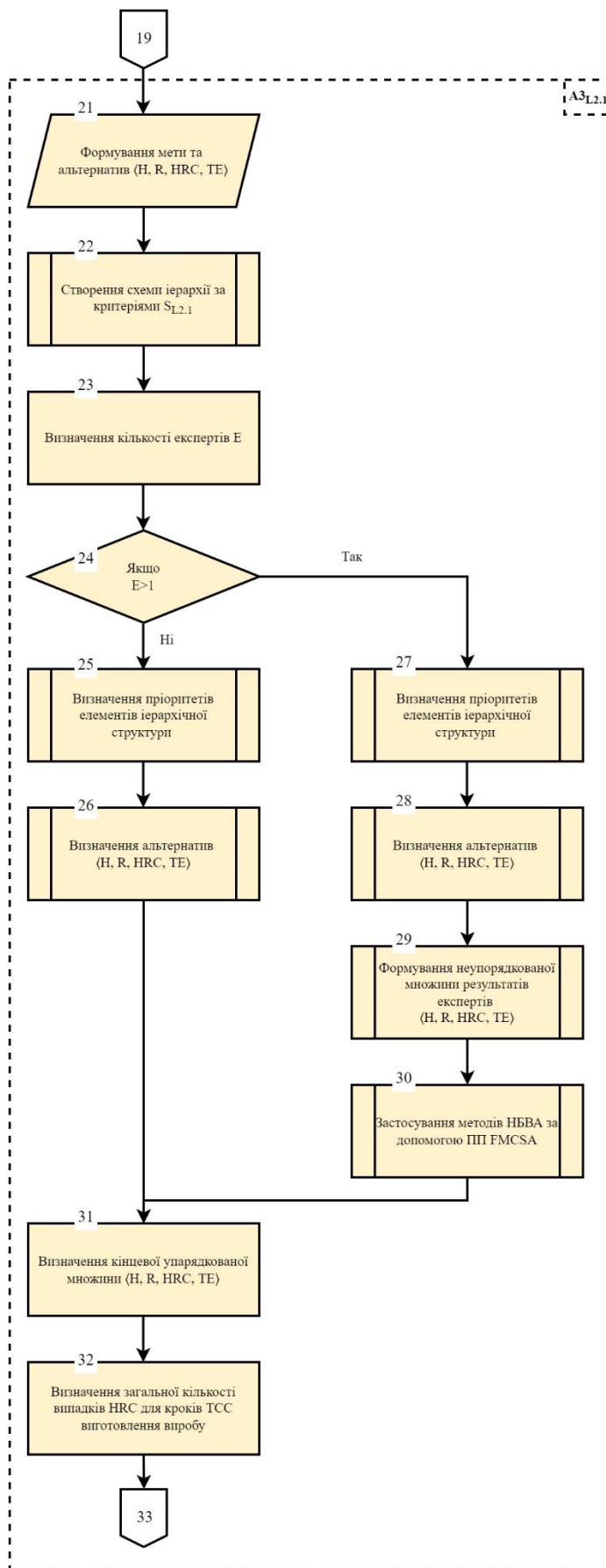


Рис. 4.4 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі MAI, блок A3<sub>L2.1</sub> за рис. 2.3

Проте наявні деякі відмінності, 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 КІПР 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.

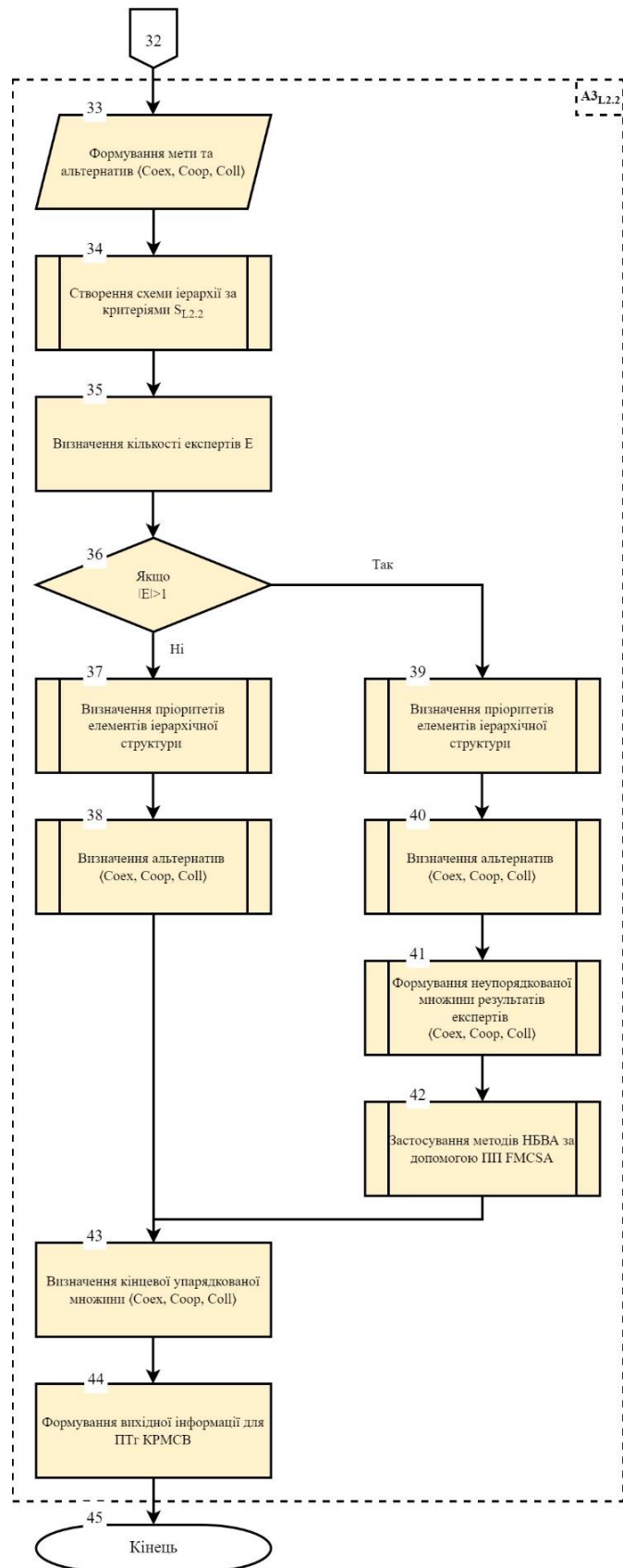


Рис. 4.5 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі MAI, блок  $A3_{L2.2}$  за рис. 2.3

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 аванпроектуюванні 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.

#### **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.





Рис. 4.6 – Блок-схема загального алгоритму роботи пропонованого підходу прийняття рішень на основі MAI, блок  $A3_{L2.2}$  за рис. 2.3

### 4.1.3. Узагальнений алгоритм атестації метрики МС КНР

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.

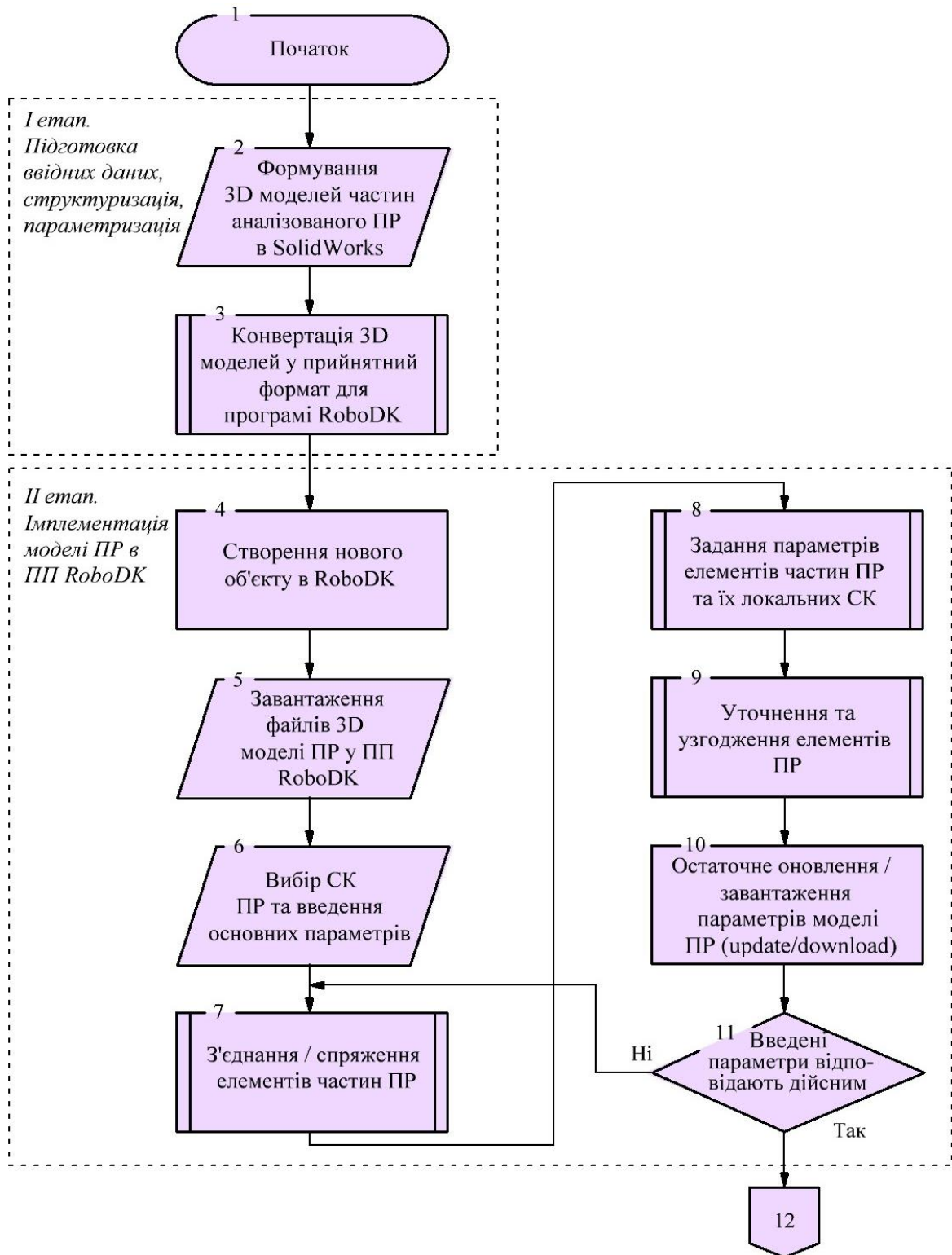


Рис. 4.7. – Стислий алгоритм атестації метрики КНР

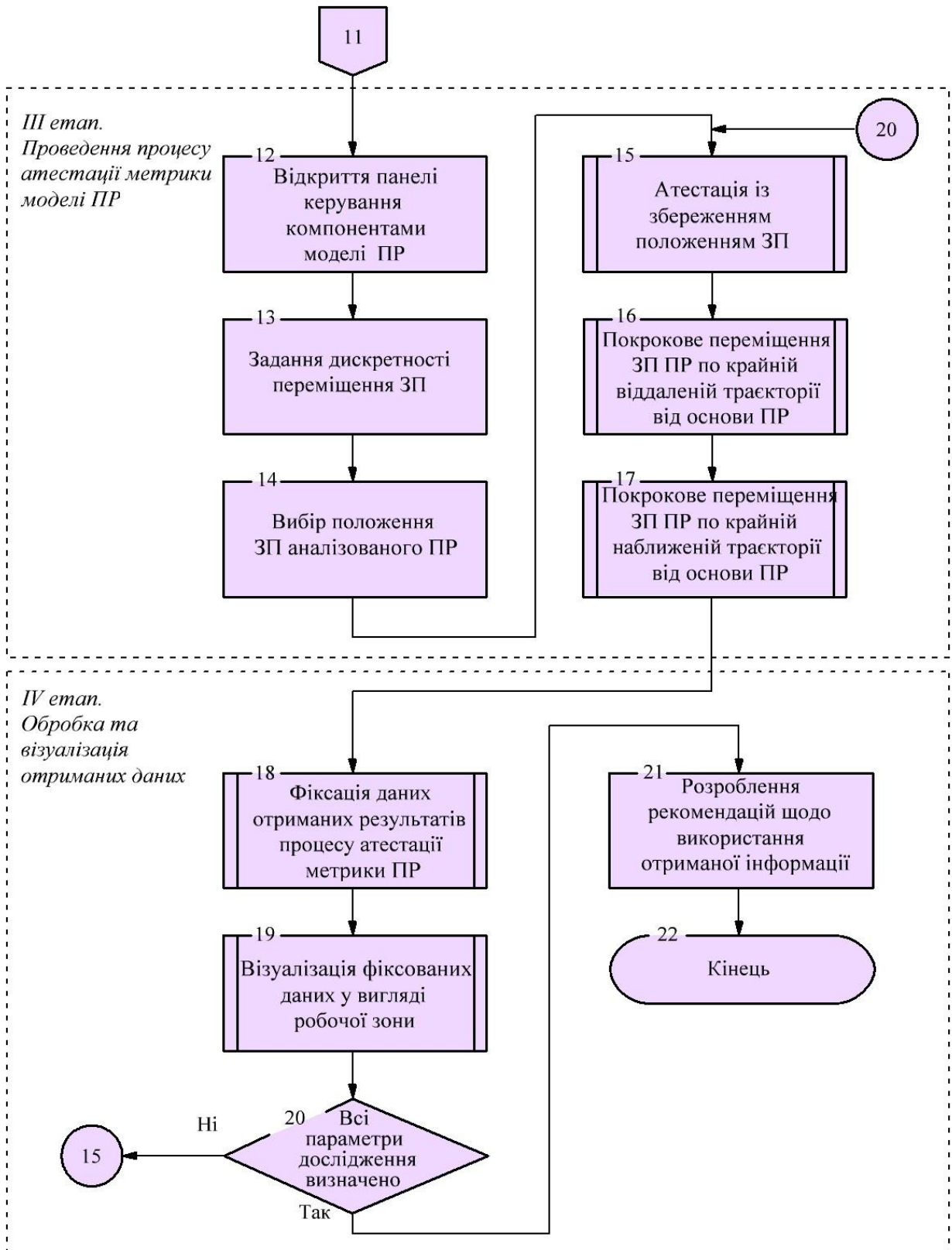


Рис. 4.8. – Стислий алгоритм атестації метрики КПР

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.

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 САD-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 КПП 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 КПП та кількості ступенів рухомості (для нових ПР/КПП), тобто параметра *DoF (Degrees of Freedom)* для КПП; блок 7 – з'єднання та спряження за відповідними правилами 3D-моделей компонентів КПП; 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 etapu* 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 КПП та/або ПР виконуються та перевіряються особисто користувачем ПП.

На третьому етапі (*III etapu*) виконується процес як такий атестації метрики МС аналізованого КПП. Для його забезпечення використовується панель керування як головний інструмент управління 3D-моделлю КПП 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-покроковим 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 КПР як такої є багаторазове розв'язування зворотної задачі кінематики із врахуванням геометричних параметрів 3D-моделі компонентів метрики КПР, тобто ланок та їх послідовності в МС, виду та величин їх взаємних переміщень та ЗП КПР.

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 КПР та методики атестації метрики КПР. Кінцевим кроком (блок 21) є узагальнення отриманих графічних результатів щодо практичного використання КПР.

Кінцевими результатами є геометричні форми робочих зон КПР, при яких зберігається фіксоване положення та орієнтація ЗП у системі координат КПР, які є важливими та необхідними, особливо на початкових етапах проєктування 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 тривірневий підхід аванпроєктування 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:

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).

Матриця пріоритизації	Вага компонентів	Об'єм компонентів	Фіз. Мех. Властивості	Можливість захоплення	Технологічність компонентів	Орієнтування 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 захоплення	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
Орієнтування 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

Вага компонентів	Людина	Робот	Людина і робот одночасно	Технологічне обладнання	Людина	Робот	Людина і робот одночасно	Технологічне обладнання
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 в MS Excel

При виконанні процедури анкетування експерту необхідно заповнити відкриті для редагування комірки таблиць відповідно до запропонованого 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.

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.



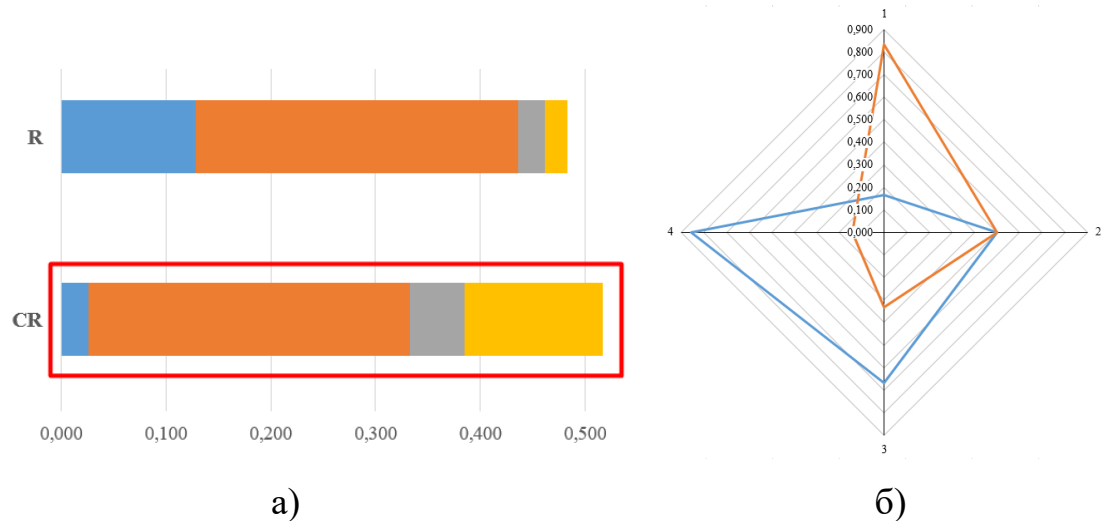


Рис. 4.10 – Приклади діаграм, які генерує MS Excel: а) накопичувальна;  
б) пелюсткова

#### 4.2.2. Програмна реалізація НБВА

В пропонуваному трирівневому 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, розробленого на кафедрі РЕ та А ім. проф. Б.Б. Самотокіна 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).

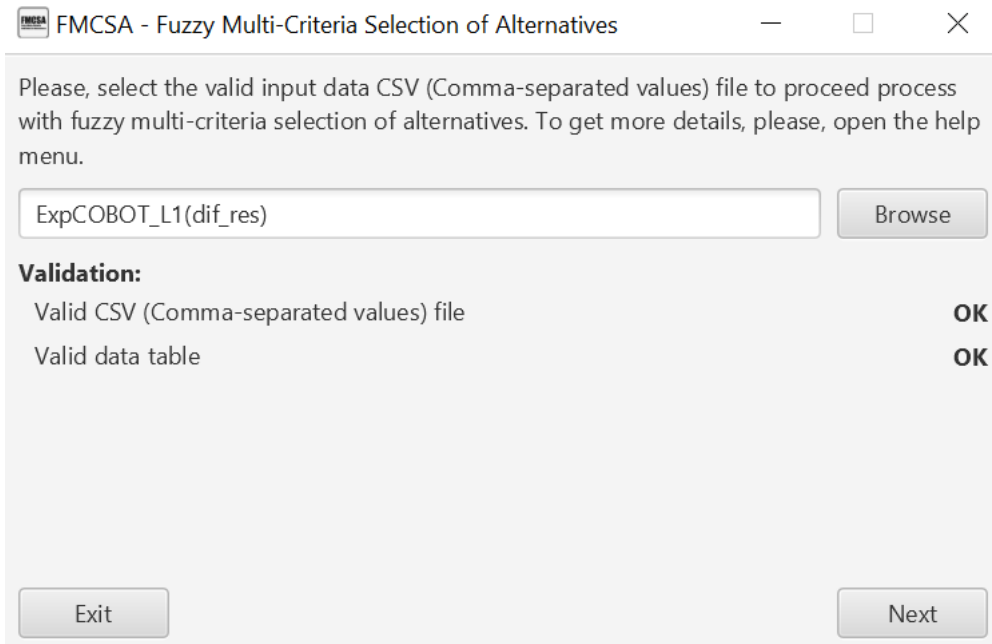


Рис. 4.11 – Загальний інтерфейс FMCSA

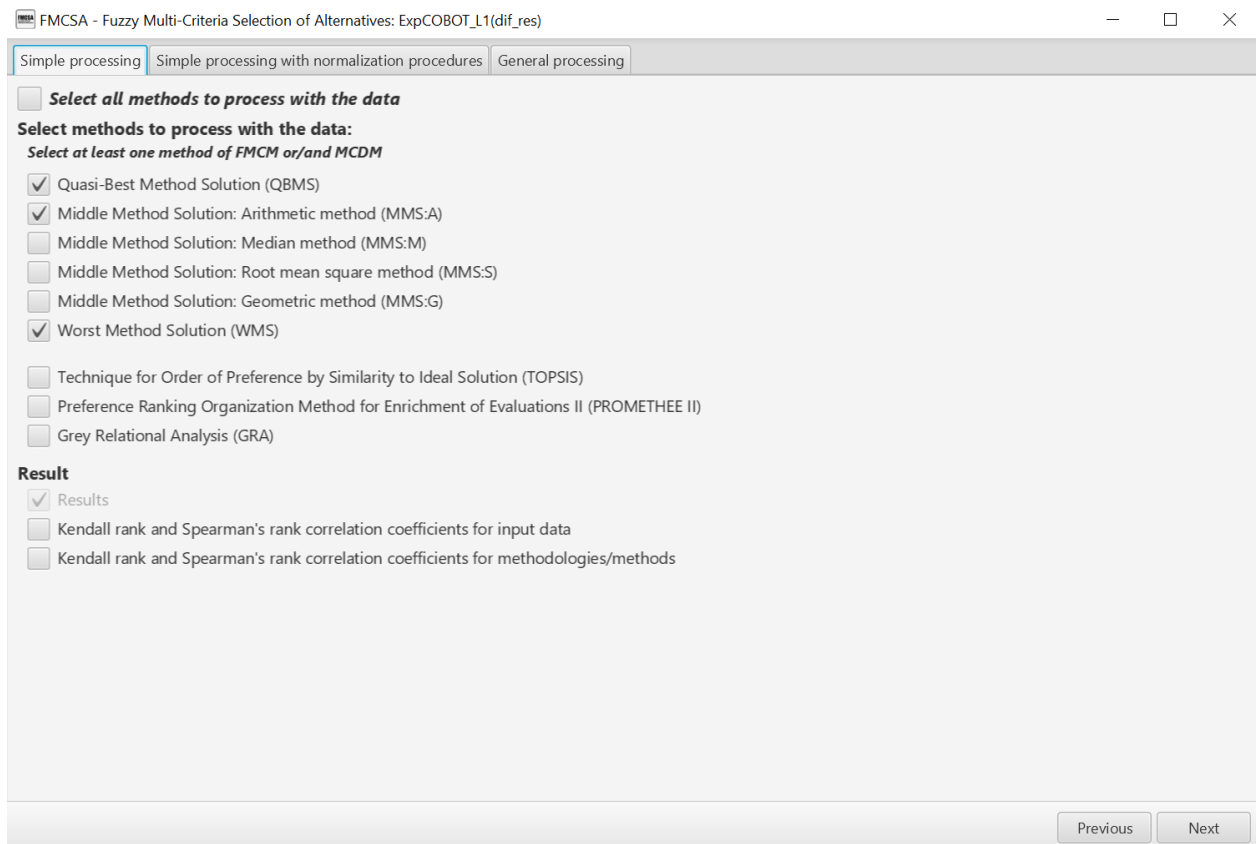


Рис. 4.12 – Інтерфейс вибору методів обробки в FMCSA

Після вибору методів обробки вхідної інформації та натискання кнопки «Next» на графічному інтерфейсі 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.

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 САД-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 Braccio.

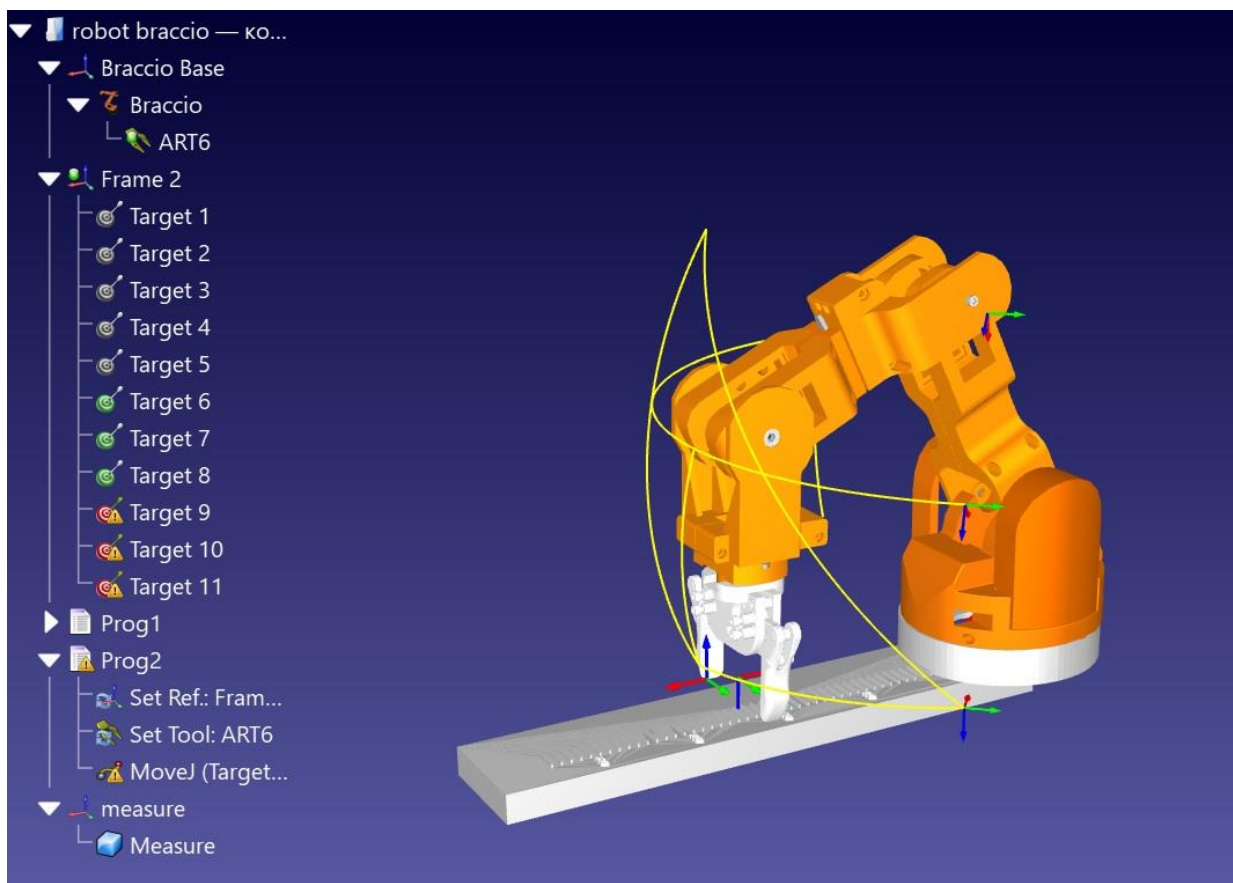


Рис. 4.13 – Графічний інтерфейс користувача RoboDK

Необхідними параметрами для вирішення зворотної задачі кінематики є координати точок позиціонування ЗП аналізованого/проєктованого 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.

### **4.3. Перевірка працездатності функціонування пропонованої багаторівневої системи початкового проєктування 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 проєктування виробництв. 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  $S_{1L1} - S_{4L1}$ , а саме безпека ( $S_{1L1}$ ), продуктивність ( $S_{1L2}$ ), гнучкість налаштування ( $S_{1L3}$ ) та простота використання ( $S_{1L4}$ ) (див. рис. 4.14).

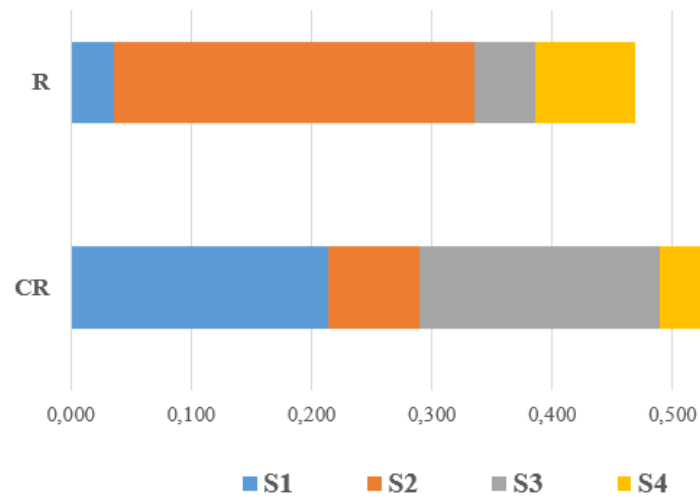


Рис. 4.14 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ за прийнятими критеріями S1...S4 для L1,  $|E|=1$

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).

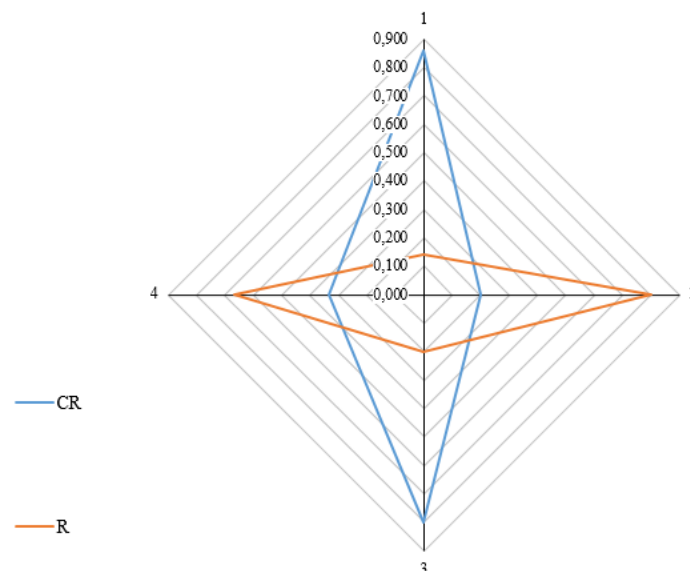


Рис. 4.15 – Пелюсткова діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ за прийнятими критеріями S1...S4 для L1,  $|E|=1$

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 схема 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  $|E|=1$ .

#### **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 вала 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 відрізняється від інших результатів. Приклад результатів використання МАІ для групи з трьох експертів продемонстровано на рис. 4.16 – 4.17.

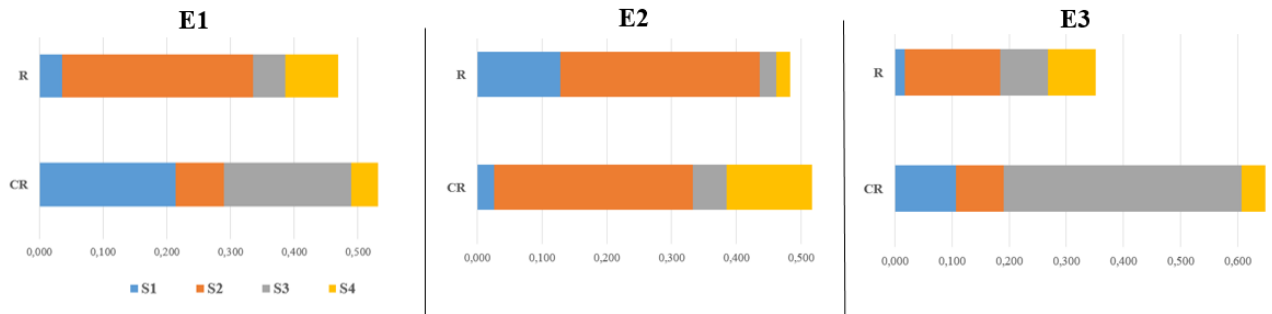


Рис. 4.16 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ для  $|E|=3$ , L1

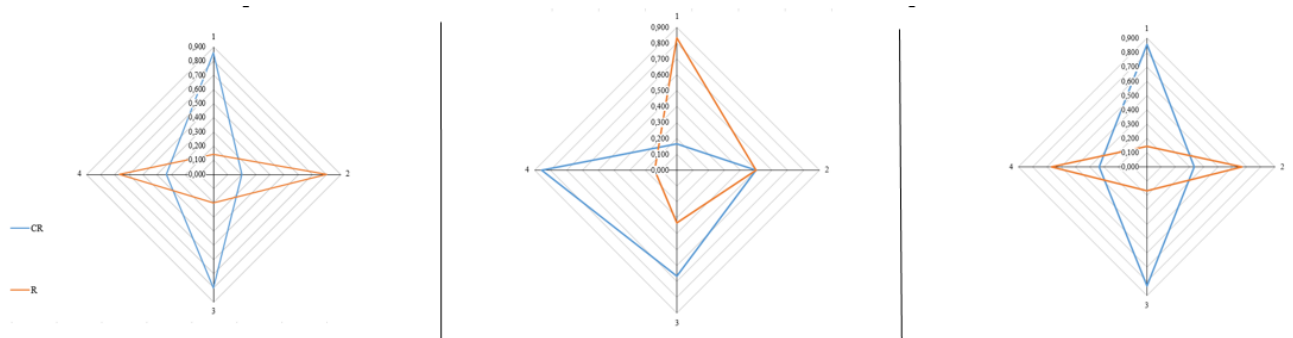


Рис. 4.17 – Пелюсткова діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ для  $|E|=3$ , L1

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.

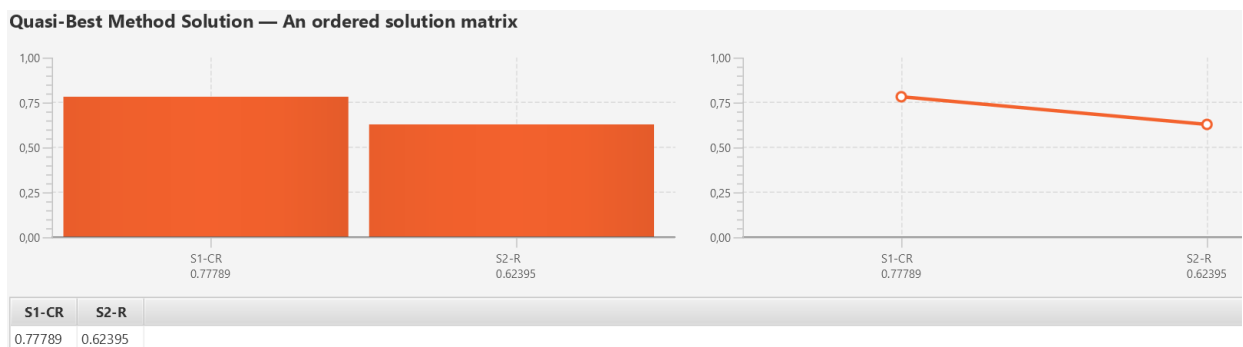
В ПП FMCSA для подальшої обробки отриманих MAI результатів для  $|E|=3$  серед інших використані наступні методи обробки інформації: Middle method Solution Arithmetic Method – MMS:A (середнє арифметичне), Quasi-Best method solution - QBMS (метод найкращого випадку) та Worst Method Solution –



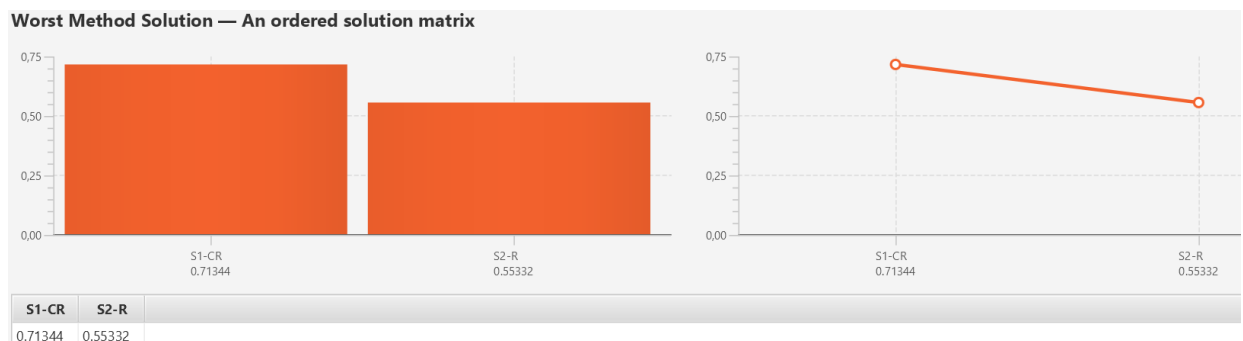
WMS (метод найгіршого випадку). Отримані результати представлені на рис. 4.18.



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 МАІ, 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.

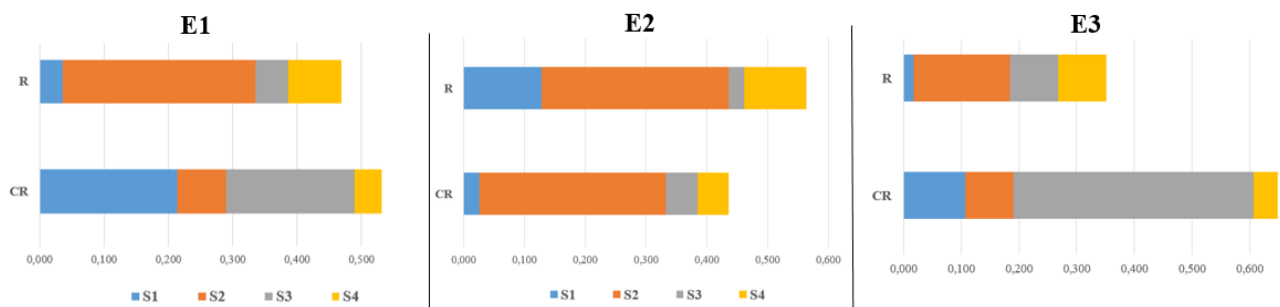


Рис. 4.19 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ з різними оцінками E1, E2, E3 щодо

R та CR., L1

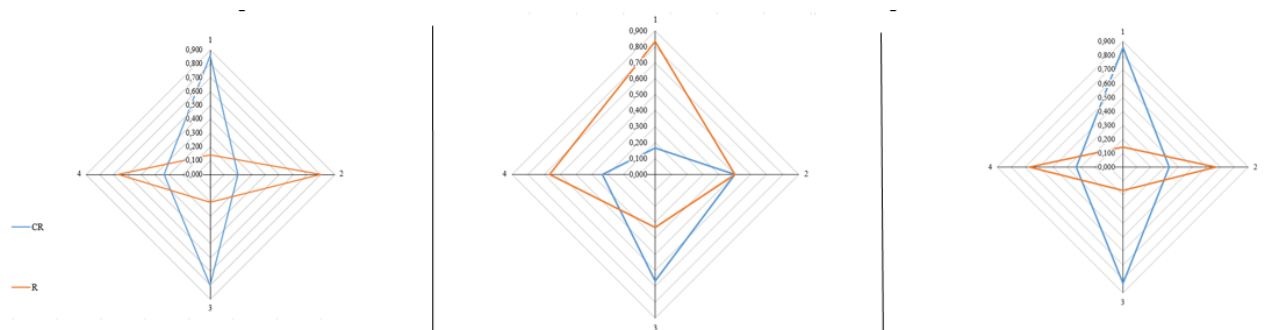
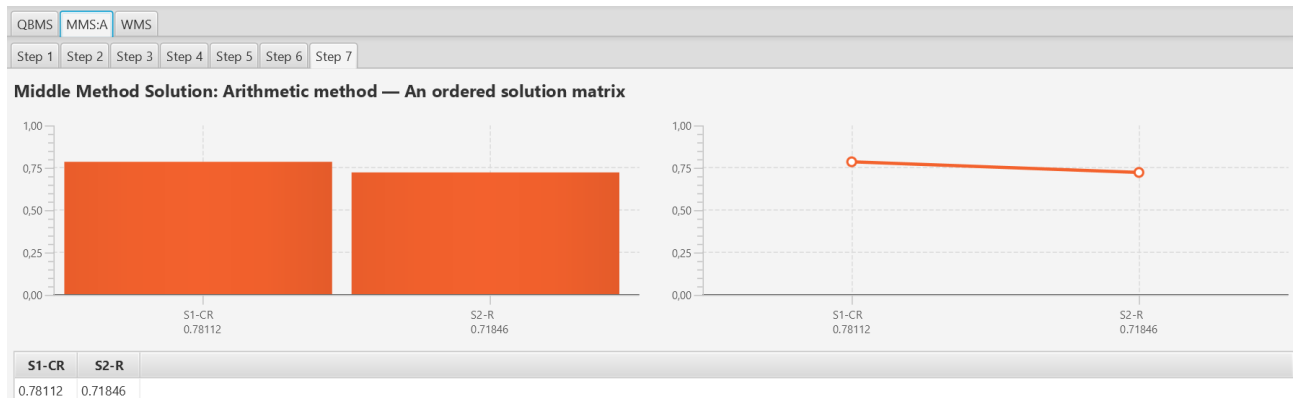


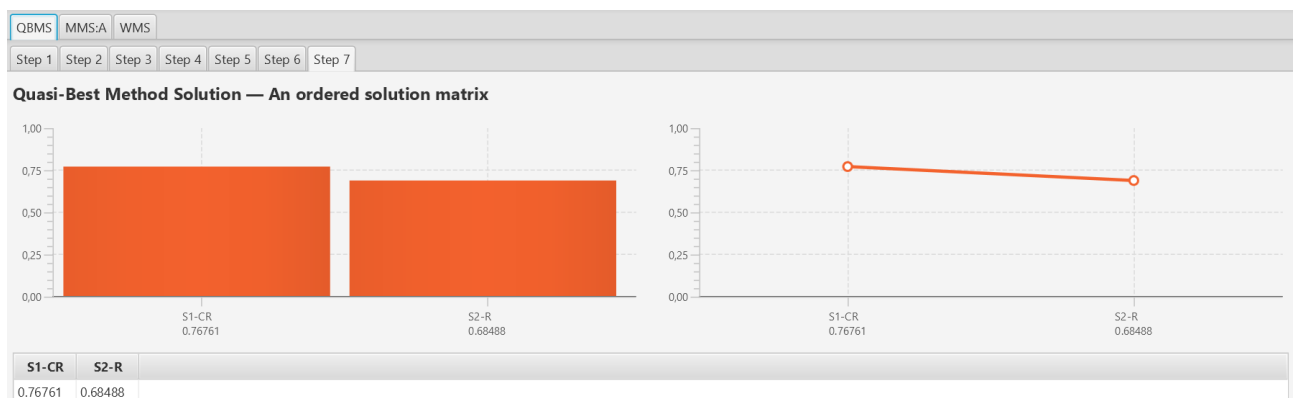
Рис. 4.20 – Пелюсткова діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення можливості впровадження КРТ з різними оцінками E1, E2, E3 щодо

R та CR., L1

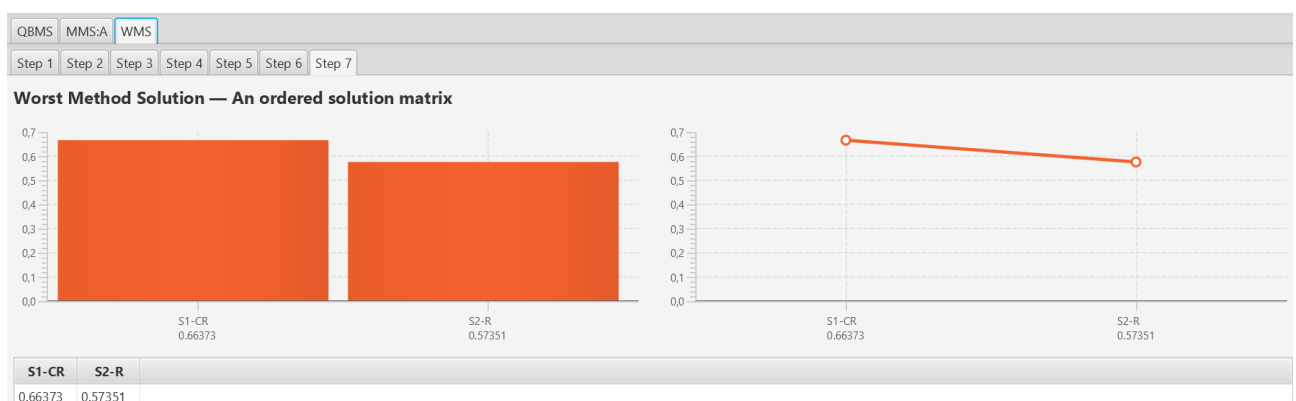
Оброблені результати МАІ з використанням ПП FMCSA висвітлено на рис. 4.21. Відповідно у порівнянні з попередніми результатами за рис. 4.18 очевидними є відмінності у кількісних показниках результатів щодо R та CR при обробці всіма трьома методами у ПП FMCSA пріоритет має CR.



а)



б)



в)

Рис. 4.21 – Графічні результати оброблених МАІ результатів ПП FMCSA:

а) MMS:A; б) QBMS; в) WMS,  $|E|=3$

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, 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).

Вище висвітлені 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.

#### **4.3.3. Результати застосування MAI для пропонованого тривірневого підходу при аванпроектуванні КРТ**

Узагальнюючи вищевказані методи та підходи щодо реалізації розробленого тривірневого підходу при аванпроектуванні КРТ виконано експертне оцінювання щодо можливості застосування КРТ (стратегічний рівень L1), розподіл завдань між людиною та КТР (тактичний рівень L2.1), визначення виду взаємодії між людиною та КТР (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 пропонованого тривірневого підходу перевагу мають «класичні» роботизовані технології.

Схожа ситуація виникає на тактичному рівні L2.2, який передбачає визначення виду взаємодії між людиною та КТР, 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 пропонованого 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 КТР 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.

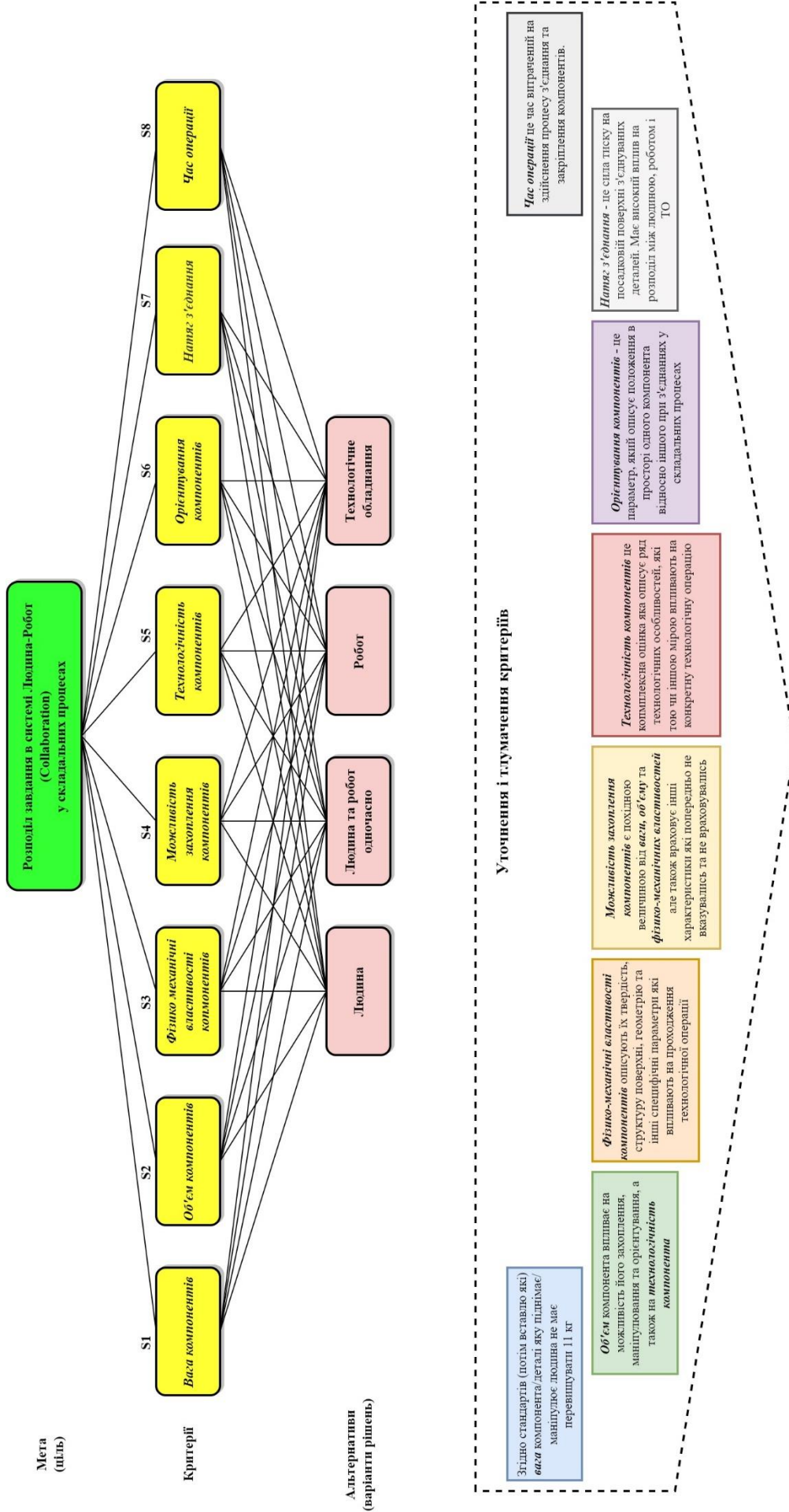
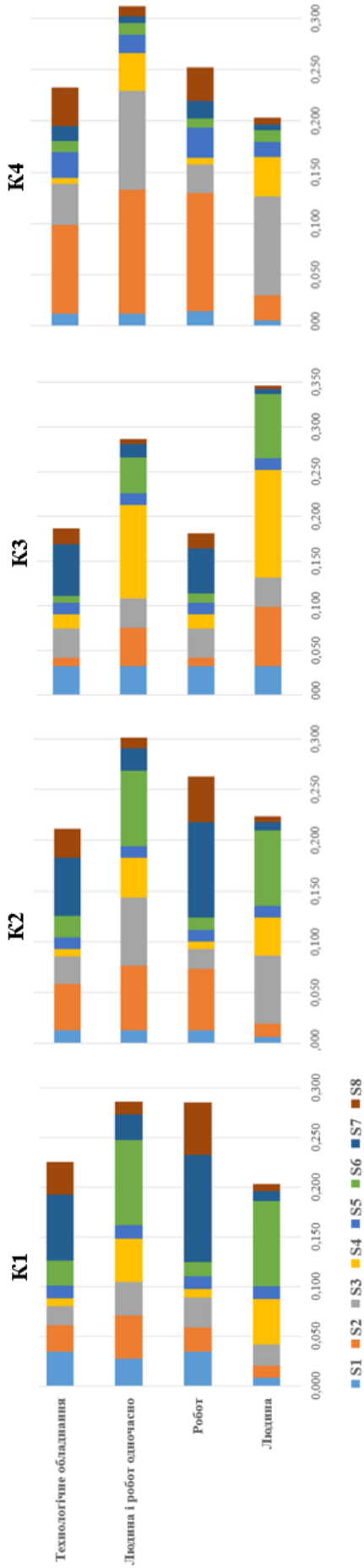


Рис. 4.22 – Схема ієрархії при використанні МАІ для складання вала ведучого редуктора одноступінчастого кінцевого

● Лійніні 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

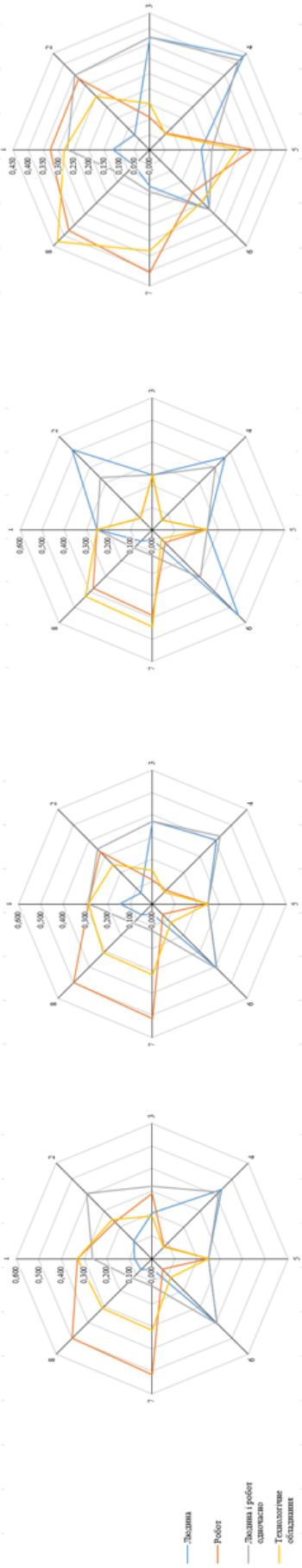
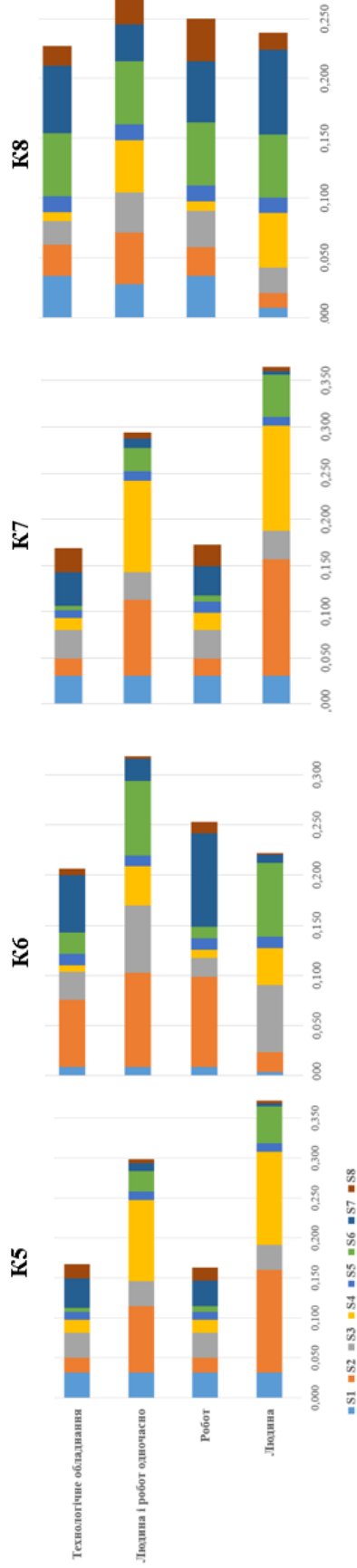


Рис. 4.23 – Результати оцінювання  $|E|=1$  для складання валу ведучого редуктора конічного одноступінчастого, кроки K1-K4

● 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

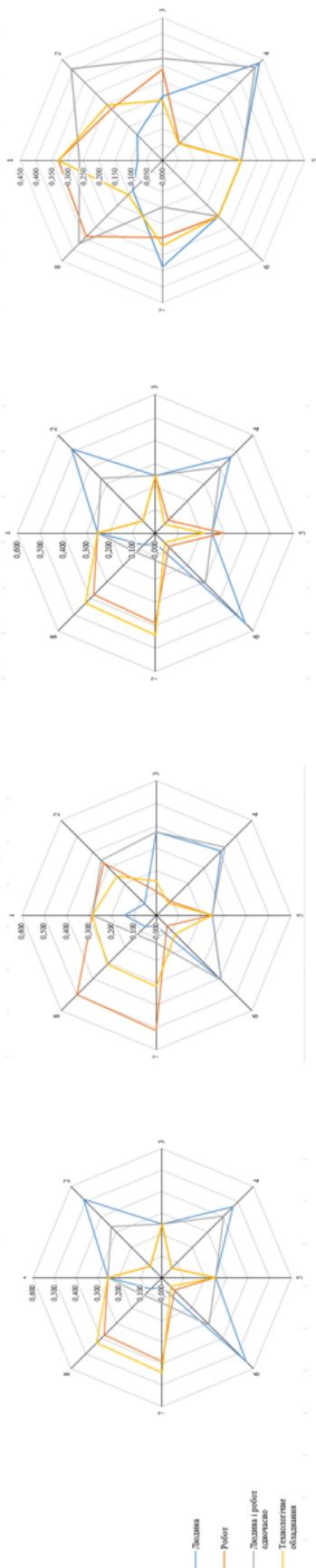
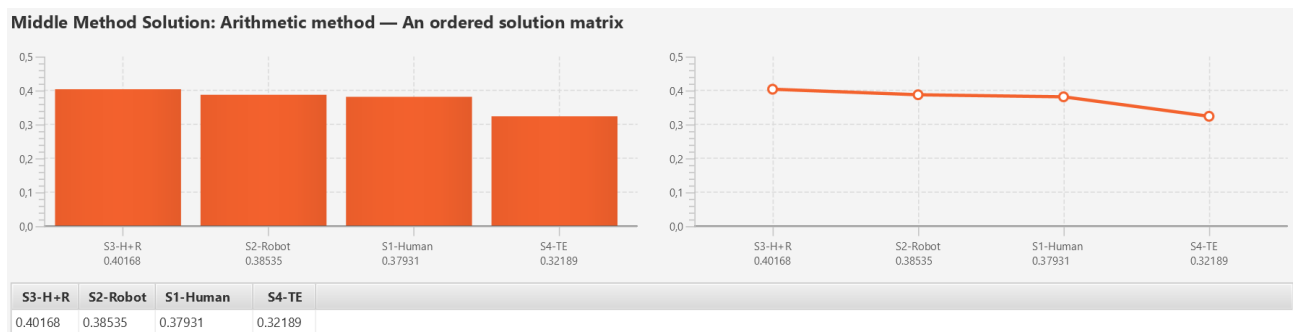
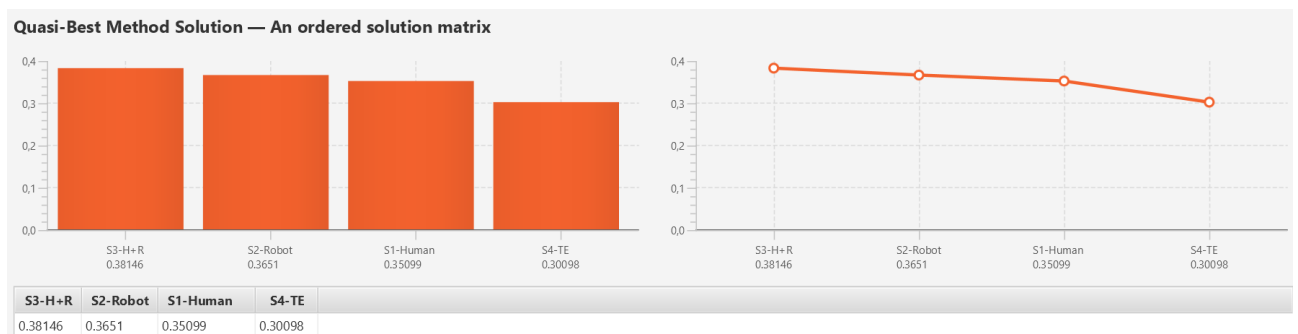


Рис. 4.24 – Результати оцінювання  $|E|=1$  для складання валу ведучого редуктора кінцевого одноступінчатого, кроки K5-K8

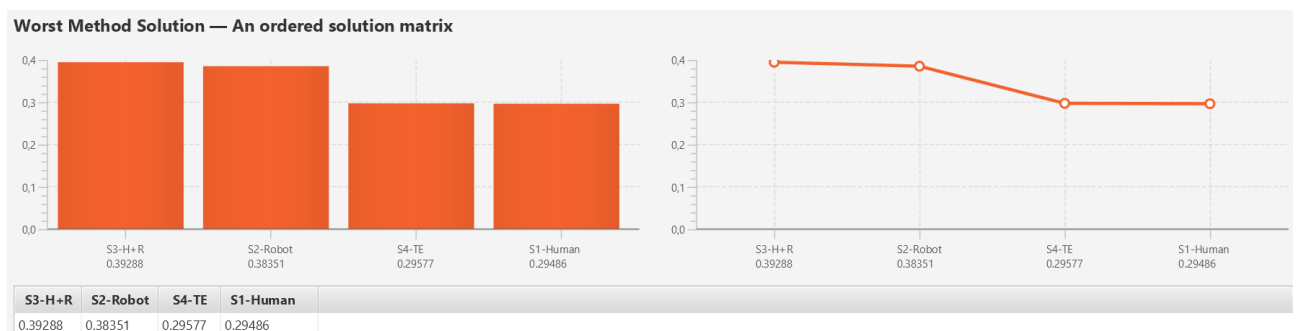




а)



б)



в)

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 К1-К8 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 К1-К8 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 К, де робота людини та КПП (Н + R) має перевагу над іншими видами роботи (ПР або ТО). Тому для обраної множини кроків К виконано експертне оцінювання за схемою ієрархій, вказаній на рис. 4.26.

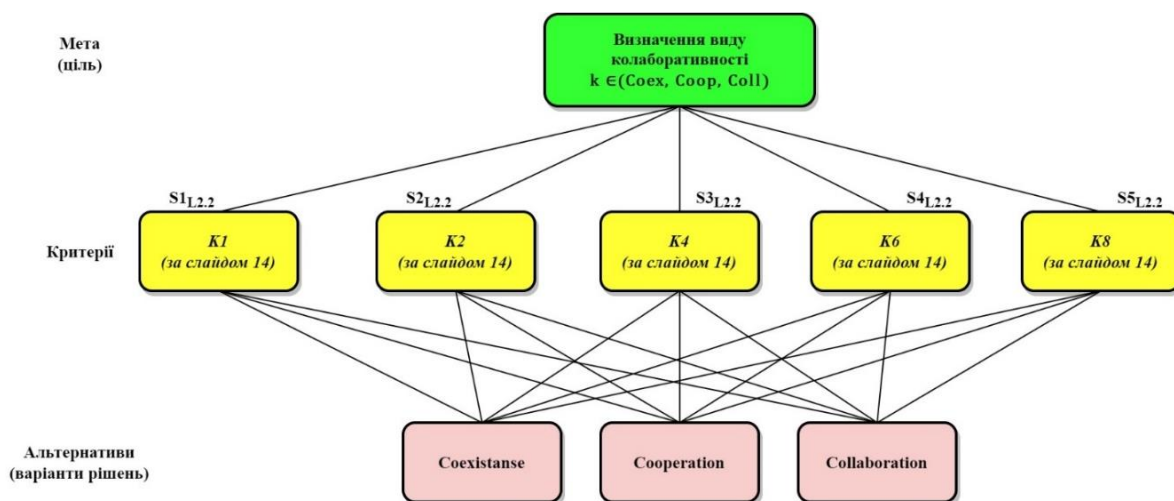


Рис. 4.26 – Схема ієрархії при використанні МАІ для складання вала ведучого редуктора одноступінчастого конічного, рівень L2.2

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 КПП 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 рівноцінними, тобто оцінки всіх критеріїв дорівнює 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 КІР, а також накопичену оцінку в цілому, що дає можливість розглянути адаптації всіх кроків до одного виду взаємодії.

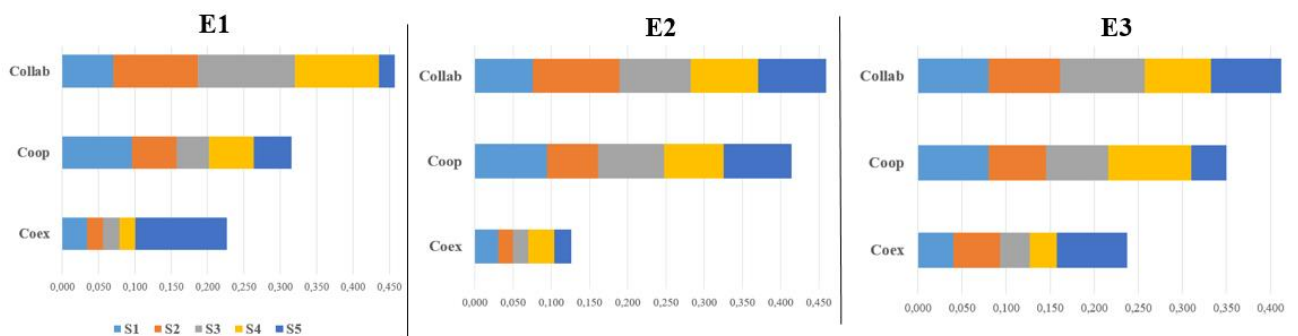


Рис. 4.27 – Лінійна діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення виду взаємодії людини та КІР,  $|E|=3$  рівень L2.2

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

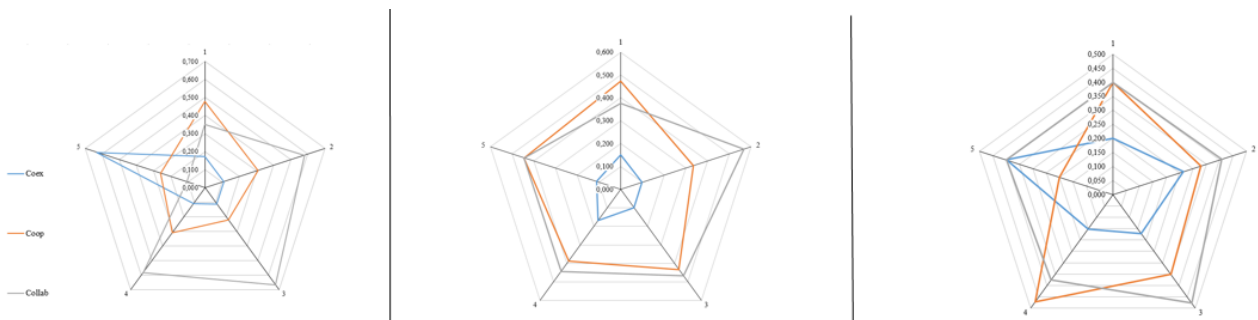
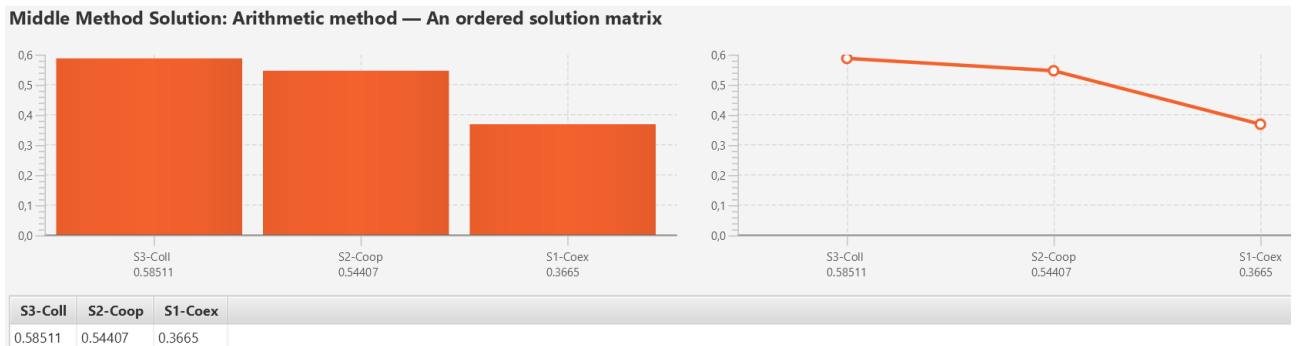
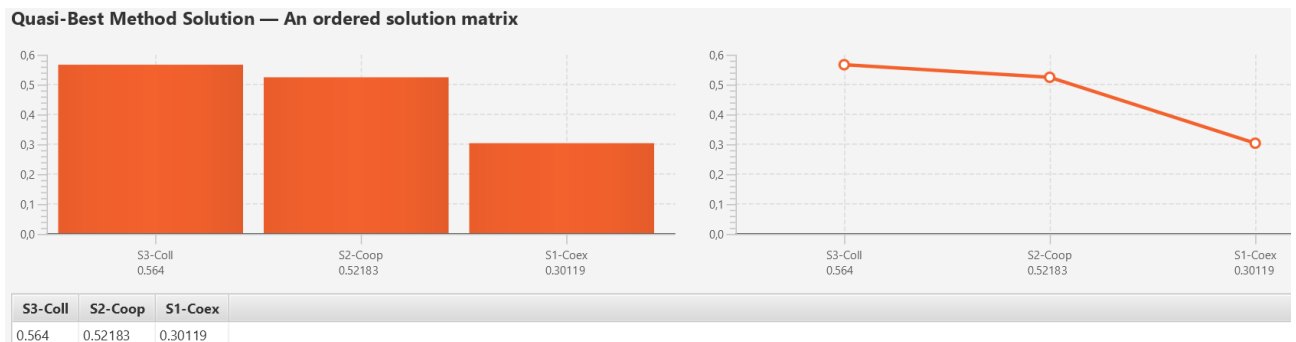


Рис. 4.28 – Пелюсткова діаграма з накопиченням нечітких оцінок визначення виду взаємодії між людиною та КІР за даними рис. 4.26

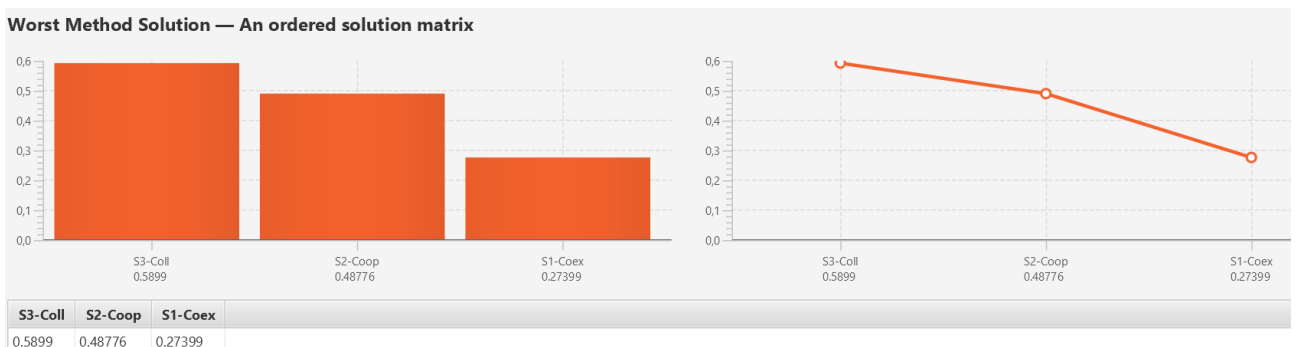
Отримані за МАІ результати (див. рис. 4.27, 4.28) оброблені за трьома методами MMS:A, QBMS та WMS в ПП FMCSA представлені на рис. 4.29.



а)



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

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

Вищевказане 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 КІР для конкретних кроків ТСС.

#### **4.3.4. Результати застосування атестації метрики для пропонуваного трирівневого підходу при аванпроектуванні КРТ**

Пропоновану в п. 2.3.1 методику атестації метрики МСПР випробувано на прикладі автоматизованої атестації метрики МС робота моделі Tinker Kit Braccio [61]. Причому атестація проводилась за відсутності ОМ в ЗП з величиною параметра атестації  $H_{\max}=65$  мм (рис. 4.30 – 4.33) та для випадку закріпленого ОМ в ЗП при  $H_{\max}=77$  мм (рис. 4.34 – 4.35).

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  $\hat{V} N = 90^\circ$ , коли ЗП орієнтований затискними елементами вертикально вниз. Зеленим кольором позначена зона, у якій гарантовано зберігається задане положення параметра атестації Н.

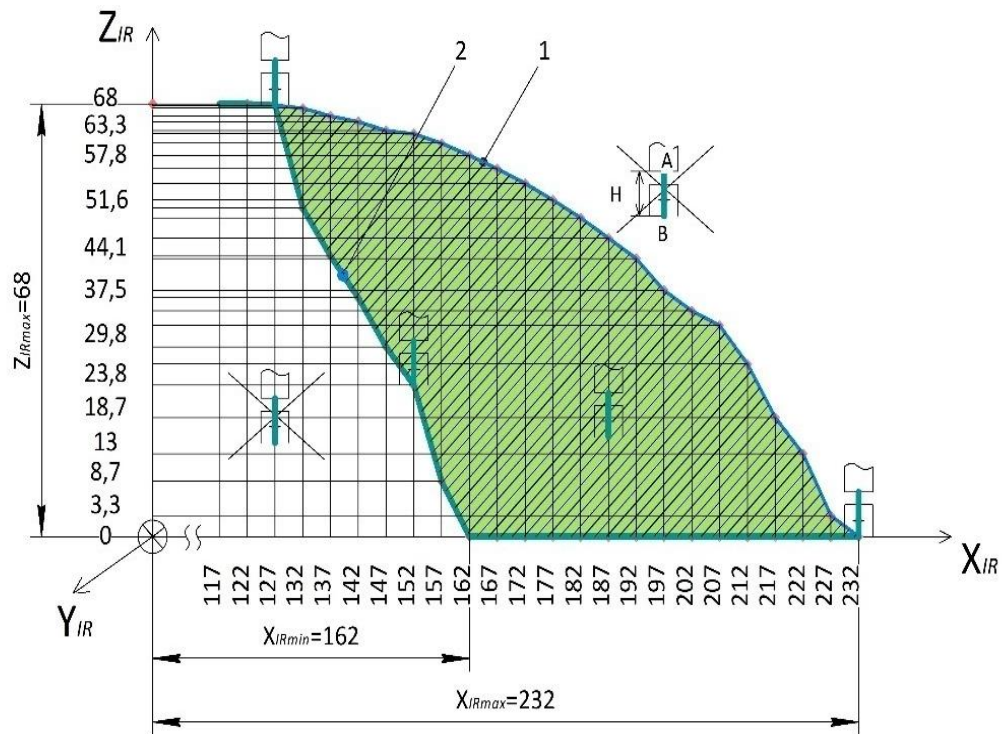


Рис. 4.30 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при вертикальній орієнтації параметра  $H_{max}=65$  мм без ОМ в ЗП вертикально вниз щодо основи ПР – H-Axis Vertical Down (WAVD)

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

На рис. 4.30 вказані позначення параметра  $H$  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  $H$ . Факт незбереженої досліджуваної орієнтації параметра  $H$  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  $H$  направлений в сторону збільшення (Forward) радіуса робочої зони робота.

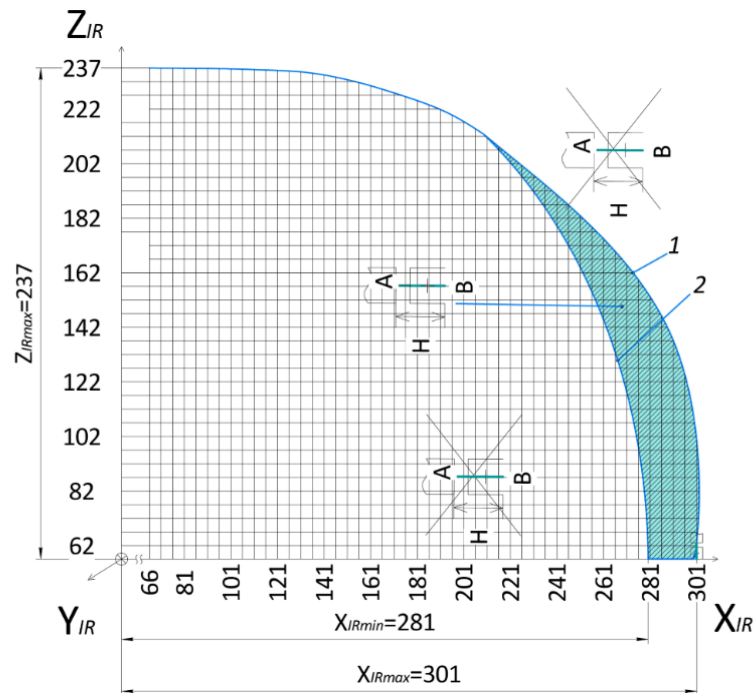


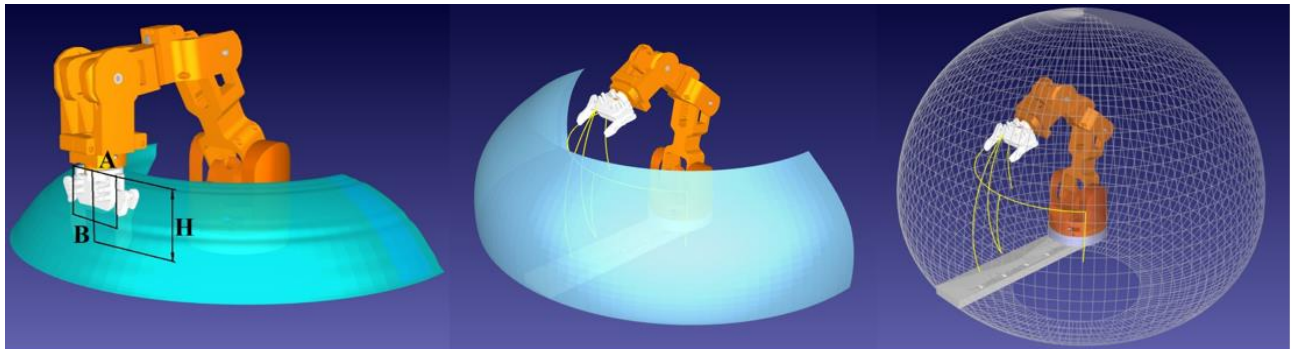
Рис. 4.31 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при горизонтальній орієнтації параметра  $H$  (без ОМ в ЗП) направлений вперед (вправо) від стійки робота (осі  $Z_{IR}$ ) в напрямку збільшення радіуса робочої зони ПР – H-Axis Horizontal Forward (WANF)

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 Врассіо, в яких зображені відповідні частини робочої зони ПР з гарантованими положеннями параметра  $H$  кінцевого елемента (ЗП) без ОМ. Блакитна зона на рис. 4.32 відображає частину робочої



зону робота, де зберігається орієнтація кінцевого елемента ЗП без ОМ у ЗП, тобто з характеристикою WАНF, 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.

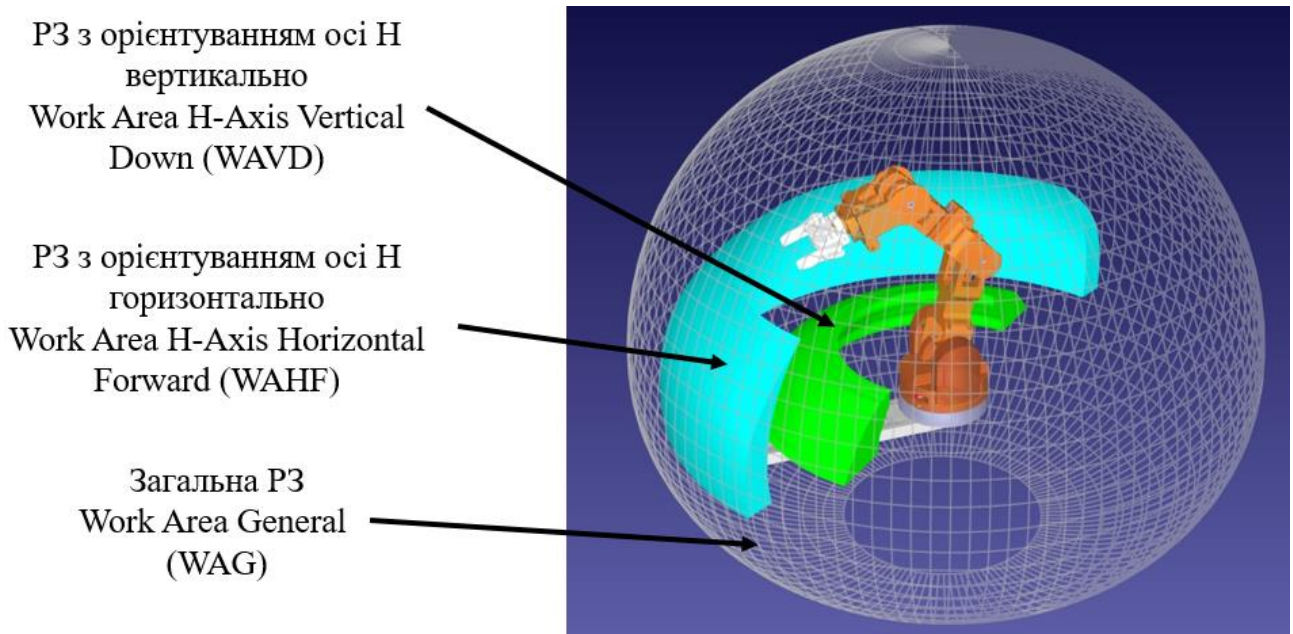


РЗ з орієнтуванням осі Н  
вертикально  
Work area H-axis vertical  
(WAV)

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

Загальна РЗ  
Work area general  
(WAG)

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



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

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

Загальна РЗ  
Work Area General  
(WAG)

Рис. 4.33 – 3D-візуалізація узагальнених результатів атестації метрики МС робота Врассіо WAV, WAN та WAG без ОМ



На рис. 4.33 графічно зображено 1 – криву зовнішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра  $H$  в інтервалі  $[X_{IRmin} \dots X_{IRmax}] = [152 \dots 217]$  мм; 2 – криву внутрішнього контуру зони атестації при зміні координат параметра  $H$  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  $H$  за рис. 4.30 та рис. 4.31 (ЗП без ОМ) становить приблизно 40%.

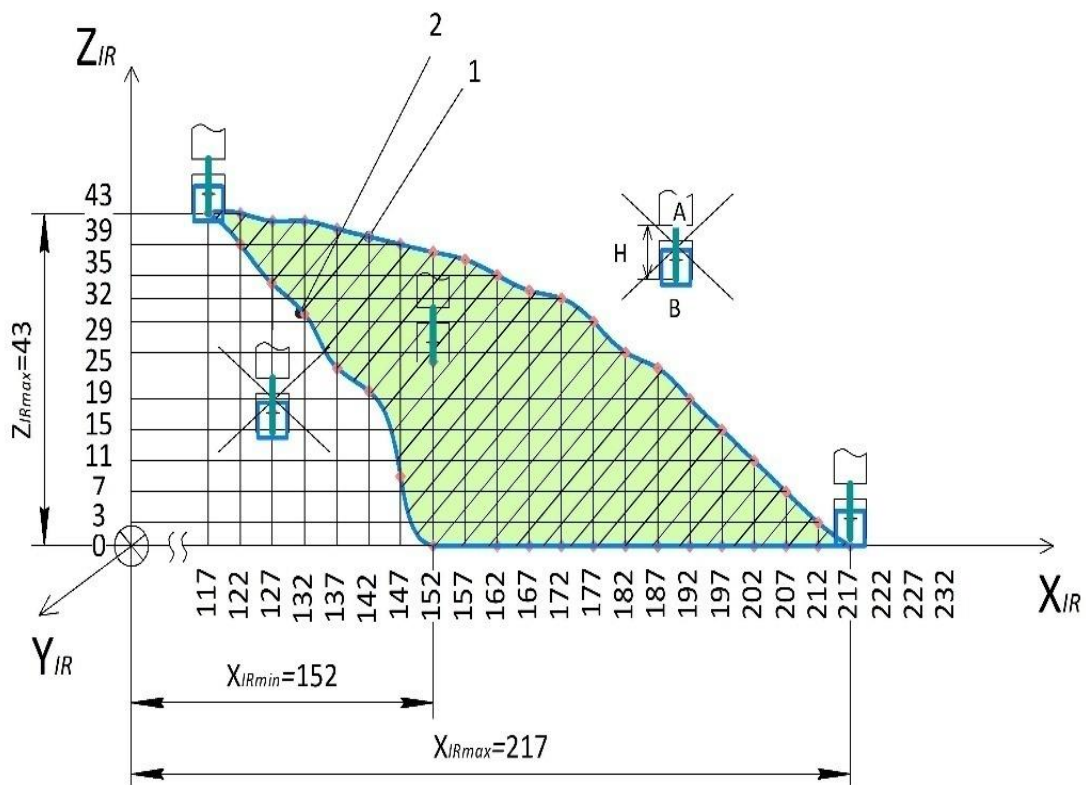


Рис. 4.34 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при вертикальній орієнтації параметра  $H = 77$  мм (з ОМ в ЗП) вниз щодо основи ПР – H-Axis Vertical Down + OM, тобто (WAVD+OM).

Схожі результати показує аналіз дослідження координат та орієнтації параметра атестації Н відносно площини, на якій закріплена основа робота (рис 4.34.). Характерною є різниця розмірів перетину між характеристиками параметра атестації Н (WAVD) рис. 4.34 та (WAVD+OM) рис. 4.35, тобто без та з OM 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 OM в ЗП ПР з характеристикою (WAVD).

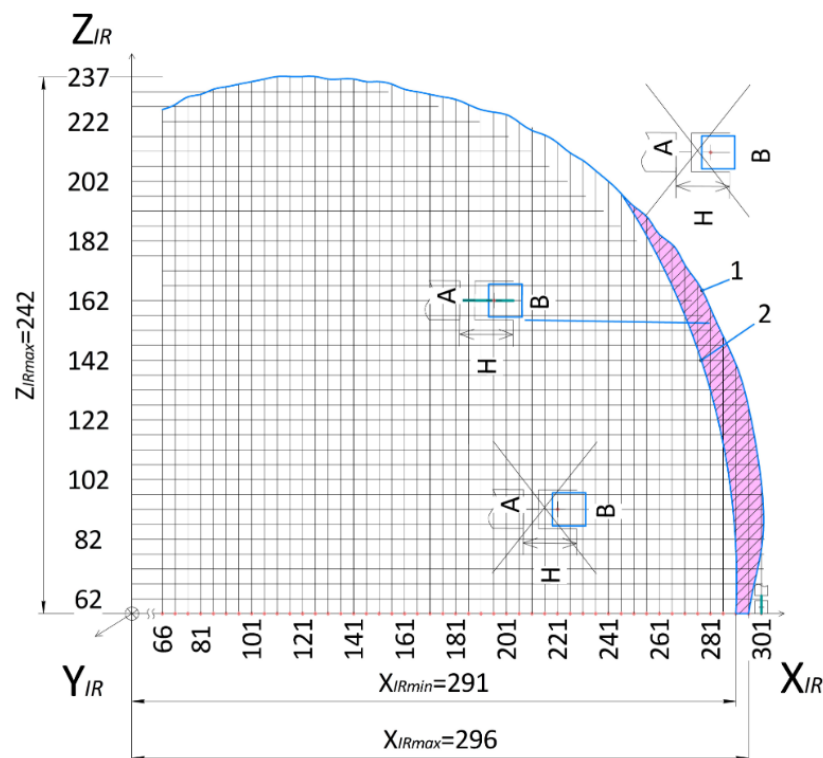


Рис. 4.35 – Графічна візуалізація залежностей координат  $Z_{IR}$  від  $X_{IR}$  при вгоризонтальній орієнтації параметра Н (з OM) направлений вперед (вправо) від стійки робота (осі  $Z_{IR}$ ) в напрямку збільшення радіуса робочої зони ПР – H-Axis Horizontal Forward + OM, тобто із закріпленням в ЗП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

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

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

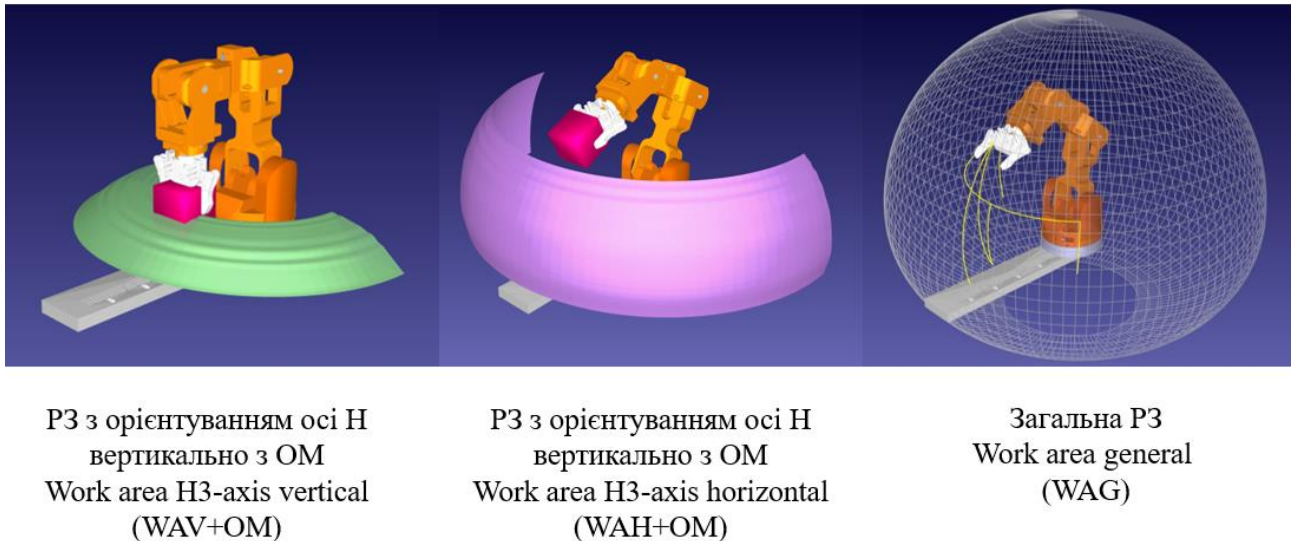


Рис. 4.36 – 3D-візуалізація отриманих результатів атестації метрики МС  
Врассіо WAV, WAH та WAG з ОМ

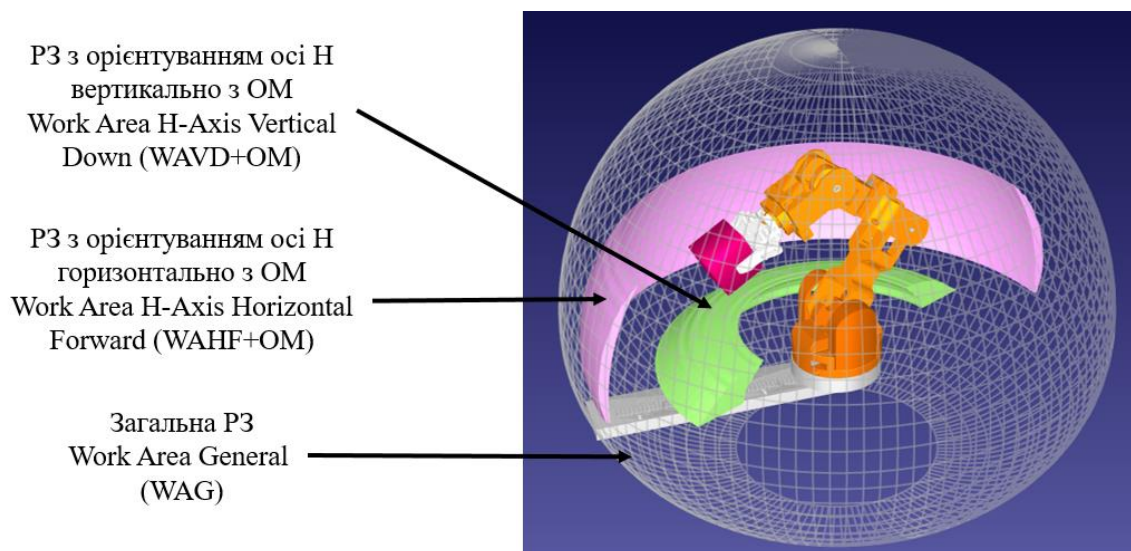


Рис. 4.37 – 3D-візуалізація узагальнених результатів атестації метрики  
МС робота Врассіо WAV, WAH та WAG з ОМ

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.

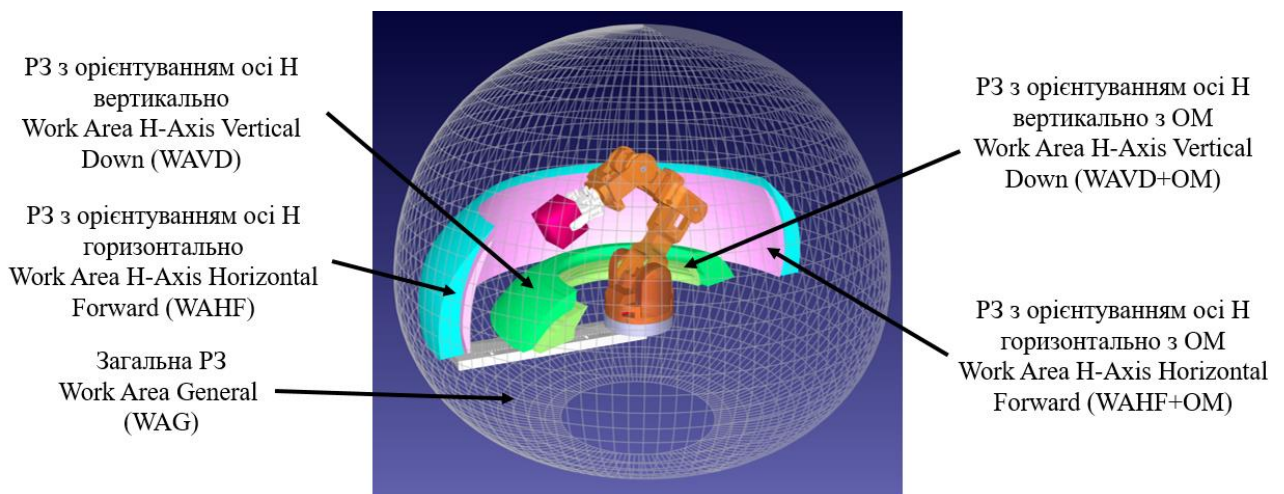


Рис. 4.38 – 3D-візуалізація узагальнених результатів атестації метрики МС робота Врассіо WAVD та WANF як частина WAG з ОМ та без ОМ

Доцільно підкреслити, що у ПР, наприклад, КУКА [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.

Таблиця 4.1

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

№ З/П	$X_{\text{лр}}, \text{mm}$	$Z_{\text{лр}}, \text{mm}$	$M2,^\circ$	$\Delta M2,^\circ$	$\Sigma \Delta M2,^\circ$	$M3,^\circ$	$\Delta M3,^\circ$	$\Sigma \Delta M3,^\circ$	$M4,^\circ$	$\Delta M4,^\circ$	$\Sigma \Delta M4,^\circ$	$\Sigma \Delta M2-4$	$\Sigma$
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



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

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

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

$\Delta M2$  – різниця значення кута  $M2$  на поточній відстані  $X_{пр}$  відносно попереднього значення кута  $M2$  на попередній відстані  $X_{пр}$ . Аналогічно для  $M3$  та  $M4$ ;

$\sum \Delta M2$  – сума накопичень  $\Delta M2$  для кожного інтервалу переміщення. Аналогічно для  $\sum \Delta M3$  та  $\sum \Delta M4$ ;

$\sum \Delta M2-4$  – сума значень різниць кутів повороту ротора двигунів  $M2, M3, M4$ ;

$\Sigma$  – сума накопичень  $\sum \Delta M2, M3, M4$  для кожного інтервалу.

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

Таблиця 4.2

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

№ з/П	$X_{пр}, \text{mm}$	$Z_{пр}, \text{mm}$	$M2, ^\circ$	$\Delta M2, ^\circ$	$\sum \Delta M2, ^\circ$	$M3, ^\circ$	$\Delta M3, ^\circ$	$\sum \Delta M3, ^\circ$	$M4, ^\circ$	$\Delta M4, ^\circ$	$\sum \Delta M4, ^\circ$	$\sum \Delta M2-4$	$\Sigma$
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

## Закінчення таблиці 4.2

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  $M4$ ;

$\Delta M2$  – різниця значення кута  $M2$  на поточній відстані  $L_i$  відносно попереднього значення кута  $M2$  на попередній відстані  $L_{i-1}$ . Аналогічно для  $M3$  та  $M4$ ;

$\sum \Delta M2$  – сума накопичень  $\Delta M2$  для кожного інтервалу. Аналогічно для  $\sum \Delta M3$  та  $\sum \Delta M4$ ;

$\sum \Delta M2-4$  – сума значень різниць кутів  $M2, M3, M4$ ;

$\sum$  – сума накопичень  $\sum \Delta M2-4$  для кожного інтервалу.

На рис. 4.39 зображено графіки залежності  $\Delta M2, \Delta M3$  та  $\Delta M4$ , а також  $\sum \Delta M2, \sum \Delta M3, \sum \Delta M4, \sum \Delta M2-4$  та  $\sum$  від  $X_{\text{пр}}$  (відстані від осі робота) при збереженні мінімальної можливої відстані від основи по координаті  $Z_{\text{пр}}$ .

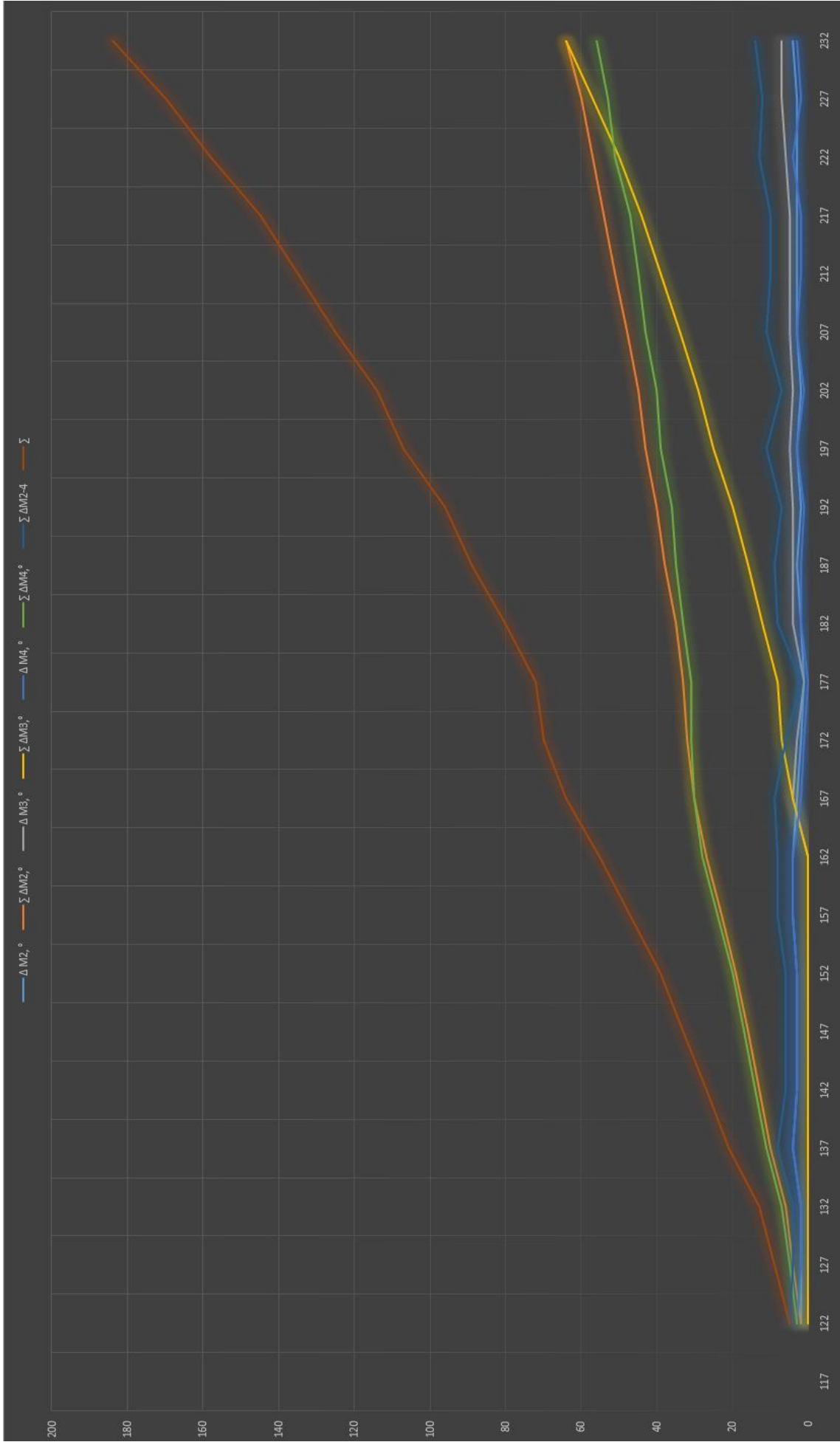


Рис. 4.39 – Визначення кінематичних ресурсів двигунів M2, M3, M4 за даними табл. 4.1



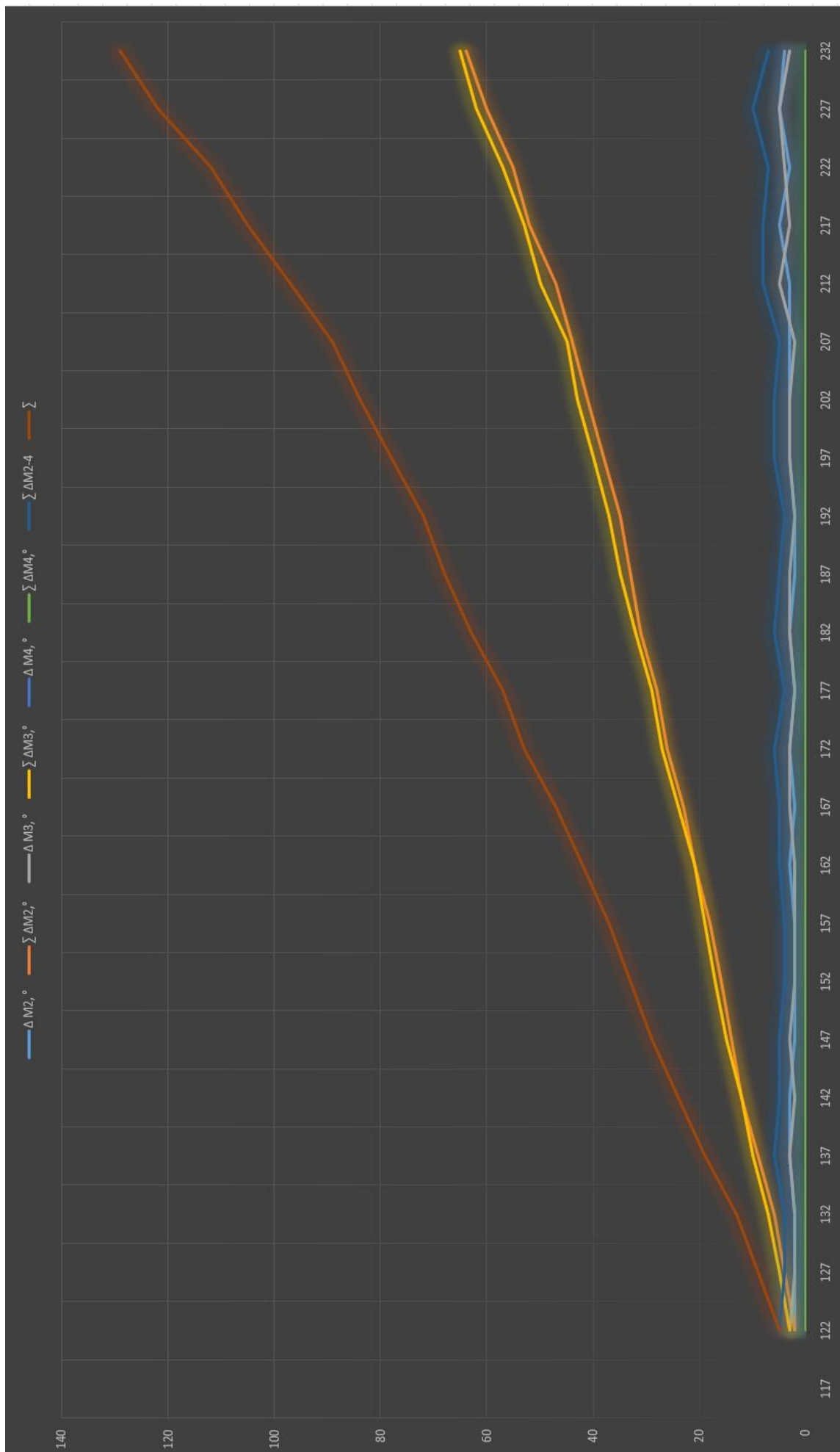


Рис. 4.40 – Визначення кінематичних ресурсів двигунів M2, M3, M4 за даними табл. 4.2

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.

#### 4.4. Висновки за розділом 4

1. Розроблено узагальнений алгоритм роботи методу прийняття технологічних рішень на основі МАІ для пропонованого тривірневого підходу при аванпроектуванні КРМСВ, який доповнив та розширив опис розробленого та пропонованого методичного та інформаційного забезпечення, які висвітлені в розділі 2 та розділі 3. Вище описані алгоритми висвітлюють реалізацію стратегічного рівня L1 та тактичного рівня L2 і є основою для їх програмної реалізації.

2. Висвітлено узагальнений алгоритм роботи МАІ для прийняття технологічних рішень при аванпроектуванні КРМСТ на основі існуючих методичних напрацювань представлених в п. 2.2.1. Це дає можливість сформулювати практичні рекомендації при реалізації рівня L3.

3. На базі запропонованого методичного забезпечення, описаного в розділі 2, висвітлено загальний алгоритм процесу атестації метрики МС КТР як однієї із можливих складових реалізації виконавського рівня L3. Виконане є складовою частиною запропонованого тривірневого підходу і є складовою ТПг КРМСТ.

4. Представлено результати експертного опитування з використанням МАІ на рівнях L1 та L2 при  $|E|=3$  та оброблено отриману інформацію із використанням оригінального ПП FMCSA. Отримані при цьому дані графічно

представлено у вигляді лінійних та пелюсткових діаграм, що дає важливу розгорнуту інформацію людині-проектувальнику на початкових етапах ТПг КРМСВ для подальшого прийняття обґрунтованих технологічних рішень.

5. Запропоновано новий підхід щодо вивчення технологічних можливостей ПР та КПР в частині визначення певних параметрів робочих зон аналізованого робота. Його основою є атестація метрики МС ПР/КПР. Підхід апробовано при атестації метрики робота моделі Врассіо з ОМ у ЗП та без ОМ у ЗП. Отримані результати представлено у вигляді 3D-моделей робочих зон, в яких зберігається задана користувачем орієнтація ЗП з/без ОМ в ЗП у робочій зоні ПР/КПР. Дані результати мають цінність при аванпроектуванні КРТ та відтворюють фрагментарну реалізацію виконавського рівня L3 запропонованого трирівневого підходу.

## НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Загалом подальші дослідження направлені 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 КПП, 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 (КРТ).

2. На підставі проведеного аналізу сутності та стану напрацювань 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 КРТ.

3. Розроблено підхід щодо початкових етапів проектування (авантпроектування) КРМСТ, що системно враховує сутність колаборації, представлену парадигму розвитку колаборативних роботизованих технологій (КРТ) та конструктивно-технологічні особливості об'єктів виробництва. Підхід представлено трирівневою 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 КРТ. 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 аванпроекткування 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 алгоритм для атестації метрики ПР, зміст якого визначається багаторазовим розв'язуванням прямої задачі кінематики на множині конструктивно-кінематичних особливостей ланок МС аналізованого ПР. 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. Результати досліджень впровадженні як складова одного із перспективних напрямків в частині розробки перспективних роботизованих технологій на СП ТОВ «RIF-1», в навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка» при виконанні лабораторного практикуму з навчальної дисципліни «Робототехніка та мехатроніка».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ 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 on-line 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\\_Lightweight\\_robots\\_in\\_manual\\_assembly\\_\\_best\\_to\\_start\\_simply\\_Examining\\_companies'\\_initial\\_experiences\\_with\\_lightweight\\_robots](https://www.researchgate.net/publication/327744724_Lightweight_robots_in_manual_assembly__best_to_start_simply_Examining_companies'_initial_experiences_with_lightweight_robots).

12. Example of Machining Robotic Cell. *UsedRobotTrade 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. С. 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. С. 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. С. 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. С. 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. Kyrylovykh et al. *Proceedings of the Technical University of Sofia*. 2022. № 72. С. 10–14.

24. Automated Attestation of Metrics for Industrial Robots' Manipulation Systems / Kyrylovykh V., Kravchuk A., Melnychuk P., Mohelnytska L. ; in Tonkonogyi V. et al. (ed.). *Advanced Manufacturing Processes II* : Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. С. 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). *ABB official website*. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/robots>.

34. FANUC Robot CRX series datasheet. *Fanuc official website*. 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, Aníbal 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. Головна сторінка, опис програмного продукту RobotMaster. *Офіційний вебсайт програмного продукту*. URL: <https://www.robotmaster.com/en/>.

46. Головна сторінка. *Офіційний веб-сайт операційної системи ROS*. URL: <https://www.ros.org/>.
47. *RobotWorks Homepage*. URL: <http://www.fange.com/RobotWorks.html>.
48. *RobotExpert Homepage*. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/>.
49. Головна сторінка, опис програмного продукту *RobotAnalyzer* : офіційний вебсайт. URL: <http://www.roboanalyzer.com/>.
50. *Офіційний вебсайт програмного продукту RoboDK*. 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*. New York : 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\\_Kyrylovych\\_V.A.pdf](http://rada.kpi.ua/files/aref_Kyrylovych_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*. Belmont : 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. Офіційний вебсайт програмного продукту SolidWorks 3D CAD. URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>.
61. Офіційний вебсайт Tinker Kit Braccio, сторінка опису роботи. URL: <https://store.arduino.cc/tinkerkit-braccio-robot>.
62. 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>.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. 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.

68. 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.

69. 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>.

70. 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.

71. 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.

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

## **ДОДАТКИ**

**СПІЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО У  
ФОРМІ ТОВАРИСТВА З  
ОБМЕЖЕНОЮ  
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "РІФ-1"**

Юр. адреса: 04073, Україна, м. Київ,  
пров. Куренівський, 17.  
код ЄДРПОУ 14339624  
ІПН № 143396226546  
тел. (044)468-30-34.

**ДОВІДКА**

**про впровадження результатів наукового дослідження**

**КРАВЧУКА Антона Романовича**

Дана довідка підтверджує, що науково-практичні результати дисертаційних досліджень КРАВЧУКА А.Р. на тему «Багаторівнева система початкового проектування колаборативних роботизованих механоскладальних технологій», прийняті для майбутнього впровадження як такі, що представляють реальний інтерес для інженерно-технічних працівників, що займаються процесами автоматизації виробництв методами роботизації на СП ТОВ «РІФ-1».

Важливість отриманих в роботі КРАВЧУКА А.Р. наукових досліджень визначено тим, що на підприємстві найближчим часом планується широке впровадження промислових роботів, в тому числі і колаборативних.

Даний документ не є підставою для подальших взаємних фінансових розрахунків.

Генеральний директор  
СП ТОВ "РІФ-1"



Фабіо Альберто РЕГОЗА





МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
 Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005  
 103, Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005  
 Phone/fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015  
 QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015

Від 08.09.2023 № 44-21.00/1121  
 На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

**ДОВІДКА**

**про впровадження результатів наукового дослідження  
 КРАВЧУКА Антона Романовича в освітній процес  
 Державного університету «Житомирська політехніка»**

Засвідчую, що науково-практичні результати дисертаційного дослідження КРАВЧУКА А.Р. на тему «Багаторівнева система початкового проектування колаборативних роботизованих механоскладальних технологій», які полягають в підвищенні ефективності проєктування роботизованих механоскладальних виробництв, що містять колаборативні промислові роботи, за рахунок підвищення обґрунтованості прийняття системних технологічних рішень, використовуються в освітньому процесі Державного університету «Житомирська політехніка» при підготовці фахівців за освітніми ступенями «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Пропозиції впроваджено в освітній процес при викладанні дисциплін «Робототехніка та мехатроніка» та «Обладнання, технологія та автоматизація дискретного виробництва».

Використання результатів дисертаційних досліджень КРАВЧУКА А.Р. свідчать про їх завершеність, реальність та цінність для впровадження в освітній процес закладів вищої освіти.

Довідка видана для представлення до Спеціалізованої вченої ради.

Перший проректор



Оксана ОЛІЙНИК

## Додаток Б

## Стислий опис змісту та ілюстрація методу аналізу ієрархії (МАІ)

Метод аналізу ієрархій – МАІ (analytical hierarchy process – АНР) математичний інструмент системного підходу до вирішення складних та комплексних проблем прийняття рішень. Застосування методу полягає в підтримці прийняття рішень за допомогою ієрархічної композиції завдання та визначення рейтингу альтернативних рішень. Вище вказане забезпечується за допомогою декомпозиції поставленої проблеми або задачі на базові складові: ціль (мета, goal) задачі або проблеми, альтернативи (варіанти рішень, alternatives) та критерії (атрибути, criteries) оцінювання.

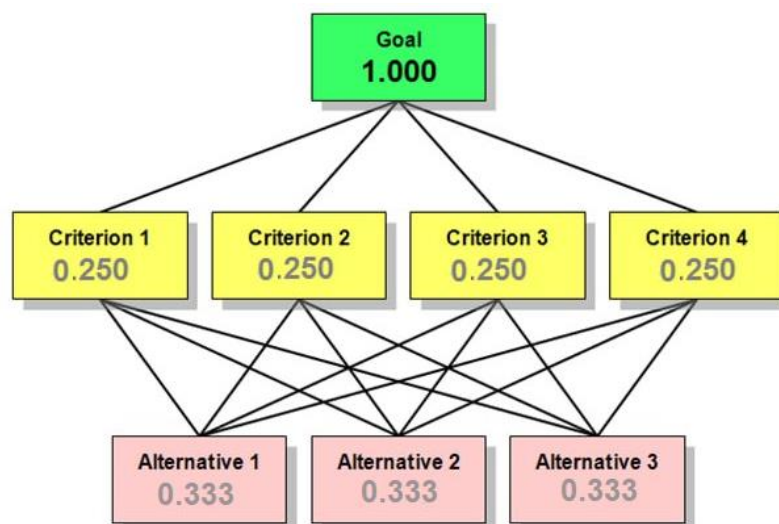


Рис. ДБ.1 – Схематичне зображення ієрархії як основи МАІ

*Етап 4. Оцінювання узгодженості суджень експертів.*

При порушенні однорідності ранг матриці буде відмінний від одиниці і вона буде мати кілька власних значень. Однак при невеликих відхиленнях суджень від однорідності одне з власних чисел буде істотно більшим за інші і приблизно дорівнюватиме порядку матриці. Таким чином, для оцінювання однорідності (узгодженості) суджень експерта необхідно використовувати відхилення величини максимального власного числа від порядку матриці  $n$ .

## Продовження додатку Б

Таблиця ДБ.1

## Шкали попарних порівнянь (ступеня значимості дій)

Рівень переваги	Визначення	Пояснення
1	Відсутність переваги	Внесок альтернатив до цілі однаковий
2	Слабка перевага	
3	Посередня перевага	Досвід та судження трохи сприяють одній з альтернатив над іншою
4	Більш, ніж посередня перевага	
5	Сильна перевага	Досвід та судження сильно сприяють одній з альтернатив над іншою
6	Більш, ніж сильна перевага	
7	Дуже сильна або продемонстрована перевага	Перевага дуже сприятлива до однієї з альтернатив, її домінування продемонстровано на практиці
8	Дуже, дуже сильна перевага	
9	Екстремальна перевага	Докази, що сприяють одній з альтернатив над іншою є найвищим можливим порядком підтвердження
1,1 – 1,9	Значення, близькі до відсутності переваги	Коли альтернативи дуже близькі додання знаків після коми дозволяє показати наявність різниці

Відомо, що узгодженість квадратної додатної обернено-симетричної матриці еквівалентна вимогам рівності її максимального власного значення  $\lambda_{max}$  числу  $n$ .

Можна також оцінювати відхилення від узгодженості різницею  $\lambda_{max} - n$  поділеною на  $(n - 1)$ . Зауважимо, що нерівність  $\lambda_{max} \geq n$  завжди має місце. Наскільки погана узгодженість для певної задачі, можна оцінити шляхом порівняння одержаного значення величини  $(\lambda_{max} - n) \cdot (n - 1)$  з значенням з випадково обраних суджень і відповідних обернених величин матриці того ж розміру.

## Продовження додатку Б

Однорідність (узгодженість) суджень експертів оцінюється індексом однорідності (IO), що дорівнює:

$$IO = (\lambda_{max} - n) \cdot (n - 1). \quad (1)$$

*Етап 5. Ієрархічний синтез для обчислення векторів пріоритетів альтернатив.*

Ієрархічний синтез використовується для зважування власних векторів матриць попарних порівнянь альтернатив вагами критеріїв (елементів), що знаходяться в ієрархії, а також для обчислення суми за всіма відповідними зваженими компонентами власних векторів нижчого рівня ієрархії. Далі розглядається алгоритм ієрархічного синтезу з урахуванням позначень, прийнятих у ієрархії шляхом виконання наступних трьох кроків.

Крок 1. Визначаються вектори пріоритетів альтернатив  $W_{(f_i^j)}^x$  щодо елементів  $f_i^j$  передостаннього рівня ієрархії ( $i=S$ ). Тут через  $f_i^j$  позначені елементи ієрархії, причому верхній індекс  $j$  указує рівень ієрархії, а нижній індекс  $i$  – порядковий номер елемента на рівні. Обчислення множини векторів пріоритетів альтернатив  $W_S^T$  щодо рівня ієрархії  $S$  здійснюється за ітераційним алгоритмом, реалізованим на основі співвідношень обрахунку головного пронормованого вектору  $W$  по вихідним даним, зафіксованим у матрицях попарних порівнянь. У результаті визначається множина векторів:

$$W_S^x = (W_{f_1^S}^x, W_{f_2^S}^x, \dots, W_{f_p^S}^x). \quad (2)$$

Крок 2. Аналогічним чином обробляються матриці попарних порівнянь власне елементів  $f_j^i$ . Дані матриці, побудовані таким чином, щоб визначити перевагу елементів визначеного ієрархічного рівня щодо елементів вищого рівня, з якими вони безпосередньо зв'язані.

## Продовження додатку Б

У результаті обробки матриць попарних порівнянь визначається множина векторів пріоритетів критеріїв:

$$W^f = \left( W_{f_j^i}^f \right). \quad (3)$$

Отримані значення векторів використовуються далі при визначенні векторів пріоритетів альтернатив щодо всіх елементів ієрархії.

Крок 3. Здійснюється власне ієрархічний синтез, що полягає в послідовному визначенні векторів пріоритетів альтернатив щодо критеріїв  $f_j^i$ , які знаходяться на всіх ієрархічних рівнях, крім передостаннього, що містить критерії  $f_j^S$ . Обчислення векторів пріоритетів проводиться в напрямку від нижніх рівнів до верхнього з урахуванням конкретних зв'язків між критеріями, що належать різним рівням. Обчислення проводиться шляхом перемножування відповідних матриць і векторів.

Загальний вид виразу для обчислення векторів пріоритетів альтернатив визначається наступним чином:

$$W_{f_j^i}^X = \left[ W_{f_1^{i-1}}^X, W_{f_2^{i-1}}^X, \dots, W_{f_n^{i-1}}^X \right] \cdot W_{f_j^{i-1}}^f, \quad (4)$$

де  $W_{f_j^i}^X$  – вектор пріоритетів альтернатив щодо критерію  $W_{f_{i-1}^j}^X$ , що визначає  $j$ -ий стовпчик матриці;  $W_{f_{i-1}^j}^X$  – вектор пріоритетів критеріїв  $f_1^{i-1}, f_2^{i-1}, \dots, f_n^{i-1}$ , зв'язаних з критерієм  $f_j^i$  вищого рівня ієрархії.

## Продовження додатку Б

## Приклад прийняття рішень на основі МАІ

Для кращого розуміння МАІ (методу аналізу ієрархій) пропонується розглянути наступний приклад. Існує проблема вибору університету абітурієнтом між 3-ма перспективними варіантами вищих навчальних закладів, а саме умовними університетами: А, В, С. Абітурієнт розглядає можливі варіанти зважаючи на 2 критерії: перший – репутація (R) та другий – місцезнаходження (L). В даному випадку абітурієнт оцінює репутацію (R) в 5 разів вище, ніж місцезнаходження (L) за шкалою попарного порівняння Т. Сааті (табл. ДБ1). Це приводить до того, що репутації приписується приблизно 83%, а місцезнаходженню – приблизно 17% умовної частини від всього об'єму загальної оцінки. Далі використовується процедура системного аналізу для оцінки за цими 2-ма критеріями, після чого отримуємо для оцінки альтернатив (див. табл. ДБ2).

Таблиця ДБ.2

## Оцінки університетів за 2-ма критеріями

Критерії	Університет		
	А	В	С
Місцезнаходження	12,9%	27,7%	59,4%
Репутація	54,5%	27,3%	18,2%

Загалом ця задача має один рівень ієрархії з двома критеріями та три альтернативні рішення.

Для визначення оцінки цих університетів як комбінованого вагового коефіцієнта, для кожного з них необхідно перемножити відповідні значення з рис. ДБ.2 та сумувати їх. Наприклад, оцінимо комбінований ваговий коефіцієнт для університету А.

## Продовження додатку Б

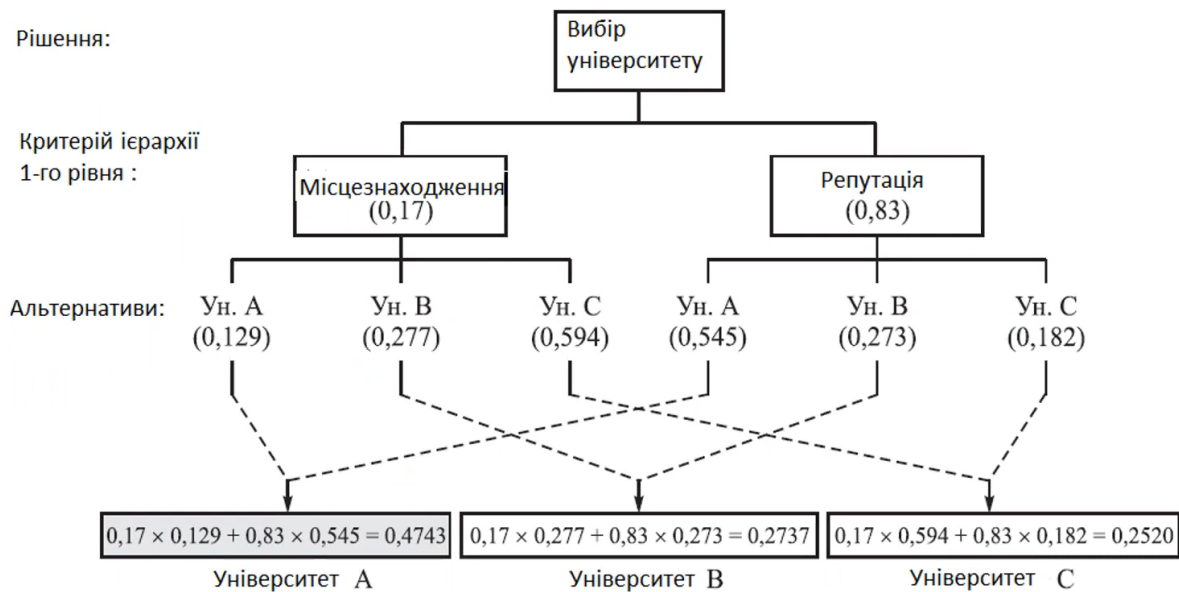


Рис. ДБ1.2 – Схема ієрархії для пропонованого прикладу

Беремо число критерію 1-го рівня (місцезнаходження) – 0,17 та множимо на значення альтернативи – 0,129, те саме робимо для критерію 1-го рівня – місцезнаходження, після чого сумуємо ці два значення та отримуємо:

$$A = 0,17 \cdot 0,129 + 0,83 \cdot 0,545 = 0,4743 \quad (5)$$

Аналогічно розраховуємо комбінований ваговий коефіцієнт для 2-х інших університетів – В та С. Отже ми отримали три значення, за якими можна обрати університет.

З огляду на ці значення оптимальним вибором навчального закладу для абітурієнту за 2-ма критеріями є університет А, як такий, що має найбільш сумарну оцінку (див. табл. ДБ.2).

Повертаючись до табл. ДБ.2 розглянемо як отримати вагові коефіцієнти для обраних критеріїв. Вагові коефіцієнти визначаються за допомогою матриці по парних порівнянь. Кількість рядків співпадає з кількістю стовпців. На діагоналі завжди стоять одиниці, тому що це один і той самий критерій, сам



собою порівнюється. Числа, вписані в матрицю отримані за допомогою шкали попарних порівнянь (ступня значимості дій).

Розглянемо отримання матриці на прикладі з абітурієнтом, де репутація університету в п'ять разів важливіше, ніж місцезнаходження. Дана матриця А має розмірність 2x2, так як маємо всього 2 критерія:

$$A = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{c} L \\ R \end{array} \\ \begin{array}{c} L \\ R \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \\ \hline \begin{array}{cc} 6 & 1,2 \end{array} \end{array} \quad (6)$$

Після чого матриця нормується: по стовпцях знаходиться сума значень, в даному випадку це  $1 + 5 = 6$  та  $1/5 + 1 = 1,2$ . Кожне число в матриці, відповідно до стовпчиків ділиться на знайдену суму, тобто для першого стовпця отримуємо  $1/6 = 0,17$  та  $5/6 = 0,83$ . Аналогічно обчислюються значення для другого стовпця, таким чином знаходиться нова нормована матриця:

$$N = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{c} L \\ R \end{array} \\ \begin{array}{c} L \\ R \end{array} & \begin{bmatrix} 0,17 & 0,17 \\ 0,83 & 0,83 \end{bmatrix} \end{array} \quad (7)$$

Отримана матриця (7) має однакові стовпці та називається ідеально узгоджена, так як наведений приклад є легким, на практиці таке буває не завжди.

Наступним кроком є знаходження середнього значення по рядках:

$$\begin{aligned} W_L &= \frac{0,17 + 0,17}{2} = 0,17; \\ W_R &= \frac{0,83 + 0,83}{2} = 0,83. \end{aligned} \quad (8)$$



**Продовження додатку Б**

Отримані значення 0,17 та 0,83 є ваговими коефіцієнтами для критеріїв місцезнаходження та репутації.

Розрахувавши вагові коефіцієнти для 2-ох критеріїв 1-го рівня ієрархії, необхідно аналогічно обчислити вагові коефіцієнти альтернатив (університет А, університет В та університет С) заданими критеріями. В даному випадку (для критерію місцезнаходження) розмірність матриці буде 3x3:

$$A_L = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 5 & 2 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

[8   3,5   1,7]

Нормування матриці:

$$A_L = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0,125 & 0,143 & 0,118 \\ 0,250 & 0,286 & 0,294 \\ 0,625 & 0,671 & 0,588 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

Середнє значення по рядках:

$$\begin{aligned} W_{LA} &= (0,125 + 0,143 + 0,118)/3 = 0,129; \\ W_{LB} &= (0,250 + 0,286 + 0,294)/3 = 0,277; \\ W_{LC} &= (0,625 + 0,671 + 0,588)/3 = 0,594. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогічні розрахунки проводяться для коефіцієнта 1-го рівня – репутація:

## Продовження додатку Б

$$A_R = \begin{matrix} & A & B & C \\ A & \left( \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 1 \end{array} \right) \\ B & & & \\ C & & & \end{matrix} \quad (12)$$

[1,83    3,67    5.5]

Нормування матриці:

$$A_R = \begin{matrix} & A & B & C \\ A & (0,545 & 0,545 & 0,545) \\ B & (0,273 & 0,273 & 0,273) \\ C & (0,182 & 0,182 & 0,182) \end{matrix} \quad (13)$$

Середнє значення по рядках:

$$\begin{aligned} W_{LA} &= (0,545 + 0,545 + 0,545)/3 = 0,545; \\ W_{LB} &= (0,273 + 0,273 + 0,273)/3 = 0,273; \\ W_{LC} &= (0,182 + 0,182 + 0,128)/3 = 0,182. \end{aligned} \quad (14)$$

Після розрахунків середніх значень по рядках для кожного критерію та альтернативи що отримується, де середні значення переводяться у відсотки. В загальному, МАІ починається з визначення вагових коефіцієнтів як для критеріїв, так і для альтернатив. І тільки після цього розраховується комбінований ваговий коефіцієнт для визначення оптимального вибору, в даному випадку – університет А.

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Kyrylovych V., Kravchuk A., Melnychuk P., Mohelnytska L. Automated Attestation of Metrics for Industrial Robots' Manipulation Systems. *Advanced Manufacturing Processes*: Springer. 2021. P. 813-822. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-68014-5\\_79](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-68014-5_79)

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

3. Кирилович В.А., Мельничук П.П., Кравчук А.Р., Яновський В.А. Термінологічний та змістовний аспекти колаборативної робототехніки: аналіз та рекомендації. *Державний університет "Житомирська політехніка". Технічна інженерія*. 2022. №2 (90). С. 13-21.

4. Кравчук А.Р. Аналіз мовної складової в програмних продуктах колаборативної робототехніки для вирішення технологічних завдань. *Державний університет "Житомирська політехніка". Науковий журнал «Технічна інженерія»*. 2023. №1 (91). С. 50-56.

5. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Трирівневий підхід до початкових етапів проєктування колаборативних роботизованих технологій, *Науковий журнал Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні науки»*, 2023. №4. С. 188-195.

6. Кирилович В.А., Кравчук А.Р., Мельничук П.П. Атестація метрики промислових робіт як напрям підвищення ефективності технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв. *Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент»*, 6–9 листопада 2019 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». С. 118-119.

7. 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 2019 року, м. Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя. С. 190-191.

8. Кирилович В.А., Кравчук А.Р., Гриневич М.С. Щодо атестації геометричних характеристик робочих зон промислових роботів. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології 2019», 18-20 квітня 2019 р. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. С. 126-126.

9. 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 2020 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. С.191-192.

10. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Проблеми використання програмних продуктів для атестації метрики промислових роботів. Тези Всеукраїнської науково-практичної online конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки. м. Житомир, 11–15 травня 2021 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. 646 с. С. 117.

11. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Проблеми промислової колаборативної робототехніки в гнучких механоскладальних виробництвах. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 16-20, 26 травня 2022 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. С. 72. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/06/5-2.pdf>

12. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Проблеми розподілу завдань між людиною та роботом у колаборативних механоскладальних технологіях. Тези Всеукраїнської науково-практичної online конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 15-19 травня 2023 року. Житомир:

Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С. 114.  
URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/3-tendentsiyi-rozvytku-tekhnologiy-v-avtomatyzatsiyi.pdf>

13. Кирилович В.А., Кравчук А.Р. Парадигма розвитку роботизованих колаборативних технологій. Тези доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційно-комп'ютерні технології - 2023", 30-31 березня 2023 року. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С. 198. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/198.pdf>