

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення системи автоматизації
для модульних роботизованих систем виробничного призначення
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи КТРСм-23-2

Сверчков Михайло Олексійович

Спеціальності 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи

Керівник доц. Демська Н. П.

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2025р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Свєрчкову Михайлу Олексійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації для модульних
роботизованих систем виробничного призначення

Затверджена наказом по університету від 25.11.2024 р. № 1239 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 20.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Основні компоненти системи складаються з промислового робота Staubli
TX60 і випарника Varourtec V-10 з програмним забезпеченням від Aitken
Scientific.

3.2 Для розробки було використано систему автоматизованого проектування
SolidWorks

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ _____

4.2 Аналіз предметної області _____

4.3 Аналіз принципів та архітектур модульних робототехнічних систем _____

4.4 Дослідження модульної динаміки робота _____

4.5 Дослідження систем керування модульними самореконфігурованими
роботами _____

4.6 Проектування системи автоматизації з використанням модульних
підходів _____

4.7 Висновки _____

4.8 Додатки _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Графічний матеріал у вигляді презентації – арк. ф. А 4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	25.09.2024	Виконано
2	Аналіз принципів та архітектур модульних робототехнічних систем	02.10.2024	Виконано
3	Дослідження модульної динаміки робота	15.10.2024	Виконано
4	Дослідження систем керування модульними системами	15.11.2024	Виконано
5	Розроблення системи автоматизації з використанням модульних підходів	20.12.2024	Виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	21.01.2025	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	22.01.2025	Виконано
8	Подання роботи на рецензію	23.01.2025	Виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	24.01.2025	Виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	25.01.2025	Виконано

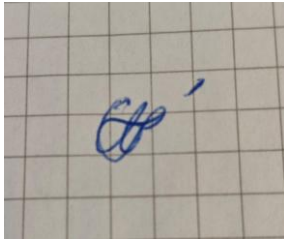
Дата видачі завдання 01.09.2024 р.

Здобувач _____ Свєрчков М. О.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Демська Н. П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

20 січня 2025 р.

A square image showing a handwritten signature in blue ink on a light-colored grid background. The signature is stylized and appears to be 'С.О.'.

Сверчков М. О.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 86 с., 34 рис., 2 дод., 37 джерел.

МОДУЛЬНІ РОБОТИ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ, РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ, МЕХАТРОНІКА, ГНУЧКІ ВИРОБНИЧІ ЛІНІЇ.

Об'єкт дослідження – розроблення робототехної системи, її апаратного та програмного забезпечення, які будуть обчислюваними та змінними для конкретних завдань.

Предмет дослідження – модульний принцип побудови робототехнічної системи.

Мета роботи – розробка системи автоматизації для модульних роботизованих комплексів, що забезпечують високу продуктивність і гнучкість у виробничих процесах, шляхом аналізу сучасних технологій автоматизації та роботизованих систем.

В першому розділі було розглянуто основні принципи та підходи до проектування робототехнічних систем, звернуто увагу на те, що обчислювальна ефективність досягається завдяки паралельним обчисленням і адаптації алгоритмів до змін навколишнього середовища. Також розглянуто важливість децентралізації управління, що підвищує надійність і швидкодію системи, знижуючи витрати.

В другому розділі було проаналізовано принципи і архітектури модульних робототехнічних систем, детально досліджено різні архітектурні підходи, зокрема архітектури слота, шини, секційні системи та ферми. Акцентується на важливості врахування геометричних, динамічних і обчислювальних аспектів при проектуванні. Проведений аналіз підтвердив, що інтеграція різних архітектур та використання сучасних технологій

дозволяє створювати інноваційні модульні системи, які можуть адаптуватися до складних виробничих умов і забезпечувати високу продуктивність.

В третьому розділі досліджено кінематику, динаміку та керування модульними самореконфігурованими роботами засобами matlab. проведені експерименти також дозволили протестувати генератори ходи, які забезпечують синхронізацію активних вузлів у багатотільних структурах.

У результаті розроблена система з відкритим доступом і інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, що вимагало мінімального навчання для користувачів. Автоматизована система була розроблена для вирішення проблеми виконання множинних випаровувань від різних користувачів продуктивність і ефективність різко знижувалися. Система вирішила цю проблему завдяки можливості програмного забезпечення ставити зразки у чергу та автоматично запускати послідовності обробки за допомогою роботизованої системи.

Також, отримані результати роботи можна віднести до цілей сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме до пункту 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 86 pages, 39 pictures, 2 applications, 37 sources.

MODULAR ROBOTS, AUTOMATION, PRODUCTION PROCESSES,
ROBOTIC SYSTEMS, MECHATRONICS, FLEXIBLE PRODUCTION LINES.

The object of the research is the development of a robotic system, its hardware and software, which will be computable and variable for specific tasks.

The subject of the research is the modular principle of building a robotic system.

The purpose of the work is to develop an automation system for modular robotic systems that ensures high productivity and flexibility in production processes by analyzing modern automation and robotics technologies.

In the first chapter, the main principles and approaches to the design of robotic systems were considered, emphasizing that computational efficiency is achieved through parallel computations and the adaptation of algorithms to environmental changes. The importance of decentralized control, which enhances the reliability and speed of the system while reducing costs, was also addressed.

In the second chapter, the principles and architectures of modular robotic systems were analyzed, and various architectural approaches, such as slot, bus, sectional systems, and trusses, were thoroughly examined. Emphasis was placed on the importance of considering geometric, dynamic, and computational aspects in design. The analysis confirmed that the integration of different architectures and the use of modern technologies enable the creation of innovative modular systems capable of adapting to complex production environments and delivering high performance.

In the third chapter investigated the kinematics, dynamics, and control of modular self-reconfigurable robots using MATLAB tools. Experiments conducted

also made it possible to test gait generators that ensure synchronization of active nodes in multi-body structures.

As a result, a system with open access and an intuitive interface was developed, requiring minimal training for users. The automated system was designed to address the issue of performing multiple evaporations from different users, where productivity and efficiency were significantly reduced. The system resolved this issue by enabling the software to queue samples and automatically initiate processing sequences through the robotic system.

Also, the results of the work can be attributed to the Sustainable Development Goals 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely to item 9.4 "Promote the accelerated development of high- and medium-high-tech sectors of the processing industry, which are formed on the basis of the use of the "education – science – production" chains and a cluster approach in the following areas: development of information and telecommunications technologies (ICT); application of ICT in agroindustrial complex, energy, transport and industry; high-tech mechanical engineering."

ЗМІСТ

Перелік скорочень	10
Вступ.....	11
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Особливості проектування робітв	12
1.2 Методи та принципи проектування засобів робототехніки	16
1.3 Висновки до першого розділу.....	23
2 Аналіз принципів та архітектур модульних робототехнічних систем	25
2.1 Аналіз архітектурних груп	27
2.2 Апаратне забезпечення	32
2.3 Архітектура розподіленого керування.....	38
2.4 Програмне забезпечення та управління.....	39
2.5 Планування та контроль реконфігурації	41
2.6 Висновки до другого розділу	42
3 Дослідження систем керування модульними системами	44
3.1 Побудова моделей аналітичним або чисельним способами.....	44
3.2 Оцінка багатотільних систем	46
3.3 Керування багатокорпусними системами	48
3.4 Висновки до четвертого розділу.....	51
4 Проектування системи автоматизації з використанням модульних підходів.....	52
4.1 Вхідні дані до проектування системи	52
4.2 Етап проектування	52
4.3 Програмне забезпечення “Evaporate Express”	61
4.4 Серверна програма	65
4.5 Правила безпеки при роботі системи.....	67
4.6 Програмування робота Staubli	68
4.7 Висновки до четвертого розділу.....	70

Висновки	72
Перелік джерел посилання	73
Додаток А Абробачія наукових результатів досліджень.....	77
Додаток Б Демонстраційний матеріал	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

DOF (degree of freedom) – ступінь свободи;

MRR (modular reconfigurable robot) – модульний реконфігурований робот;

SMA (shape-memory alloy) – сплав із пам'яттю форми.

ВСТУП

Сучасне виробництво стрімко змінюється під впливом новітніх технологій, які дозволяють підвищувати ефективність, продуктивність та адаптивність до різних умов. Одним із найперспективніших напрямків у цій галузі є використання модульних роботизованих систем, які здатні швидко адаптуватися до змін середовища і вимог виробництва. Інтеграція таких систем у гнучкі виробничі лінії відкриває нові можливості для оптимізації технологічних процесів і зниження витрат [1].

Модульні роботи, завдяки своїй універсальності та масштабованості, дозволяють вирішувати широкий спектр завдань, починаючи від простих маніпуляцій і закінчуючи виконанням складних виробничих процесів. Важливим аспектом є також автоматизація управління цими системами, що забезпечує їхню безперебійну роботу, ефективність і мінімізацію людського втручання.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю розробки інноваційних систем автоматизації, здатних відповідати сучасним вимогам промисловості. Це включає підвищення продуктивності, забезпечення гнучкості виробничих процесів і інтеграцію нових технологій, таких як штучний інтелект та децентралізоване управління.

Метою цієї роботи є розробка системи автоматизації для модульних роботизованих комплексів, що забезпечують високу продуктивність і гнучкість у виробничих процесах, шляхом аналізу сучасних технологій автоматизації та роботизованих систем. У процесі дослідження проаналізовано основні принципи проектування робототехнічних систем, різноманітні архітектури модульних роботів, а також методи управління і моделювання динаміки систем. Отримані результати можуть бути використані для впровадження новітніх технологій.

Робота виконана згідно [2], [3]. Результати роботи опубліковані в [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Особливості проектування роботів

Існує два основних підходи до проектування робототехнічних систем в умовах невизначеності: модульний підхід і наскрізний підхід до проектування.

При модульному підході до проектування функції (або модулі), які керують поведінкою робота такі як сприйняття, прогнозування, планування та контроль, розробляються індивідуально. Ці системи пропонують чіткі структури і зрозумілу поведінку, на яку можна легко впливати і вдосконалювати [5].

З іншого боку, наскрізні підходи до проектування використовують досягнення штучного інтелекту для вивчення наскрізних політик роботів, тобто складних функцій, представлених нейронними мережами, які отримують нейронними мережами, які отримують показання датчиків з навколишнього середовища і безпосередньо виводять команди управління.

Однак важко визначити, як різні зміни в навколишньому середовищі або поведінка зовнішніх агентів (наприклад поведінки зовнішніх агентів (наприклад, взаємодіючої людини) впливають на наскрізні рішення політики; складно визначити, як різні зміни в навколишньому середовищі або рішення наскрізної політики; може бути складно надати гарантії безпеки або узагальнити наскрізну політику на інші середовища.

Враховуючи компроміси цих підходів до проектування, модульні підходи до проектування підходи до проектування широко застосовуються в промисловості та академічних колах для роботизованих систем у невизначеному середовищі з людською взаємодією.

Залежно від конкретного застосування робототехніки зупинемось на трьох важливих аспектах продуктивності модульних робототехнічних систем

та їхніх викликах [5]:

– обчислювальна ефективність: у невизначеному середовищі робот повинен швидко реагувати на несподівані події, а отже, обчислювальна швидкість кожного модуля має вирішальне значення. Окремі алгоритми в кожному модулі повинні бути розроблені відповідно до застосування і використовувати технологію паралельних обчислень. Крім того, робот може використовувати різні алгоритми для різних сценаріїв, щоб ефективніше реагувати на зміни навколишнього середовища. Тому модулі повинні мати можливість стратегічного використання різних алгоритмів;

– безпека: здатність уникати зіткнень зі статичними та динамічними перешкодами безпосередньо пов'язана з безпекою робота та його оточення. У невизначеному середовищі, де рух рухомих перешкод важко передбачити, безпека є критично важливою, але складною задачею. Модулі сприйняття і модулі сприйняття і прогнозування повинні бути точними, планувальник повинен знайти безпечний план, а контролер повинен точно виконати план.

Теоретично, результат планування залишатиметься безпечним під час виконання, якщо сприйняття і передбачення будуть досконалими. Однак досконале сприйняття і передбачення рідко буває можливим, тому спеціальні конструкції і стратегії для модулів, які б спільно забезпечували безпеку без досконалого сприйняття та прогнозування, необхідні спеціальні розробки та стратегії для модулів, які б забезпечували безпеку без досконалого сприйняття та прогнозування. Наприклад, предиктор повинен надати планувальнику результат прогнозу з історією помилок прогнозування планувальнику; планувальник повинен враховувати роботу прогнозиста на основі історії помилок прогнозування, щоб уникнути надмірної впевненості в результатах прогнозування;

– оптимальність руху робота: щоб роботи працювали оптимально відповідно до відповідно до конкретних завдань. Час виконання завдання, відстань переміщення, споживання енергії та покриття зони переміщення – типові показники, які робот мінімізує для досягнення оптимальності руху. У

статичних і детермінованих середовищах оптимальність руху залежить від від планувальника, який знаходить оптимальний план з урахуванням поставлених цілей, і від контролера, який точно виконує цей план. Однак у динамічних і невизначених середовищах оптимальність руху залежить від того, наскільки точно контролер виконає план (рис. 1.1).

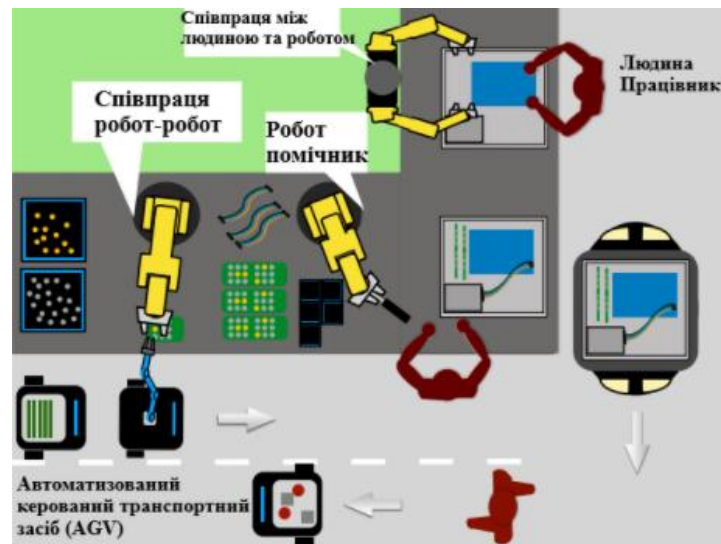


Рисунок 1.1 – Застосування робототехнічних систем у невизначених умовах [5]

Основна особливість і складність в проектуванні роботів – це обмежені можливості декомпозиції на автономно проєктовані частини внаслідок їх взаємозв'язаної при визначенні ряду основних характеристик робота і необхідності при цьому системного підходу до робота як до єдиного цілого. Вище вже говорилося про такий системний підхід у зв'язку з необхідністю розгляду робота спільно з об'єктами зовнішнього середовища [5].

При проектуванні перших роботів спершу створювалися їх виконавчі пристрої, а потім для них як заданих об'єктів управління проєктувалися засоби управління.

Нині застосовують новий підхід до розробки, де основною метою проєктування є створення робота з бажаними кінематичними характеристиками та відповідністю.

Це досягається за допомогою інтегрованого підходу до оптимізації конструкції, де зазвичай розглядаються кінематика, динаміка, конструкція трансмісії та аналіз міцності за допомогою аналізу кінцевих елементів. При такому підході кінематичні розміри, структурні розміри, а також двигуни та коробки передач параметризовані як змінні конструкції.

Обмеження сформульовані на основі кінематичних характеристик, динамічних вимог і обмежень міцності конструкції, тоді як основною метою є мінімізація ваги [5].

Характерний приклад – це завдання мінімізації маси маніпуляторів. Великі можливості тут дає перехід від традиційного розрахунку механічної частини на жорсткість з обмеженням пружних деформацій ланок до розрахунку тільки на міцність зі зняттям цих обмежень. Це дозволяє приблизно втричі зменшити масу механічної системи маніпуляторів.

Проте гнучкість конструкції, що виникає при цьому, і викликане нею коливання істотно ускладнюють завдання управління рухом таких маніпуляторів і відповідно технічні вимоги до облаштування управління (рис. 1.2).

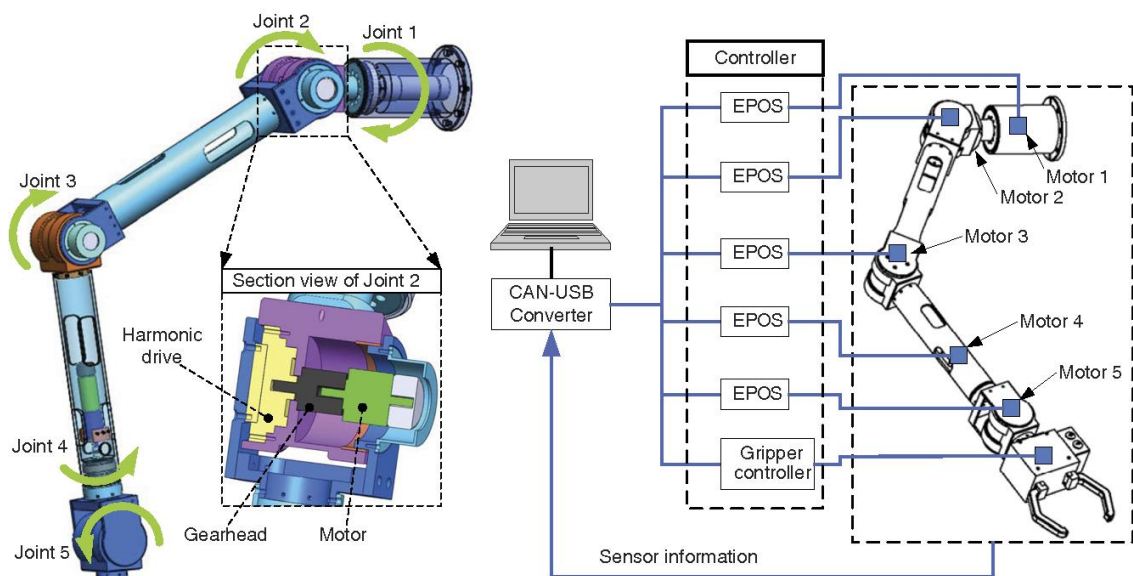


Рисунок 1.2 – CAD-візуалізація маніпулятора та системи керування [6]

Наслідком такого системного підходу до проектування робіт є наступні принципи їх створення [7]:

- децентралізація управління аж до конструктивного вбудовування пристроїв управління окремими частинами механічної системи в ці частини. Це дозволяє здешевити усю систему в цілому, підвищити її надійність і швидкодію за рахунок скорочення зв'язків, розпаралелювання і ієрархічної побудови інформаційних процесів і процесів управління. Для таких систем розроблені різні варіанти структур з сильними і із слабкими зв'язками (розподілені системи), а також методи їх проектування;

- необхідність забезпечення значно більшої надійності управління, чим зазвичай вважається прийнятним для інших подібних типів об'єктів. Це викликано тим, що в цих системах відмова управління, як правило, веде до аварії усєї системи;

- широке застосування комп'ютерного моделювання без чого такі складні системи, як правило, не можуть бути створені на сучасному науково-технічному рівні.

1.2 Методи та принципи проектування засобів робототехніки

1.2.1 Уніфікація

В основі усіх методів проектування техніки лежить уніфікація. Проектування нового виробу – це завжди суперечливе завдання для розробника: з одного боку існує природне прагнення використати усі останні досягнення науки і техніки в цій області, з іншої – цьому перешкоджають обмеження по термінах, вартості, матеріальним ресурсам та ін., обумовлені зазвичай в технічних вимогах до створюваного виробу [7].

Відповідно швидко росте номенклатура робіт. Вже сьогодні кількість необхідних типів робіт тільки загальнопромислового застосування вимірюються сотнями. У зв'язку з цим одним з найважливіших завдань робототехніки є комплексна уніфікація і стандартизація робіт і їх

компонентів.

За визначенням міжнародної організації по стандартизації, стандартизація – це встановлення і застосування правил з метою впорядкування діяльності в певній області. Сюди, зокрема, входить встановлення одиниць величин, термінів і позначень, вимог до продукції, технологічних процесів, техніки безпеки [7].

Уніфікація – це найбільш ефективний метод стандартизації, що полягає в раціональному скороченні числа об'єктів однакового функціонального призначення з метою підвищити продуктивність праці і економічність виробництва і експлуатації, поліпшити якість і забезпечити взаємозамінюваність.

У робототехніці уніфікація розвивається по трьох рівнях: для компонентів роботів, для власне роботів і для роботизованих технологічних комплексів [7].

Добре відпрацьовані і серійно виготовлені уніфіковані компоненти – по суті єдино можлива основа розвитку робототехніки в умовах згаданого вище швидкого зростання номенклатури роботів з урахуванням необхідності при цьому оперативного створення, освоєння виробництва і експлуатації нових типів роботів і їх модифікацій.

1.2.2 Модульність

Створення уніфікованих функціональних компонентів роботів стало першим етапом уніфікації в області робототехніки. Її наступним етапом стала уніфікація конструкції цих компонентів і програмного забезпечення на основі модульного принципу побудови.

Суть цього принципу полягає в побудові механічних, апаратних і програмних частин робота з дрібніших уніфікованих частин – модулів, які дозволяють здійснювати різні компонування з деякого їх набору. Система таких модулів будується за ієрархічним принципом, коли складніші модулі складаються з дрібніших модулів. Наприклад, привід виконаний у вигляді

модуля, є готовою конструктивною частиною для складання маніпуляторів і облаштувань пересування, пристосованого для з'єднання з модулями іншого функціонального призначення [7].

При цьому у свою чергу він складається з ряду модулів, які дозволяють збирати різні модифікації цього типу приводу.

Модульний принцип побудови роботів дозволяє найлегше створювати їх модифікації і абсолютно нові типи на базі одних і тих же конструктивних частин.

При цьому виникає можливість у кожному конкретному випадку найбільш оптимально вибирати міру кінематичної, апаратної і програмної надмірності, вартість і розподіл функції між роботом і працюючим разом з ним технологічним устаткуванням(аж до конструктивного об'єднання окремих модулів робота з цим устаткуванням) [7].

Модуль – це група компонентів, які мають спільні характеристики. Модульність полягає в тому щоб розділити систему на незалежні модулі, які можна розглядати як логічні одиниці. Взаємодія модулів дуже важлива при що характеризує модульність. існує три різних типів модульність, пов'язана з сімействами продуктів: функціональними, технічними та фізичними модульність.

Функціональна модульність фокусується на взаємодії функціональних вимог до різних груп клієнтів, тобто кожна група клієнтів охарактеризована за певним набором функціональних вимог.

Технічна модульність визначається технологічна можливість конструктивного рішення. В основному взаємодія визначається конструктивними параметрами як здатність задовольняти функціональні вимоги.

Фізична модульність базується на фізичних взаємодіях, з конструкційної точки зору.

Для прикладу розглянемо функціональні модулі орто-гексаедра (рис. 1.3), розроблені в єдиному розмірі. Завдяки регулярній геометричності

модуля робота його форма та просторово-заповнювальний характер можуть бути об'єднані в стабільну загальну конфігурацію [8].

Різні функціональні модулі інтегровані в різні функціональні конфігурації роботів використовуючи комбінацію активних і пасивних з'єднань, як показано на рис. 1.3.

Функціональні модулі можна розділити на проміжні функціональні модулі, модулі гойдання, функціональні модулі обертання, функціональні модулі затискання тощо. Крім того, деякі допоміжні модулі реалізують конкретні завдання, такі як сенсорні модулі, модулі з функцією компенсації, модулі моніторингу та ідентифікації тощо.

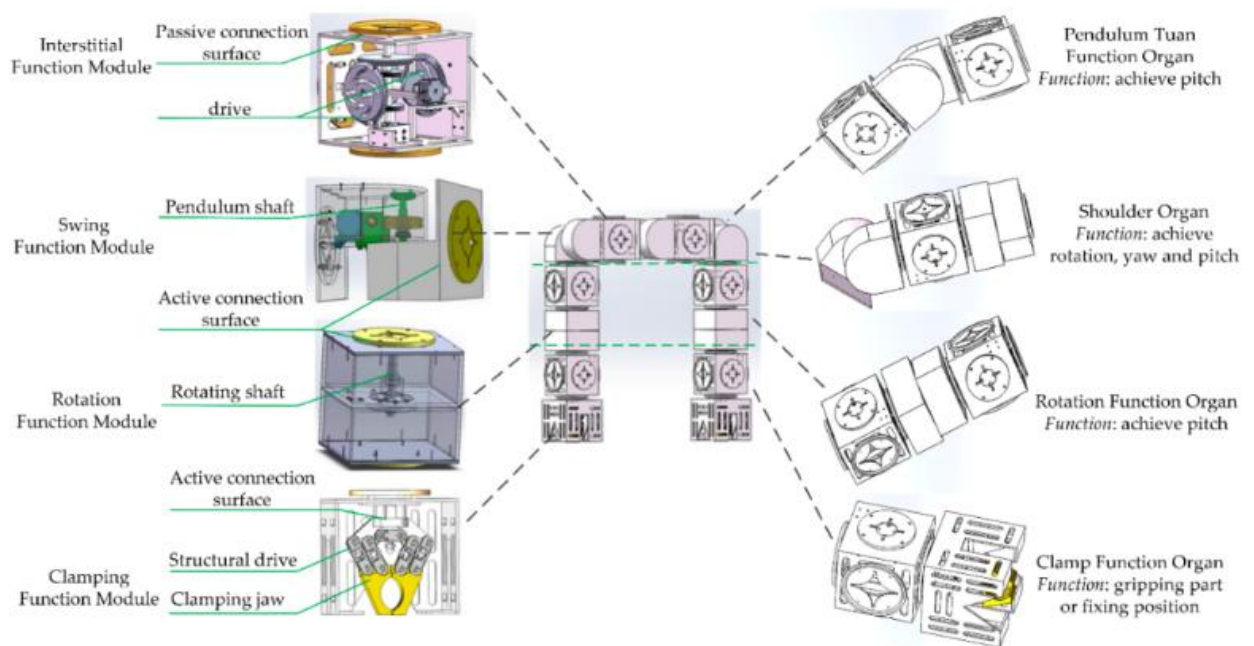


Рисунок 1.3 – Модульний склад робота-реконфігуратора [5]

Насправді програмне забезпечення та апаратне забезпечення (з точки зору доступності та максимального корисного навантаження) є бар'єром гнучкості сучасних промислових роботів. З іншого боку, дослідники та промисловість наразі докладають зусиль для розробки модульних роботів (з точки зору апаратного та програмного забезпечення), які є обчислюваними та змінними для конкретних завдань.

У цьому контексті робота [8] спрямована на розробку нової методології

проектування, яка поєднує як представлення знань для визначення завдань, так і обчислювальні інструменти для структурного та логічного проектування з використанням модульних одиниць.

Щоб продемонструвати його придатність у промисловому контексті, що потребує можливості реконфігурації, було розроблено спеціальні розробки та перевірено на простому корпусі (рис. 1.4).

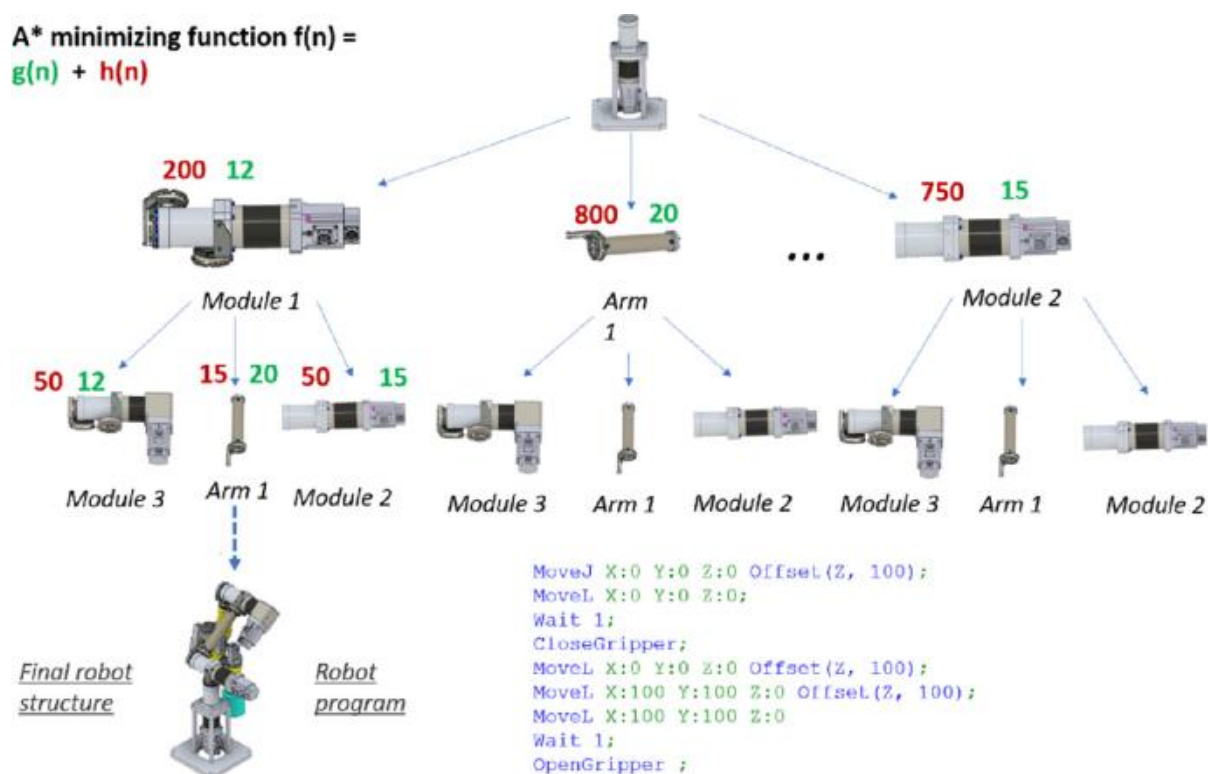


Рисунок 1.4 – Зважений графік із кращим шляхом визначення остаточної структури модульного робота та її відповідна програма [5]

Сьогодні модульний принцип побудови роботів успішно використовується усіма провідними фірмами, що виробляють роботи, у тому числі «Юнімейшен» і «Праб» (США), «Міцубісі» і «Фанук» (Японія), «Фольксваген» і «Бош» (Німеччина), «Сіаки» (Франція), «Оливетті» (Італія), «АСЕА» і «Електролюкс» (Швеція).

1.2.3 Моноблочний і агрегатно-модульний принципи

Разом з цим принципом існують і інші принципи побудови промислових роботів, теж ґрунтовані на ідеї уніфікації, – це принцип моноблочний і агрегатно-модульний.

Моноблочний принцип передбачає побудову маніпулятора у вигляді нерозривного кінематичного ланцюга, що утворений кінематичними ланками маніпулятора, з'єднаних ротаційними шарнірами, а самі ланки нагадують передпліччя, лікоть, кисть руки людини, що й надає конструкції антропоморфного характеру [7].

Агрегатно-модульний принцип побудови ПР (рис. 1.5) передбачає створення маніпулятора з окремих виконуючих і технологічних конструктивних модулів, кожен з яких може бути вилучений або замінений іншим модулем залежно від технологічного завдання і необхідного числа ступенів рухомості маніпулятора.

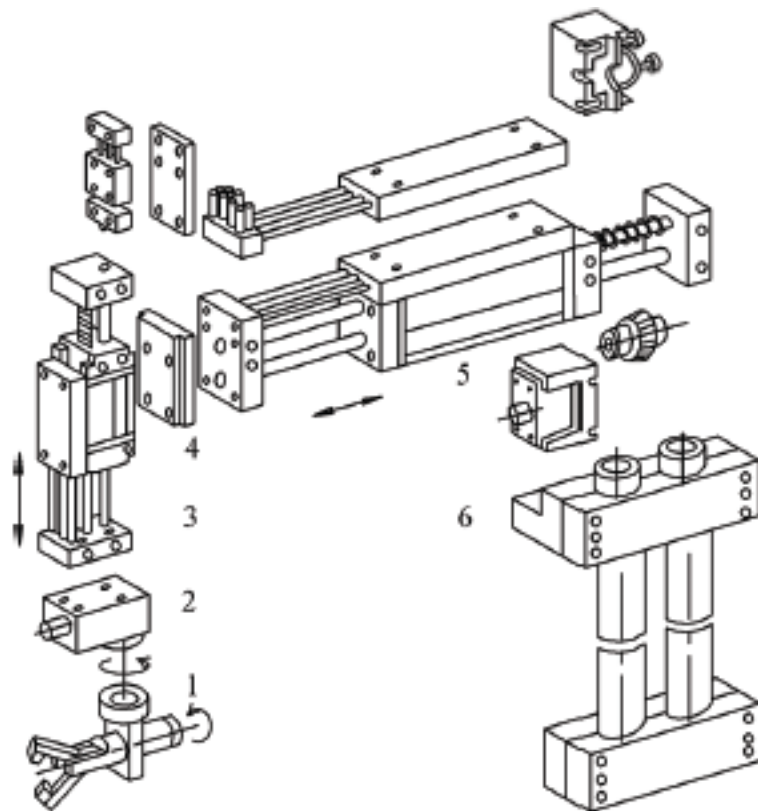


Рисунок 1.5 – Блоки агрегатно-модульного маніпулятора [7]

Агрегатне виконання не тільки технологічних, але й транспортних модулів ПР дозволяє створювати спеціалізовані роботи, призначені для виконання конкретних технологічних операцій.

Незважаючи на трудомісткість переналадження таких роботів вони значно дешевше, ніж моноблочні універсальні ПР. Приклад агрегатно-модульного маніпулятора (рис. 1.5) ілюструє можливість комбінації різних захватних пристроїв 1 з модулями ротації 2, підйому 3 і горизонтального переміщення 5, з'єднаних стикувальним пристроєм 4 і встановлених на стійці 6. Як видно з рис. 1.5, кожний з модулів може бути при необхідності вилучений або замінений іншими модулями. Зазначені транспортні й технологічні модулі агрегатних ПР попередньо створюються на основі типових групових технологічних процесів. Потім конструктором, на основі конкретного технологічного процесу відповідно до операційної карти, вибирається те чи інше сполучення модулів агрегатного ПР. Завдання наладчика полягає в складанні зазначених модулів за допомогою уніфікованих стикувальних пристроїв, регулюванню відносного положення модулів з наступною їхньою фіксацією.

Далі, залежно від типу системи керування, наладчиком проводиться набір заданої програми, її тестування й відпрацьовування робочих циклів ПР на холостому ході. Останню операцію спочатку рекомендується виконувати в налагоджувальному режимі, і реалізувати програму по окремих командах, повідомлюваних роботу вручну з пульта його керування, а потім у режимі автоматичного циклу [7].

Агрегатне виконання функціональних модулів ПР властиво не тільки стаціонарним роботам, але й порталним (рис. 1.6). Причому, як видно з рисунку, ідентичність систем координат для різних компонок визначає й менший набір модулів.

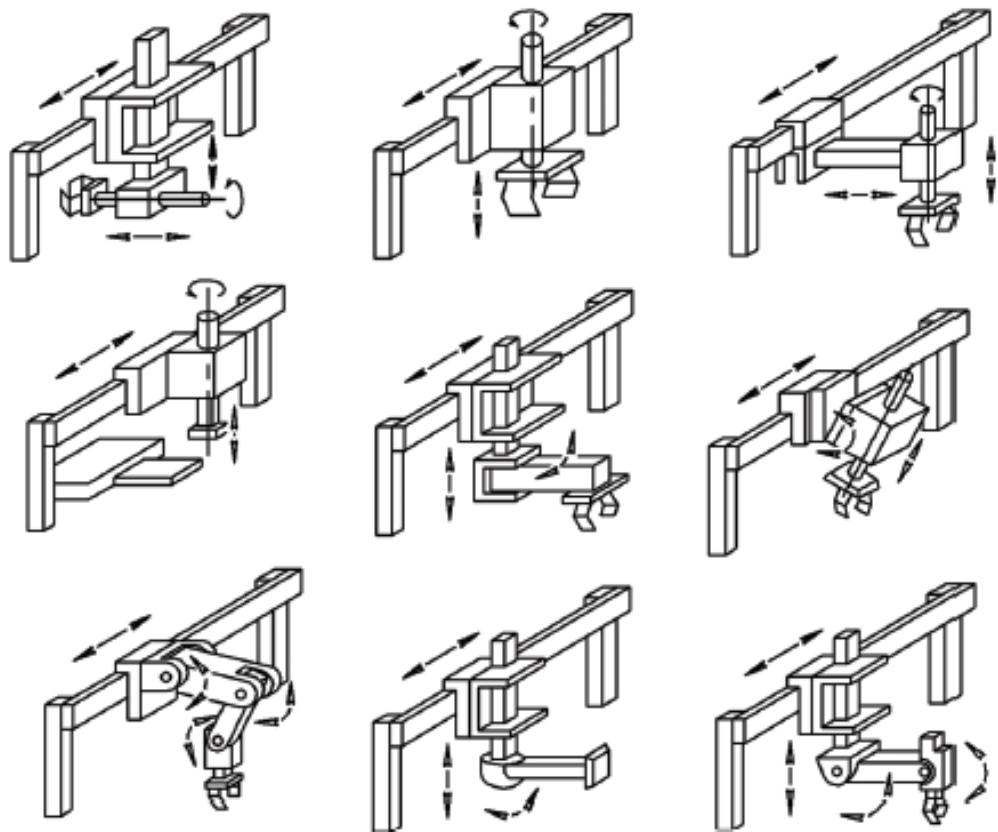


Рисунок 1.6 – Типові компоновки порталних ПР [7]

Тому перш, ніж здійснити вибір необхідних модулів, слід правильно вибрати систему координат робочої зони маніпулятора. Бажано, щоб конфігурація робочої зони маніпулятора була ідентична робочій зоні технологічного встаткування. Незалежно від моделі всі компоновання порталних ПР містять модуль транспортного переміщення маніпулятора по балці порталу.

1.3 Висновки до першого розділу

У цьому розділі розглядаються основні принципи та підходи до проектування робототехнічних систем. Одним із важливих напрямків є модульний підхід, який виявляє високу ефективність у змінних умовах завдяки чіткій структурі, можливості удосконалювати окремі модулі та забезпеченню безпеки. Також згадано, що підхід на основі штучного

інтелекту має значний потенціал, хоча й стикається з труднощами в прогнозуванні, забезпеченні безпеки та застосуванні нових рішень у різних умовах.

Звернуто увагу на те, що обчислювальна ефективність досягається завдяки паралельним обчисленням і адаптації алгоритмів до змін навколишнього середовища. Безпека роботів забезпечується завдяки злагодженій роботі різних модулів, таких як сприйняття, прогнозування, планування і управління, а оптимальність руху залежить від точності виконання плану та здатності адаптуватися до динамічних умов. Проектування систем з урахуванням їх взаємодії з навколишнім середовищем дозволяє інтегрувати кінематику, динаміку і міцність конструкції.

Також розглянуто важливість децентралізації управління, що підвищує надійність і швидкодію системи, знижуючи витрати. Широке застосування комп'ютерного моделювання дозволяє створювати ефективні конструкції з використанням сучасних технологій. Що стосується методів проектування, то уніфікація забезпечує створення серійних компонентів, що сприяє їх взаємозамінності, економічності і високій якості. Модульний принцип дозволяє створювати різні типи роботів з використанням уніфікованих частин, забезпечуючи гнучкість і адаптивність. Моноблочний і агрегатно-модульний принципи сприяють підвищенню надійності і функціональності, враховуючи специфічні вимоги галузі.

Таким чином, розглянуті підходи, принципи і методи проектування дають змогу створювати ефективні, надійні та адаптивні робототехнічні системи, які відповідають сучасним вимогам.

2 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ТА АРХІТЕКТУР МОДУЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У проєктуванні робототехнічних систем модульність можна розділити на три підтипи [9]:

– архітектура слота: кожен інтерфейс між компонентами має різний тип, тому різні компоненти в продукті не можуть бути взаємозамінними. Багато продуктів і більшість роботів є модульними. Наприклад, фен може мати модульні елементи (нагрівальна спіраль, рама, крильчатка); рука робота матиме двигуни, трансмісію, жорсткі ланки, датчики та обчислення;

– архітектура шини: існує спільна шина, до якої інші фізичні компоненти підключаються через інтерфейс того самого типу. Портативний комп'ютер із USB-портами формує загальний інтерфейс, до якого можна додавати або переставляти модульні елементи;

– секційна архітектура: усі інтерфейси одного типу, і немає єдиного елемента, до якого приєднуються всі інші компоненти, тобто немає базового компонента. Збірка складається шляхом з'єднання компонентів один з одним через ідентичні інтерфейси. Прикладом є секційні дивани, а також системи LEGO. У секційній архітектурі варіативність системи значно посилюється секційною модульністю [9].

Четвертий тип модульності в робототехніці можна додати, якщо розглядати кожного робота в групі від'єднаних мобільних роботів (рій) як модуль. Ці системи мають спільні проблеми з розподілом завдань, але те, що вони фізично не підключені, значно змінює здатність застосовувати сили до середовища та змінює обмеження для контролю.

Системи модульної реконфігурованої робототехніки (MRR – Modular reconfigurable robot) мають три перспективні області:

– універсальність: системи зазвичай мають багато надлишкових ступенів свободи (DOF – degree of freedom) і можуть адаптувати свої

конфігурації для виконання широкого кола завдань;

- надійність: резервування та самопереналаштування можна використовувати для самостійного відновлення, підвищуючи надійність;
- низька вартість: повторювані модулі означають, що економія на масштабі може бути використана для зниження вартості цих модулів.

На жаль, на сьогодні доведено лише одне з трьох – універсальність. У [10] є приклади систем MRR, які виконують сотні завдань з пересування та маніпулювання. Однак ці дослідницькі прототипи не надто надійні, і їх вартість зазвичай коливається від кількох сотень до кількох тисяч доларів США за кожен модуль.

За геометричним розташуванням блоків системи MRR можна класифікувати на кілька архітектурних груп [9]:

- архітектури реконфігурації решітки: Архітектури реконфігурації решітки мають одиниці, розташовані в регулярній тривимірній структурі, наприклад, кубічна кристалічна решітка або упаковка без кульок. Ці системи використовують цю закономірність, щоб полегшити обчислювальні аспекти реконфігурації;

- ланцюгові архітектури: ланцюгові архітектури характеризуються одиницями, які утворюють послідовні ланцюги. Ці ланцюги часто з'єднуються, утворюючи дерево або замкнуті петлі ланцюга. Завдяки артикуляції ланцюгові архітектури потенційно можуть досягати будь-якої точки або орієнтації в просторі, і тому вони більш універсальні. Загалом, однак, вони більш вимогливі до представлення та аналізу обчислювальних засобів і складніші для контролю;

- мобільні архітектури: у мобільних архітектурах є одиниці, які використовують середовище для маневрування та можуть з'єднуватися, щоб утворювати складні ланцюги, решітки або низку вторинних роботів, які можуть виконувати поведінку, подібну до рою.

Почав з'являтися четвертий клас MRR: реконфігуровані ферми. Ці системи не вписуються в решітчастий, мобільний або ланцюговий стиль

(послідовні ланцюжки не є невід'ємною частиною системи). Натомість призматичні елементи утворюють паралельні ферми, які можуть змінювати конфігурацію, змінюючи топологію мережі. Крім того, гібридні системи часто можуть використовувати найкращі властивості кількох різних архітектур [9].

Почав з'являтися четвертий клас MRR: реконфігуровані ферми. Ці системи не вписуються в решітчастий, мобільний або ланцюговий стиль (послідовні ланцюжки не є невід'ємною частиною системи). Натомість призматичні елементи утворюють паралельні ферми, які можуть змінювати конфігурацію, змінюючи топологію мережі. Крім того, гібридні системи часто можуть використовувати найкращі властивості кількох різних архітектур.

2.1 Аналіз архітектурних груп

2.1.1 Мобільна архітектура

Мобільні архітектури реконфігурації також використовують переваги мобільності повітря та води [11]. Одним із прикладів є реконфігурована система плавучої конструкції під назвою *Tactically Expandable Maritime Platform* (TEMP), яка була описана в [12]. Робота наголошувала на системних проблемах десятків модулів, що приєднуються у відкритому морі, демонструючи велику кількість невизначеності в зондуванні та контролі.

Недавня система під назвою *ModQuad* [13] продемонструвала самозбірку в повітрі (рис. 2.1). У цьому випадку механічна стиковка можлива за допомогою магнітів на кутах кубічної рами навколо невеликих квадранторних незайнятих літальних апаратів. Через надзвичайні вимоги до бюджету ваги рама та механізми стикування повинні бути якомога меншими. Збірка довільних плоских форм у повітрі була продемонстрована, але механізм роз'єднання, який би дозволяв розбирати, ще не представлений.

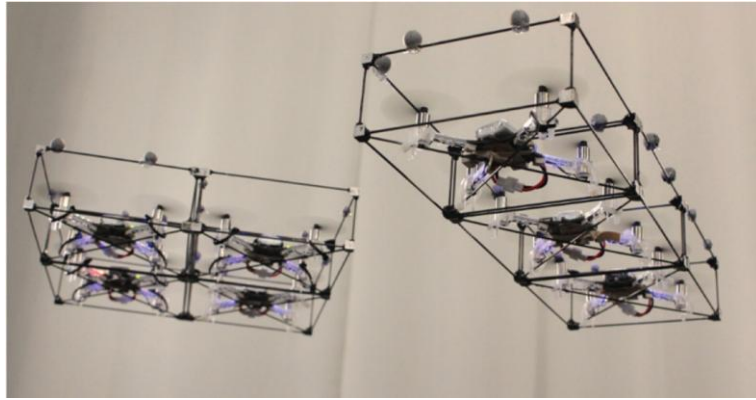


Рисунок 2.1 – ModQuad: чотири модулі утворюють квадрат, а три модулі утворюють лінійну структуру, яка збирається в повітрі всередині середовища захоплення руху [1]

2.1.2 Архітектура реконфігурації решітки

Однією з перших важливих робіт із переналаштування решітки були кристалічні роботи, показані на рис. 2.2 (8). Ці роботи допомогли започаткувати алгоритмічні підходи на основі локальних правил, засновані на фізичному роботі з супутніми обмеженнями, які виникають із фізичних систем.

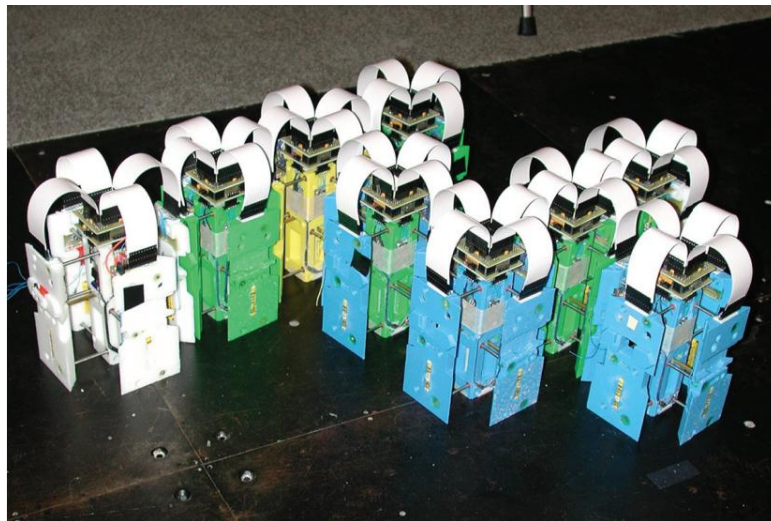


Рисунок 2.2 – Кристалічні роботи з реконфігурацією решітки, які змінюють конфігурацію шляхом трансляції модулів шляхом розширення [1]

Важливим загальним аспектом архітектури реконфігурації решітки є те, що реконфігурація є локальним процесом. Плануючи рух і визначаючи,

чи може модуль переміщатися з однієї позиції в іншу, решітчасті системи повинні перевіряти лише фіксований набір локально сусідніх позицій або наявність чи відсутність модулів. Усі інші архітектури мають глобальні обмеження. Це означає, що обчислювальна складність часу для реконфігурації решітчастих систем може не залежати від кількості модулів, чого не можна сказати про інші архітектури. Крім того, керування кожним модулем має стосуватися лише забезпечення локального руху одного модуля відносно іншого, що може спростити конструкцію модуля.

Хоча ModQuad (рис. 2.1) [13] може бути ще одним прикладом системи, яка формує модулі в решітку, вона відрізняється від архітектури реконфігурації решітки тим, що модулі ModQuad жорстко прикріплені та маневрують у середовищі, тоді як модулі решітки маневрують іншими модулями.

2.1.3 Ланцюгова архітектура

Система PolyBot [14], показана на рис. 2.3, є однією з найперших систем ланцюгової архітектури. Він складається з двох типів модулів: один має одну шарнірну DOF із двома з'єднувальними пластинами, а другий має нульову DOF із шістьма з'єднувальними пластинами як гранями куба. Модулі з однієї DOF можна прикріпити один до одного, утворюючи змійчасті шарніри.

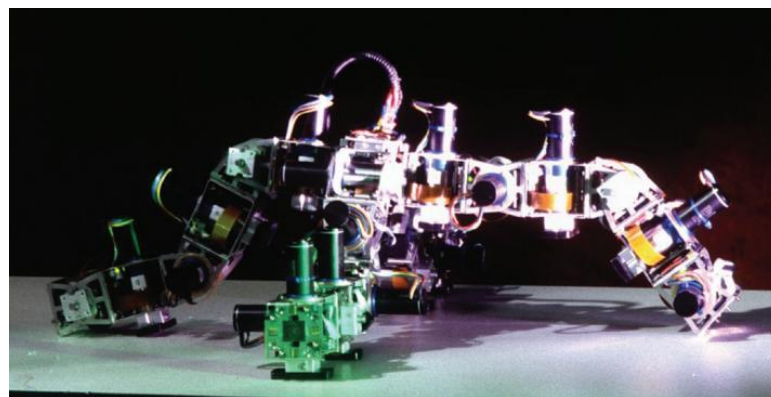


Рисунок 2.3 – Система реконфігурації ланцюга PolyBot із 24 модулями, розташованими в конфігурації на чотирьох лапах [1]

Модулі з нульовою DOF виконуються як структурні вузли в деревоподібних конфігураціях. У той час, як мобільна та гратчаста архітектури не містить наступних ланцюжків, ця архітектура може формувати традиційні маніпулятори роботи з повним керуванням дистальним кінцем рукоятки з шістьма DOF. Як наслідок, ці типи системи виконували різноманітні завдання традиційної руки роботи, тоді як мобільні та гратчасті архітектури більш зосереджені на формуванні різних форм.

2.1.4 Гібридні архітектури

Одним із найбільш вражаючих проектів у гібридних архітектурах була серія систем Modular Transformer (M-TRAN) [15], показана на рис. 2.4. Його модуль складається з двох з'єднаних кубів. Ці зв'язані куби можуть утворювати послідовні ланцюжки для маніпулювання або завдання пересування та переконфігурувати так само, як це роблять решітчасті системи. Дизайн також був елегантним у спробі звести до мінімуму необхідні DOF для досягнення як завдань ланцюга, так і реконфігурації решітки.



Рисунок 2.4 – Система гібридної архітектури Modular Transformer (M-TRAN) III, що складається з модулів з двома ступенями свободи (один білий і один чорний елемент) [1]

Іншою важливою гібридною системою є система Self-Assembling Modular Robot for Extreme Shape Shift (SMORES) [16], показана на рис. 2.5, яка має модулі на нижчому рівні гранулювання, ніж M-TRAN: окремі модулі складаються з одного куба замість двох, прикріплені кубики.

Одним значним внеском у дизайн SMORES є можливість імітувати функцію M-TRAN та більшості інших систем MRR. Важливий аспект дизайну, який уможливорює цю емуляцію, базується на спостереженні, що багато реконфігурованих систем засновані на кубічній формі, можуть бути організовані в кубічну решітку та здатні обертатися навколо великої осі, що проходить через центр куба.



Рисунок 2.5 – Два модулі самозбірного модульного робота для екстремальних змін форми (SMORES), прикріплені для імітації одного модуля модульного трансформатора (M-TRAN) III [9]

2.1.5 Архітектура ферми

Система реконфігурації ферми, вузли якої можна реконфігурувати, називається системою ферми зі змінною топологією (VTT), показана на рис. 2.6 [17]. Система може метаморфозуватися, змінюючи довжину елементів ферми та ступінь кожного вузла (кількість елементів ферми, що припадають на нього). Перевага цієї архітектури полягає в тому, що, подібно до ферм, які використовуються при будівництві будівель або мостів, системи можна зробити дуже великими та міцними, але при цьому вони ефективні у

використанні матеріалів.

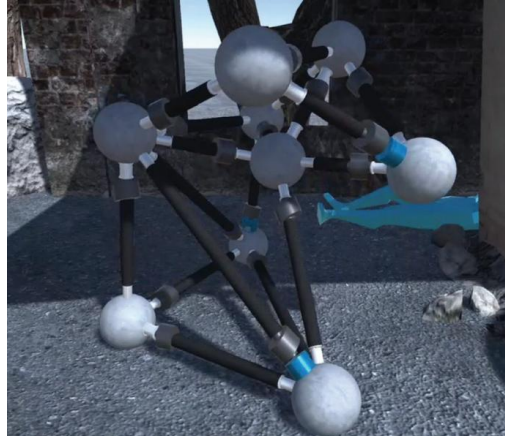


Рисунок 2.6 – Система ферми змінної топології з 18 елементами та 8 вузлами [9]

Представлення фермової архітектури у вигляді графа дає змогу стати союзником обчислень теоретико-графового аналізу. Однак фізичні обмеження, які виникають у зв'язку з наявністю елементів зі скінченними, незначними розмірами, ускладнюють аналіз цих систем. Наприклад, при зміні довжини елементів кути між вузлами також змінюються; однак фізичний розмір (наприклад, діаметр) елементів запобігає тому, що кут між двома елементами, які спільно використовують вузол, стає занадто малим.

Це обмеження необхідно враховувати в будь-якому алгоритмі планування руху. Хоча архітектура ферм не вважалася одним із основних класів реконфігурованих систем у попередніх дослідженнях [18], деякими відповідними ранніми прикладами є ферми зі змінною геометрією [19-21], у яких елементи ферми є змінними, але не автоматично. реконфігурується.

2.2 Апаратне забезпечення

Однією з ключових характеристик MRR є здатність адаптувати апаратну структуру відповідно до певного завдання чи середовища.

2.2.1 Привод

У той час як стандартні приводи переважають у системах MRR, для подолання геометричних обмежень конструкції та досягнення мети компактності можна використовувати все більшу кількість налаштованих приводів на основі інтелектуальних матеріалів. Для самостійної реконфігурації засувки можуть використовувати спеціальні приводи для додаткової універсальності при складанні кожного модуля.

Модулі MRR зазвичай мають два типи приводів: великий привод, який переміщує модулі відносно інших модулів або навколишнього середовища, і менші приводи-засувки, які вмикають або вимикають зв'язок між модулями. Безрозмірною мірою головного приводу є характеристична міцність, яка визначається як кількість модулів, які можуть підтримуватися консольним способом під дією сили тяжіння. Цей показник важливий, оскільки він описує найбільший послідовний ланцюг, який система може підтримувати без поломки. Зауважте, що в кінцевому рахунку це також залежить від міцності з'єднання (важливо для ґратчастих систем) і маси модуля. Сила характеристики зазвичай становить від 2 до 5.

Системи MRR отримують простір для завдань і можливості за рахунок збільшення кількості модулів у системі. Таким чином, питома потужність головного приводу має вирішальне значення для досягнення вищої характеристичної міцності та здатності модуля витримувати власну вагу та прикладати зусилля до навколишнього середовища. Системи MRR можуть використовувати кілька різних технологій приведення в дію, залежно від кількості та типу з'єднань у кожному модулі [22].

Багато хто використовує готові приводи, такі як двигуни постійного струму, крокові двигуни і серводвигуни. Існують також спеціальні приводи для досягнення нестандартних рухів, включаючи пневматичний привод із трьома DOF та електромагнітний інерційний привод. Ці приводи забезпечують мобільність незалежного модуля або решти конструкції для зміни конфігурації [23].

Не всі двигуни потрібно вбудовувати в конструкцію: було продемонстровано, що джерела дистанційного керування ефективні для запуску реконфігурацій. Налаштування платформи, які викликають вібрацію, магнітне поле або тепловий градієнт, також можуть ініціювати одну та/або кілька послідовностей руху. У той час як таке глобальне спрацьовування викликає реконфігурацію без обмеження кількості контрольованих модулів, керовані DOF окремих модулів у компактній упаковці мають вирішальне значення для практичних завдань складання, що включають кілька модулів. Коли потужність і крутний момент двигуна є критичними для загального простору реконфігурації, налаштовані приводи з використанням функціональних інтелектуальних матеріалів можуть надати нову свободу проектування системам MRR [21]. У робототехніці є приклади таких приводів, які використовують електроактивні полімери, п'єзоелектричні кристали, полімери з пам'яттю форми і сплави з пам'яттю форми (SMA) через їх високу силу, крутний момент або деформацію. характеристики відношення ваги (наприклад, вихідна сила 1 Н від приводу 20 мг). У легких системах MRR застосовуються різні форми приводів SMA.

2.2.2 Сенсори

Кінцевою метою систем MRR є адаптація та реакція на різні середовища та завдання. Для цього необхідно, щоб модулі усвідомлювали не тільки себе, але й свій зібраний стан і взаємодію з сприйманим середовищем.

Актuatorи SMA (найчастіше виготовлені з нікель-титанового сплаву) дозволяють створювати деякі з найбільш компактних механізмів приводу, важливих для систем MRR. Ефект пам'яті актуаторів SMA походить від переходу форми кристала між мартенситним та аустенітним станами, де кожен стан визначається попередньо визначеним температурним порогом [24]. Щоб активувати цей фазовий перехід, часто використовується нагрівання Джоуля для прямої подачі струму на приводи SMA.

Це можливо для пружинних або тонких стрічкових приводів, але

неефективно для інших форм приводів SMA, які створюють більші зусилля. В іншому випадку використовується додатковий індивідуальний нагрівальний шар, який націлений на певну зону SMA. У системах MRR використовуються різні типи приводів SMA, включаючи торсійні або складні приводи на додаток до найпоширеніших пружинних/струнних приводів. Стрічкові лінійні приводи SMA також можуть складатися з модульних блоків, які називаються елементарними осередками, які можуть розширюватися, обертатися та згинатися [25].

Більшість лінійних приводів створюються шляхом намотування дротів SMA для досягнення більшого діапазону руху, що перевищує типову максимальну швидкість деформації 5%. Цей процес намотування вимагає підтримки рівного натягу дроту на всьому протязі, включно з процесом затвердіння. Альтернативний тип приводу використовує листи SMA. Завдяки своїй площинній геометрії їх можна виготовити за допомогою лазерного вирізання візерунків або за допомогою техніки травлення. Цей процес повторюваний, швидкий і гнучкий і створює приводи, які можна безпосередньо відпалити без необхідності закріплювати їх на іншому елементі [25].

Крім того, оскільки ці приводи є плоскими, їх можна легко інтегрувати в прототипи, додавши шар приведення в поєднання з нагрівальним шаром. Цей тип SMA може прокласти шлях до процесу виготовлення без складання. Технологічність приводів SMA в різних формах приносить переваги модульній конструкції.

Технологія лазерного різання дозволяє створювати гнучкі конструкції модулів приводу SMA листового типу SMA, які працюють за принципом «підключи і працюй», і не потребують коробки передач для роботизованих аркушів орігамі з мінімальними механічними зусиллями для складання [26]. Вибір приводу визначає механічні характеристики MRR, тоді як можливість налаштування, компактність, легка вага та висока потужність роблять приводи SMA дуже привабливими для робототехнічних застосувань. Ці

функції особливо корисні для MRR, оскільки кожен модуль потребує автономної та інтегрованої конструкції кількох механізмів для руху, з'єднання та реконфігурації [26].

2.2.3 Зв'язок

Розпізнавання та зв'язок у MRR часто є однорідними по розподілених модулях. Оскільки системи розширюються, охоплення їх сенсорних ресурсів має бути масштабованим. Ми можемо розділити відчуття на дві категорії: внутрішні та зовнішні. Внутрішні методи вимірювання призначені для локального моніторингу стану кожного модуля. Модальності зовнішнього зондування пов'язані зі спостереженням за навколишнім середовищем поза системою робота.

2.2.3.1 Внутрішнє зондування

Оскільки системи MRR характеризуються великою кількістю незалежних модулів та їх DOF, основні вимоги до зондування стосуються контролю активних і пасивних DOF. Більшість систем MRR використовують поворотні з'єднання, хоча деякі також мають лінійні з'єднання. Контроль стану цих з'єднань здійснюється за допомогою змішувальних і узгоджувальних датчиків обертання, потенціометрів, датчиків Холла або різних тензодатчиків. Одним із прикладів досягнення максимальної компактності – однієї з важливих цілей дизайну MRR – є PaintPots [27].

PaintPots використовують струмопровідну фарбу для вбудовування потенціометрів у структуру модуля робота за відносно низькою ціною. Деякі системи MRR також оснащені такими датчиками, як акселерометри, які можуть вимірювати орієнтацію модуля, що може бути критично важливим для процедур запуску та ініціалізації [27].

Ще одна важлива функція датчиків для MRR – це допомога в керуванні процесами док-станції, особливо для реконфігурації ланцюга та мобільного пристрою. Ланцюгові системи використовують зворотну кінематику з

внутрішніми датчиками, згаданими вище, але часто похибки занадто великі. Для кращої оцінки стану можуть бути інтегровані бортові камери або системи світлодіодів і фотодатчиків.

2.2.3.2 Зовнішнє зондування та зв'язок

Зовнішні датчики можна використовувати для виявлення інших модулів, а також навколишнього середовища. Це має вирішальне значення для реконфігурації та глобальних завдань, у яких модулі повинні розпізнавати один одного та прямо чи опосередковано спілкуватися зі своїми сусідами. Точніше, зовнішнє зондування передбачає визначення того, хто і де знаходиться сусідній модуль, а також виявлення будь-якої взаємодії між ними за допомогою, наприклад, сенсорного перемикача або пружинного контакту [28]. Після встановлення фізичного контакту з'єднання зазвичай використовується для прямого зв'язку між модулями через електричні контакти або індукцію. Система шини може спростити глобальний зв'язок, але обмежується групою модулів, що знаходяться в прямому контакті. Послідовний зв'язок між сусідніми модулями може подолати обмеження шини зв'язку для масштабованості, але збільшує складність окремих модулів, і системі все ще може знадобитися певна форма глобального зв'язку [28].

Бездротовий зв'язок реалізований як глобально, так і локально за допомогою ІЧ-зв'язку, Bluetooth і Wi-Fi, що значно покращує адаптивність і автономність системи в цілому. Незважаючи на те, що бездротовий зв'язок створює значну кількість накладних витрат, він відкриває можливість обміну сенсорною інформацією та забезпечує більш розподілений підхід до різних функцій. Широкомовні повідомлення особливо корисні, оскільки вони не обмежені адресним простором. Початкові дослідження реалізували розподілене зондування навколишнього середовища за допомогою перемикачів, а також картографування за допомогою бортових датчиків, і поєднання їх із зовнішньою системою зондування здається ефективним для

виконання спеціальних завдань через мобільний або глобальний зв'язок. системи. У гетерогенних системах деякі завдання зондування можна перекласти на спеціальні сенсорні модулі [29].

Історично більшість однорідних систем мали обмежені бортові обчислення та зондування. Хоча переваги однорідного підходу не були точно оцінені, ієрархічний підхід із централізованим датчиком і розумінням навколишнього середовища видається більш ефективним. Через складність створення системи MRR значна кількість досліджень була зосереджена на функціональності, системній інтеграції та контролі, як фізично, так і за допомогою симуляції. Однак сприйняття навколишнього середовища та обізнаність мають вирішальне значення для того, щоб система могла виконувати завдання в реальних сценаріях і виконувати обіцянку універсальності [29].

2.3 Архітектура розподіленого керування

Як правило, розподіл обчислювальних ресурсів має тенденцію ускладнювати програмування та керування системою порівняно з одним централізованим ресурсом. Однак включення обчислювальних ресурсів до кожного модуля означає, що доступна пам'ять і обчислювальні цикли масштабуються відповідно до кількості модулів. Різні архітектури керування можуть реалізувати функції програмного забезпечення, очікувані від MRR. Однорідно розподілені підходи є елегантними та цікавими з точки зору інформатики, починаючи від біоінспірованого керування до керування мільйонами модулів у моделюванні і майже тисячею фізичних. Продемонстровані складні завдання включають самовідновлення, пересування і маніпуляції, усі з яких все ще знаходяться на відносно низькому рівні [30].

З практичної точки зору, підхід, який використовує переваги властивої ієрархічної фізичної організації обчислювальних елементів, може працювати

краще для завдань вищого рівня, які передбачають поєднання завдань маніпуляції, пересування та зондування навколишнього середовища. Ієрархія може включати централізовані дії, такі як визначення та інтерпретація навколишнього середовища, а також міркування щодо відповідної конфігурації для конгломерату, одночасно розподіляючи локальні дії та контролюючи окремі DOF або рухи підгруп, чії дії тісно пов'язані (наприклад, робота-рука).

2.4 Програмне забезпечення та управління

Зрештою, бачення систем MRR включає повністю автономну самопереналаштування. Потрібно вирішити як звичайні проблеми штучного інтелекту/роботів, починаючи від семантичного розуміння до керування рухами, так і специфічні проблеми MRR. З точки зору керування програмним забезпеченням, ми можемо розділити проблеми, пов'язані з MRR, на дві частини: відповідність форми завдання та планування та контроль реконфігурації [31].

Діяльність найвищого рівня в сценаріях MRR полягає в тому, щоб зрозуміти завдання або ситуацію, а потім підібрати конфігурацію, яка може виконати це завдання або поводитися належним чином у цій ситуації. Потім система повинна визначити, як метаморфізувати свою поточну конфігурацію в бажану. Цю проблему можна розділити на дві частини: одна, яка зосереджена на організації з'єднання, і друга, яка визначає, як переміщати модулі без зіткнень, незважаючи на велику кількість DOF у типовій системі MRR.

Багато специфічних ускладнень у розробці програмного забезпечення для реконфігурованих роботів походять від архітектури апаратного забезпечення. Наприклад, деякі системи фіксації вимагають підходу до стикування з певних напрямків, і більшість систем мають обмежену кількість модулів, які можна підвішувати консольним способом під дією сили тяжіння.

Ці типи обмежень разом із обмеженнями геометрії модуля можуть суттєво змінити реалізацію програмного забезпечення для керування реконфігурацією або виконання завдань. Однак системи MRR все ще мають набір загальних класів програмних завдань [31].

Приклад: наскрізна система для виконання завдань за допомогою модульних роботів. У [31] представлено систему для виконання складних завдань за допомогою MRR. Система включає високорівневий планувальник місій, велику бібліотеку підключення та поведінки роботів, інструмент проектування та моделювання для заповнення бібліотеки новими підключеннями та поведінкою, а також апаратне забезпечення MRR (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Набір конфігурацій робота, зібраного за допомогою модулів самомонтуючого модульного робота для екстремальних змін форми (SMORES) [9]

На найвищому рівні цільове завдання вказується абстрактно, з точки зору середовища завдання та бажаних поведінкових властивостей, наприклад, «якщо робот рухається в тунелі, підтримуйте максимальну висоту 3 одиниці». Потім високорівневий планувальник місії системи вибирає з бібліотеки підключення та поведінку робота, які відповідають усім необхідним функціям. Нарешті, задана місія компілюється та надсилається апаратному забезпеченню робота для виконання завдання. На рисунку 2.7 показаний широкий спектр підключень роботів, синтезованих системою, які були застосовані до демонстрованого завдання виклику, прибирання верхньої

частини столу. Високоточний симулятор фізики та більш повна бібліотека зв'язності та поведінки можуть ще більше покращити ланцюжок інструментів.

2.5 Планування та контроль реконфігурації

Ключова здатність систем MRR, яка відрізняє їх від звичайних робототехнічних систем, полягає у визначенні та виконанні курсу дій, який включає зміни підключення для переходу від початкової конфігурації до іншої. Ця проблема називається плануванням і контролем реконфігурації [9].

Незважаючи на те, що проблему можна розглядати як варіант загальної задачі планування руху та керування роботом, яка вивчалася в робототехніці протягом багатьох десятиліть, проблема відрізняється від традиційних підходів тим, що зв'язок між модулі (або топологія роботизованої структури) також змінюються за потреби. Проблеми тут включають можливу величезну кількість модулів та їхніх DOF, що вимагає аналізу даних у просторах великої розмірності (часто називають прокляттям розмірності). Стандартні методи планування руху, які добре працюють із невеликою кількістю вимірів і мають гарантії пошуку рішення, можуть зазнати невдачі з надмірною кількістю DOF, чий простір конфігурації може бути дуже складним топологічно [1].

Приклад: реконфігурація систем гратчастого типу. Проблема, пов'язана з проблемами алгоритму децентралізованої конструкції з двосторонньою модульною системою, що складається з пасивних блоків для втілення структури та активних роботів. Для перенесення блоків на поверхню конструкції (рис. 2.8).

Планування змін підключення виконується на рівні блоків (передбачається, що блоки мають певну обчислювальну потужність).

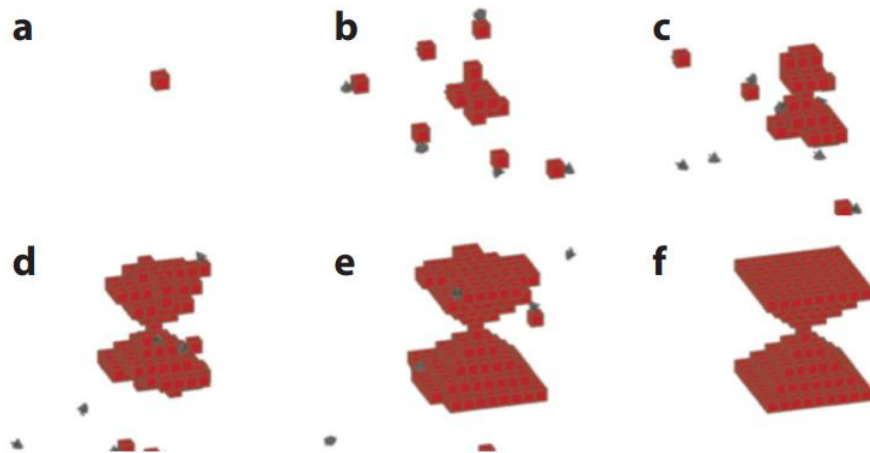


Рисунок 2.8 – Реконфігурація систем ґратчастого типу [1]

Блоки мають загальну систему координат і опис потрібної структури. Потім вони визначають, до якої зі своїх сторін можна дозволити прикріпити додаткові блоки відповідно до правил локального масштабу для жадібного зростання структури та запобігання будь-яким тупиковим ділянкам, до яких блоки фізично не можуть дістатися.

Стратегії планування та керування рухом для мобільних роботів включають випадковий рух, під час якого роботи довільно рухаються поверхнею зростаючої структури, і більш систематичний підхід, який включає, наприклад, градієнтний спуск за числовим градієнтом, який сигналізують блоки. У цих підходах існує компроміс між вартістю зв'язку та зусиллями з керування роботом.

2.6 Висновки до другого розділу

Розділ було присвячено аналізу принципів і архітектур модульних робототехнічних систем, що мають ключове значення для розробки адаптивних і ефективних рішень. Було детально досліджено різні архітектурні підходи, зокрема архітектури слота, шини, секційні системи та ферми. Кожен із цих підходів має свої переваги та обмеження, які впливають на функціональність, гнучкість і масштабованість модульних систем.

Зокрема, архітектури слота забезпечують унікальність з'єднань і високу надійність, тоді як секційні архітектури сприяють легкій модифікації та розширенню системи. Архітектури шини дозволяють створювати більш універсальні рішення з широким спектром використання, тоді як ферми забезпечують міцність і ефективність використання матеріалів. Гібридні архітектури поєднують переваги різних підходів, що відкриває нові можливості для розробки модульних систем.

Також у розділі акцентується на важливості врахування геометричних, динамічних і обчислювальних аспектів при проектуванні. Проведений аналіз підтвердив, що інтеграція різних архітектур та використання сучасних технологій дозволяє створювати інноваційні модульні системи, які можуть адаптуватися до складних виробничих умов і забезпечувати високу продуктивність.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МОДУЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ

3.1 Побудова моделей аналітичним або чисельним способами

TOOL MODUROB – це інструмент, створений у MATLAB R, який містить можливість будувати топології роботів. Автоматична модель може бути побудована двома способами: аналітичним або чисельним. Символьне формулювання в MATLAB виконується за допомогою символічного інструментарію.

Для розв’язування диференціальних рівнянь користувач може вибирати між чисельними інтеграторами, які надає MATLAB. Щоб рухати робота в суглобовій щілині, передбачені різні генератори ходи, які використовують або ритмічні генератори на основі ритмічних функцій (рис. 3.1), або генератори ходи, які використовують хаотичну карту.

Використовуємо підхід, запропонований у [31], який дозволяє генерувати періодичні кроки, які є результатом ефектів синхронізації пов’язаних карт. Такий підхід може допомогти контролювати складні багатотільні структури шляхом відображення активних суглобів на індивідуальний хаотичний драйвер [32].

Для оцінки або порівняльного аналізу основи реалізовано два приклади на основі рівнянь Лагранжа, і їх можна порівняти з геометричним підходом. Одним із прикладів є приклад подвійного маятника (рис. 3.1), наприклад, отриманий у [33], а другий – подовжений маятник, який рухається на валу, як кран, представлений у [1].

Приклад (рис. 3.2) показує абсолютно ідентичну поведінку між реалізацією на основі рівнянь Лагранжа та з геометричним підходом, заснованим на крученні.

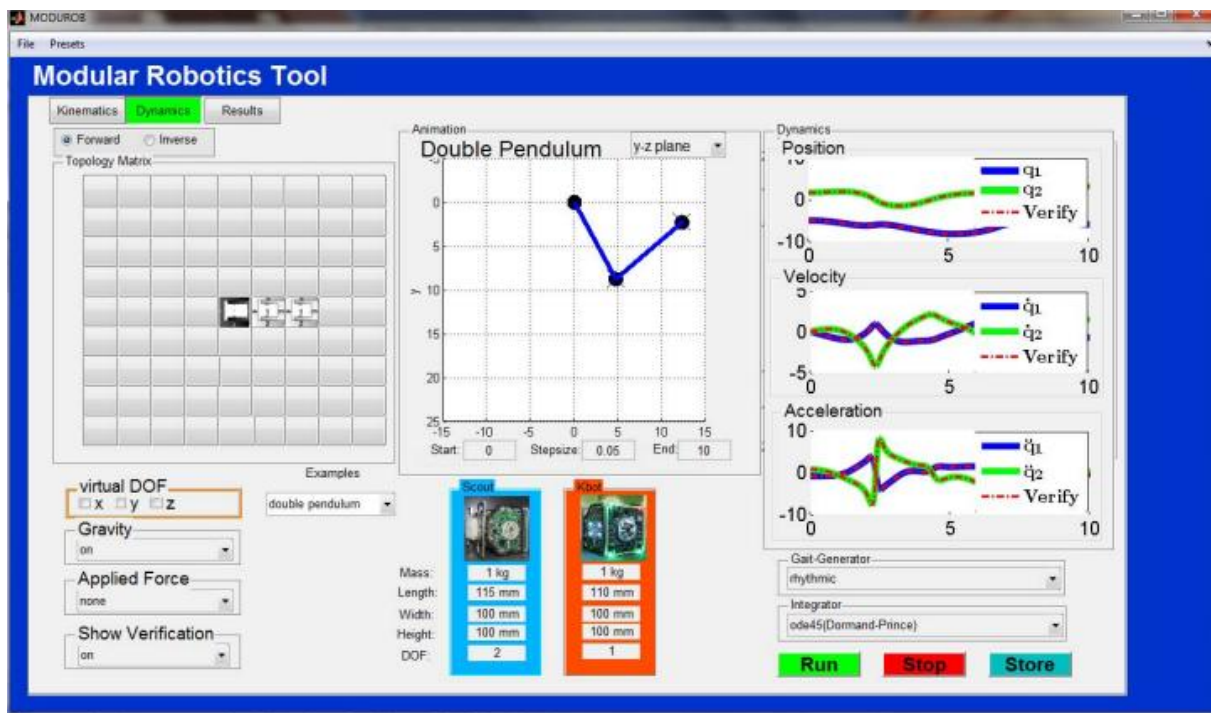
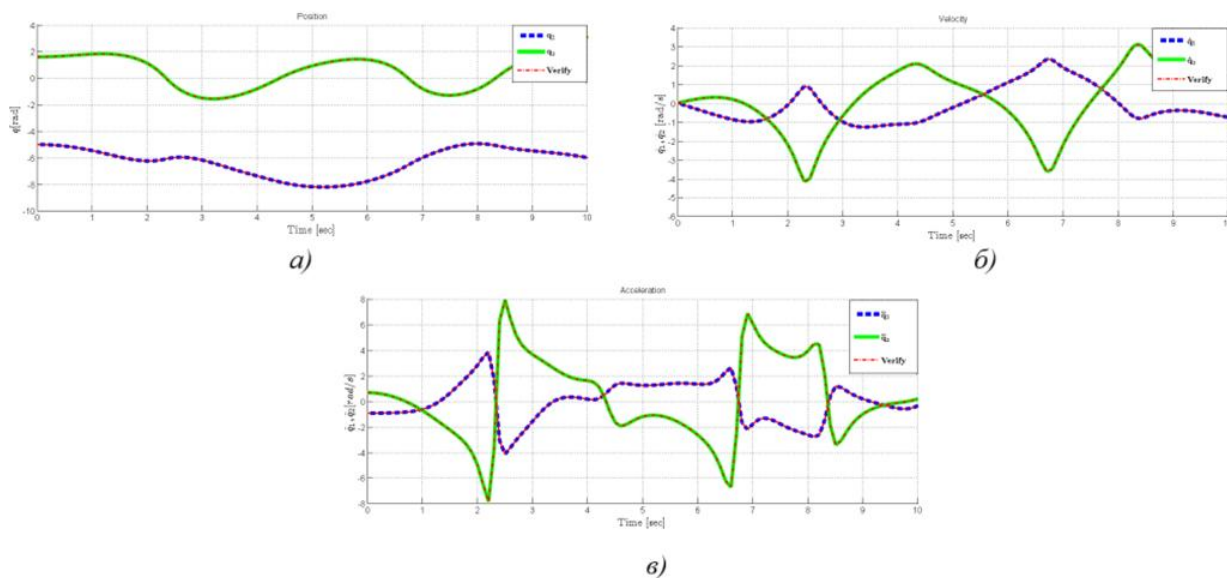


Рисунок 3.1 – Еталонний приклад подвійного маятника



а) позиція; б) швидкість; в) прискорення

Рисунок 3.2 – Перевірка геометричного підходу за методом Лагранжа з використанням моделі подвійного маятника

3.2 Оцінка багатотільних систем

Структури є найпростішою формою робота як збірки, тому для глибшої оцінки каркасу було згенеровано ще один тест із розгалуженою конфігурацією робота (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Крабоподібна багатороботна структура, зібрана за допомогою роботів Scout

У той час як приклад коду одинарного або подвійного маятника можна легко знайти та завантажити з багатьох джерел, напр. з [33], код для більш складних структур багатотільних систем навряд чи доступний. З цієї причини, щоб оцінити інші конфігурації роботів, новий розгалужений модульний робот був змодельований у наборі інструментів MATLAB SimMechanics [34]. Цей інструмент дозволяє моделювати фізичні властивості та динаміку багатотільних систем за допомогою техніки моделювання Ейлера-Лагранжа [35].

На рисунку 3.4 представлена модель SimMechanics крабоподібного організму робота, який показаний на рис. 3.3.

Відповідний АІМ і графічне представлення структури цього організму можна переглянути на рис 3.3 – рис. 3.4.

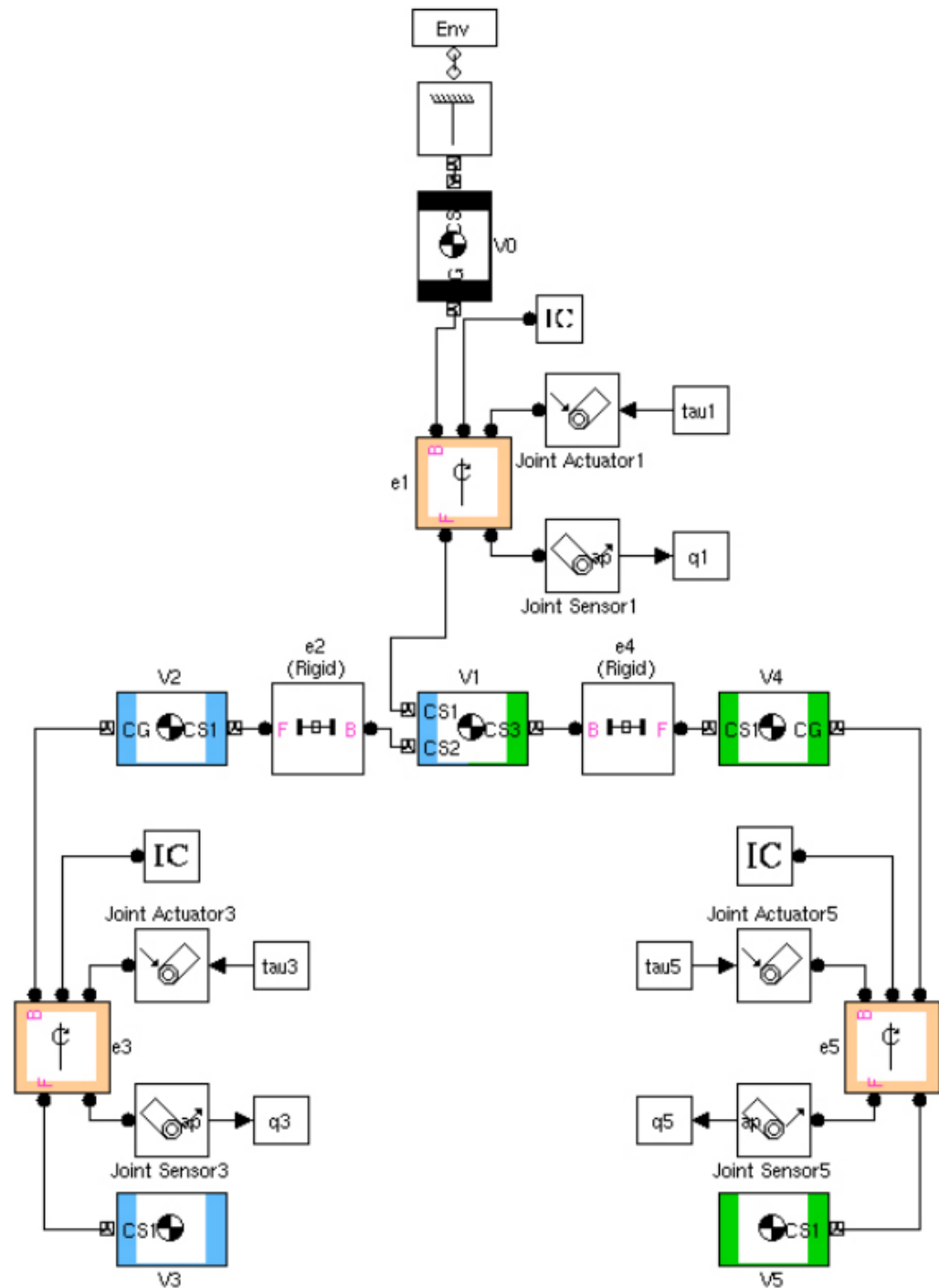


Рисунок 3.4 – Модель краноподібного робота Simulink SimMechanics

Ця структура була обрана тому, що вона містить усі три типи діадних структур (послідовну, паралельну та ортогональну). Ця структура також передбачає випадок, коли через механічні обмеження роботи не можуть рухатися відносно один одного, і в цьому випадку простір станів динамічної моделі потрібно зменшити. З цієї причини структура повинна виявляти такі випадки та відповідним чином адаптувати структуру.

Щоб оцінити запропоновану геометричну структуру, ідентична структура робота, яка використовується в моделюванні SimMechanics (рис. 3.4), також моделюється за допомогою нашого генератора моделей. Поведінку динаміки обох моделей можна розглянути на рис. 3.5.

На графіку (рис. 3.5) можна помітити, що обидві моделі дають ідентичний набір результатів, що, подібне до попереднього розділу, також доводить правильність основи.

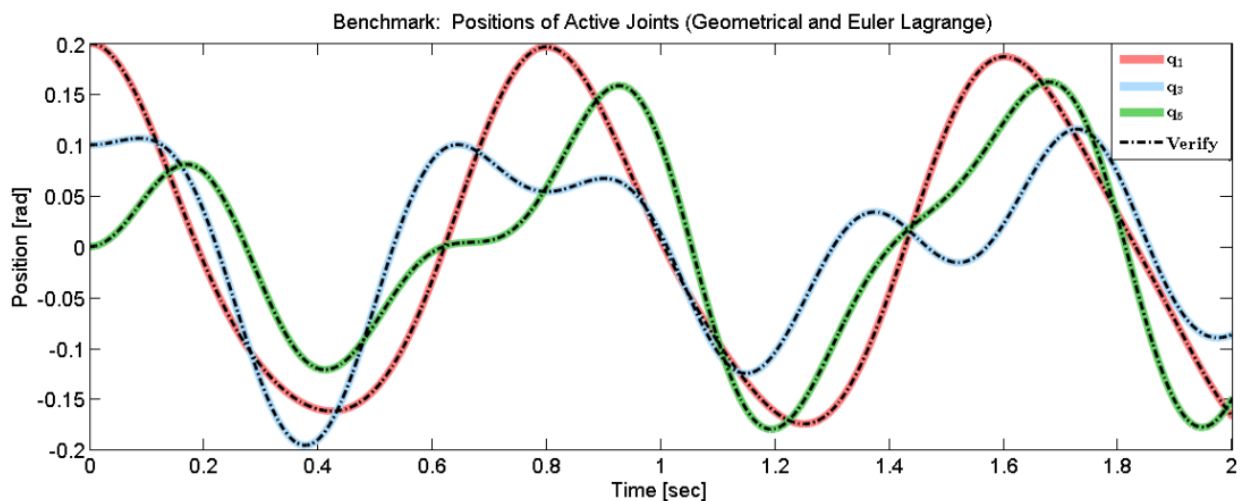


Рисунок 3.5 – Положення, швидкість і прискорення ланок на основі кробоподібної структури робота

3.3 Керування багатокорпусними системами

Класична теорія управління надає величезний спектр стратегій проектування контролерів для лінійних і нелінійних систем, включаючи, наприклад, такі методи, як керування в режимі ковзання [31], оптимальне керування, надійне керування, зворотний крок керування [30] та різні адаптивні механізми керування [34].

У попередньому підрозділі представлено автоматичний генератор моделей, який дозволяє генерувати модель динаміки багатороботного організму на основі геометричного формулювання рівнянь руху.

Згенерована модель є нелінійною моделлю, і розробити контролер для

робота, який може змінювати конфігурацію та, отже, вимагає нового представлення моделі, є величезним викликом.

3.3.1 Зворотна динаміка

Більшість роботизованих систем має нелінійний характер. Однією з концепцій, яка зараз стає популярною, є стратегія керування лінеаризацією зворотного зв'язку [35]. Ця техніка є узагальненим поняттям, а її спеціальна гілка в робототехніці також відома як інверсна динаміка або обчислене керування крутним моментом [36].

Блок-схема цього підходу зображена на рис. 3.6.

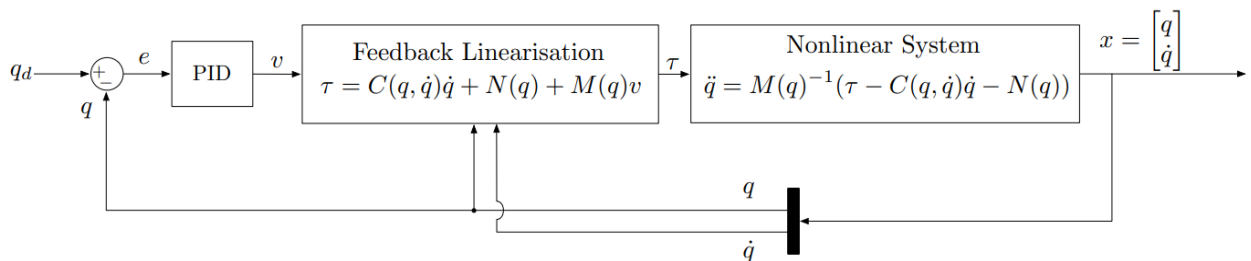


Рисунок 3.6 – Структура методу обчисленого крутного моменту

Зворотну задачу динаміки можна сформулювати в суглобовому просторі так:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + N(q). \quad (3.1)$$

Керуючий вхід v необхідно спроектувати і зазвичай вибирають як:

$$v = \ddot{q}_d - \underbrace{K_0(q - q_d)}_{e_q} - \underbrace{K_1(\dot{q} - \dot{q}_d)}_{\dot{e}_q}, \quad (3.2)$$

де K_0 і K_1 – позитивно визначені матриці.

Динаміку помилки для замкнутої системи можна сформулювати так:

$$\ddot{e}q + K_1 e + K_0 e q = 0, \quad (3.3)$$

де матриці K_0 і K_1 є матрицями підсилення.

Динаміка помилки може бути експоненціально стабільною шляхом правильного вибору K_0 і K_1 . Крутний момент можна обчислити для кожної обраної конфігурації робота. Обмеження надаються не самою структурою, а скоріше часом обчислення для дуже великих конструкцій роботів.

На рис. 3.7 показано крокові реакції активних з'єднань у крабоподібній структурі робота з рис. 3.4.

Завдяки обраній конфігурації робота та його механічним обмеженням кількість активних з'єднань зменшено до трьох DOF. Як висновок ми можемо резюмувати, що за допомогою методу обчисленого крутного моменту та ПД-регулювання ми можемо стабілізувати нелінійну систему за прийнятний короткий час.

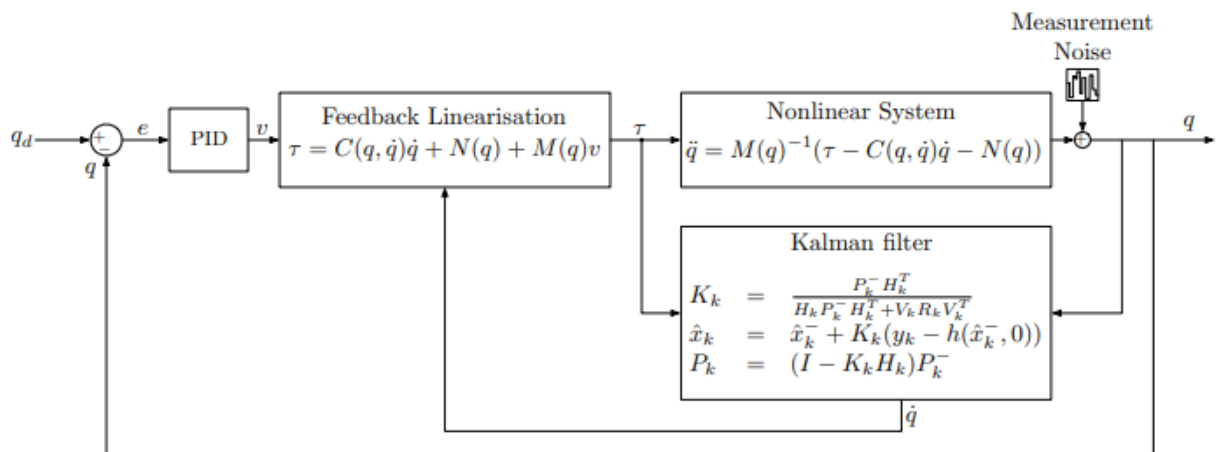


Рисунок 3.7 – Схема структури системи з обчисленими крутний момент, ЕКФ і ПД-регулювання

3.4 Висновки до третього розділу

В даному розділі досліджено кінематику, динаміку та керування модульними самореконфігурованими роботами засобами MATLAB.

Автоматичний розрахунок самоадаптивної моделі базується на рекурсивному геометричному підході. Пропонований двоетапний підхід для автономної генерації рівнянь руху був змінений та адаптований до потреб модулів роботів, розроблених у [1]. Аналіз та оцінка моделі та стратегій керування є невід'ємними перед портуванням програмного забезпечення на роботів.

4 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДУЛЬНИХ ПІДХОДІВ

4.1 Вхідні дані до проектування системи

Повністю автоматизована роботизована система на модульній основі буде експлуатуватись в умовах хімічної лабораторії.

Основні компоненти системи складаються з промислового робота Staubli TX60 і випарника Varourtec V-10 з програмним забезпеченням від Aitken Scientific.

Спеціальний серверний додаток був написаний компанією Staubli robotics для взаємодії між роботом і керуючим програмним забезпеченням.

Для розробки було використано систему автоматизованого проектування SolidWorks.

Як апаратне, так і програмне забезпечення було модульним, щоб компоненти можна було використовувати повторно в майбутньому.

Для підвищення надійності та мінімізації технічної підтримки були використані компоненти промислових роботів та виробників оригінального обладнання.

Спеціальний захват був розроблений з використанням пневматичного двопальцевого паралельного пневматичного приводу з пальцями з нержавіючої сталі.

Станція впорскування спроектована для спрощення та автоматизації випаровування великих об'ємів, з вбудованою системою самоочищення.

4.2 Етап проектування

Система, складалася з багатьох сотень окремих деталей, які були з'єднані разом, щоб дати точне уявлення про систему (рис. 4.1 – 4.2).

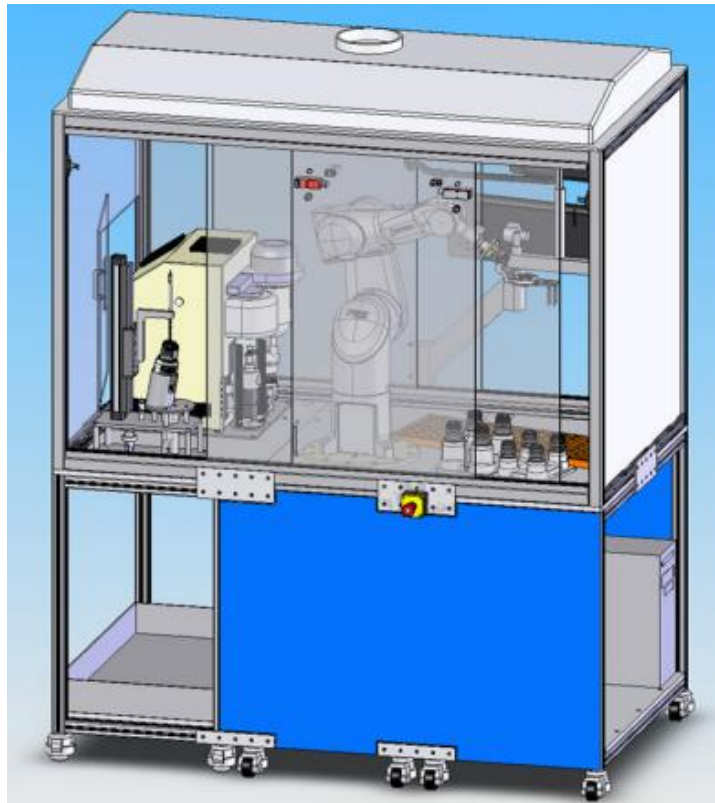


Рисунок 4.1 – Ізометричне зображення системи на етапі проектування

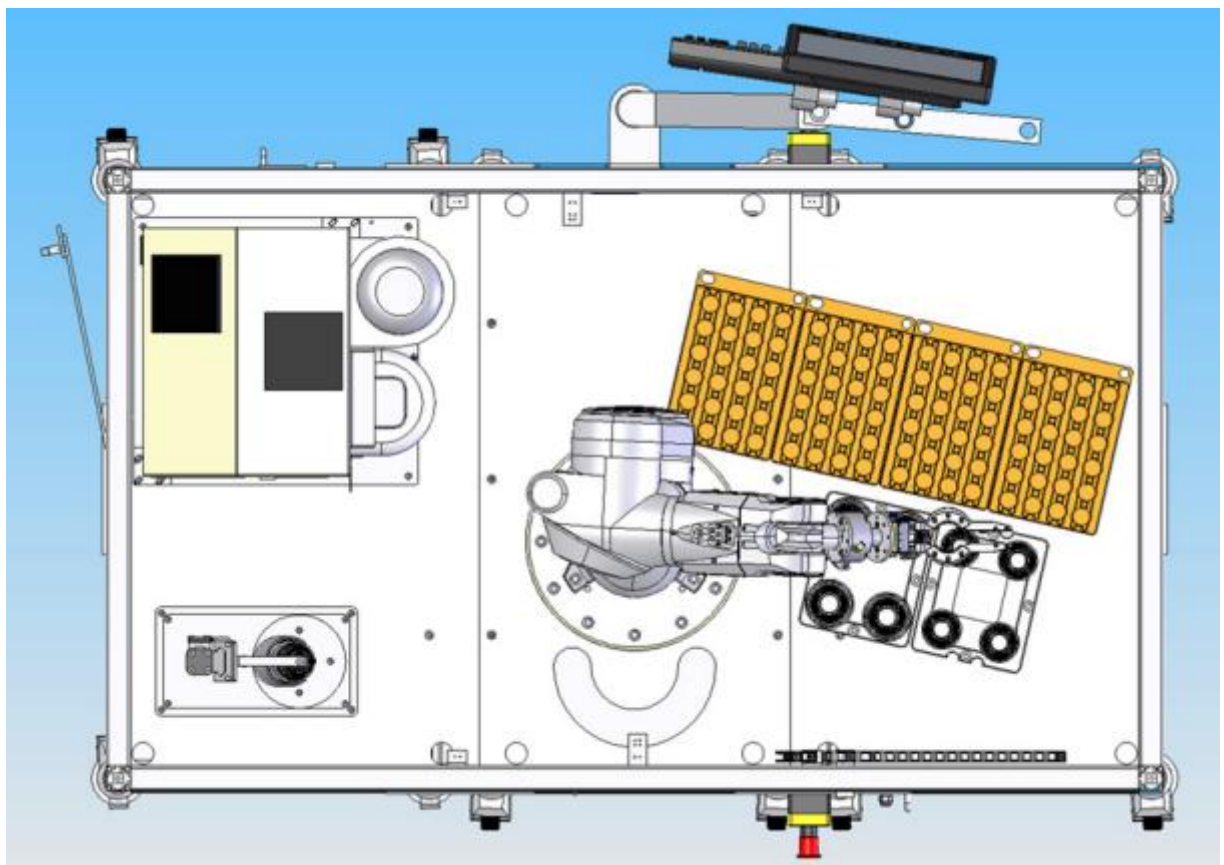


Рисунок 4.2 – План системи

Varourtec V-10 – це автономний випарник, призначений для швидкого випаровування невеликих об'ємів розчинника. Він також має можливість переробляти великі об'єми розчинника за допомогою ряду клапанів і трубок. Приєднання кінця до голки канюлі уможливило автоматизацію, оскільки посудину потрібно було лише підвести до кінця голки, використовуючи робота або маніпулятор для переміщення рідини.

Через різницю в розмірах посудин, різні конфігурації, відкритий доступ та інші вимоги, ця система була розроблена з використанням робота. Для інтеграції з рештою системи необхідно було написати програмний драйвер. Також було вирішено додати додаткові датчики, підключені до входів/виходів робота, щоб запобігти зіткненням робота.

У нижній частині підйомника був використаний мікроперемикач, а також цифровий датчик для виявлення наявності судна на підйомнику (рис. 4.3).

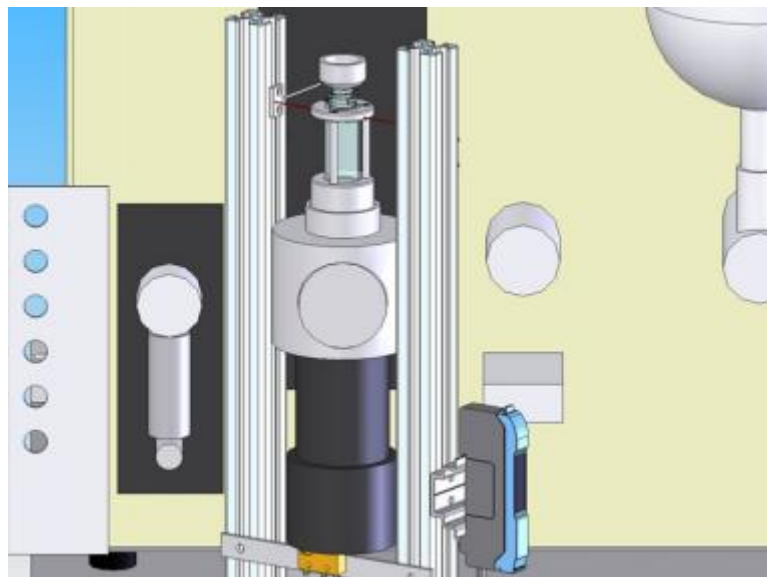


Рисунок 4.3 – Комп'ютерне проектування V-10, що показує розташування датчиків і монтажних кронштейнів

Щоб звільнити робота від необхідності утримувати посудину під час багаторежимної роботи, була розроблена станція, яка утримувала посудину і автоматизувала рух голки.

Станція також була спроектована таким чином, щоб голку можна було очищати між відбором зразків. Загалом для обробки в цій системі потрібно було використовувати п'ять типів посудин – від 4-мл флаконів до 250-мл пляшок. Щоб перенести весь вміст у випарник, необхідно було розташувати голку на дні і нахилити посудину під певним кутом.

Враховуючи різну товщину, висоту та діаметр скла, це стало справжнім викликом для дизайнера, тим більше, що варіативність процесів виробництва скла є відносно великою. Тримач посудини був серйозним викликом, оскільки після проектування його виявилось складніше виготовити, ніж очікувалося. Використання технології швидкого виготовлення за допомогою стереолітографічної машини Viper (SLA) дозволило спочатку перевірити конструкцію.

Це зайняло три ітерації, перш ніж дизайн був визнаний остаточним. Остаточне розташування означало, що посудини були розташовані в шаховому порядку по висоті, тому використання простого пневматичного циліндра для переміщення голки вгору і вниз ставало дедалі складнішим завданням.

Ця проблема була частково вирішена на початковій стадії проектування, щоб врахувати різницю в товщині скла на дні посудини. Щоб витримати цю різницю, голка була встановлена між пружинами з зазором понад 50 мм.

Потім голка була просто встановлена на пневматичному циліндрі за допомогою кронштейна (рис. 4.4).

Для даного проекту обрано робота Staubli7 TX60 через його кращі механічні характеристики та можливість інтеграції з іншими роботами.

Повторюваність Staubli становить 0,02 мм, що краще, ніж у Kawasaki FS02N (0,03 мм). Надійність роботів Staubli є високою, вони потребують лише щорічної перевірки та 20 000 годин профілактичного обслуговування. Kawasaki FS02N, наприклад, має графік технічного обслуговування 5000 годин.

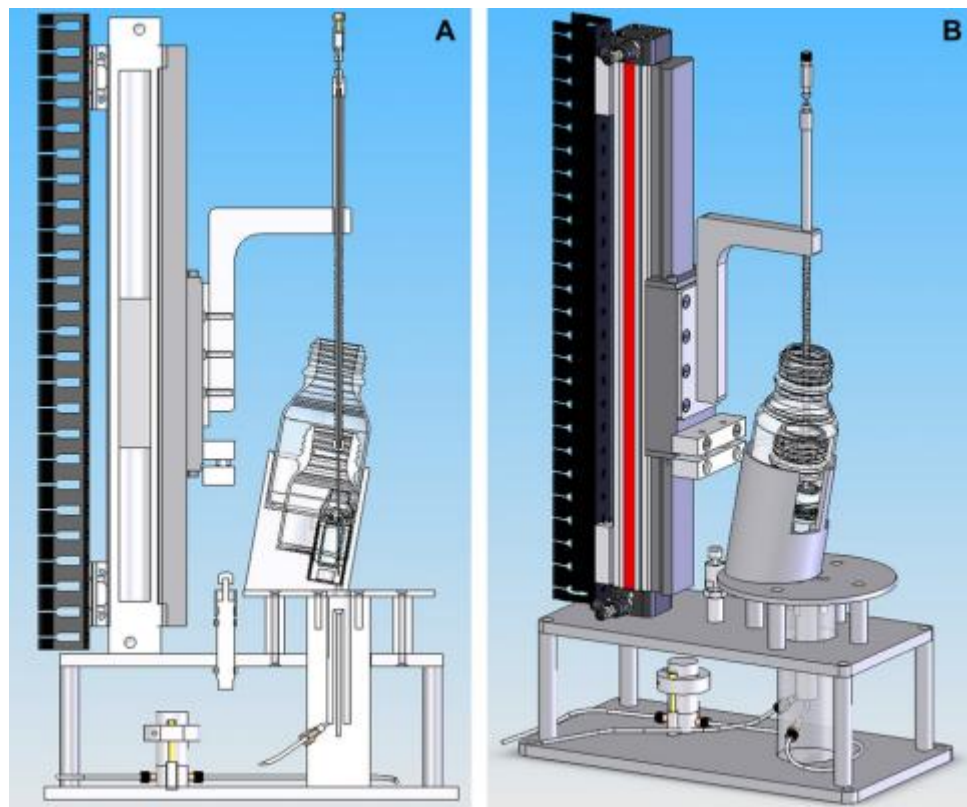


Рисунок 4.4 – Комп'ютерне проектування ізометричного перерізу мийної станції

Робот TX60 з вертикальним розташуванням роз'ємів був обраний через його корисне навантаження, радіус дії, а також однофазну напругу 240 В, а не трифазну 415 В.

Вертикальне розташування дозволило сховати кабелі під стендом і використати весь простір стенду. Можливості вводу/виводу дозволили підключити всі ланцюги безпеки системи, датчики, реле, перемикачі, клапани і т.д. і керувати ними безпосередньо в програмах руху робота. Хоча команда мала великий досвід у програмуванні роботів, для цього проекту було використано Aitken Scientific для написання програм роботів для більш ефективної інтеграції в основне керуюче програмне забезпечення Evaporate Express.

Загалом у системі потрібно було використовувати п'ять типів суден. Ця кількість була зменшена з метою спрощення автоматизації. Двома великими посудинами були стандартні пляшки Schott Duran об'ємом 100 і 250 мл,

обидві з однаковим розміром кришки.

Ємність флаконів становила 30, 20 і 4 мл. Флакони об'ємом 30 і 20 мл були однакового діаметру, але різної висоти. Найменша посудина, флакон об'ємом 4 мл, була поміщена в підставку, яка була спроектована таким чином, щоб мати ті ж фізичні розміри, що і 20-мл флакон, але не заважав процесу випаровування (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Типи посудин

Флакон об'ємом 4 мл не можна було використовувати безпосередньо на V-10, оскільки для цього був би потрібен локатор на дні, який відрізнявся від інших флаконів.

Отже, потрібен або механізм для зміни цієї середини пробігу, або інше рішення. Також потрібен був адаптер на верхній частині пробірки, щоб її можна було встановити на V-10.

Оскільки змінювати нижній локатор під час роботи було б дуже складно, було розроблено підставку, яка вміщувала б найменшу пробірку.

Оскільки V-10 нагріває пробірку за допомогою вентилятора гарячого повітря, важливо було спроектувати підставку таким чином, щоб теплопередача до пробірки не змінювалася. Крім того, пробірка/підставка оберталася з високою швидкістю, тому швидкість обертання була важливим

фактором, який необхідно було врахувати при проектуванні.

Таким чином, штатив був спроектований такого ж діаметру, як і більші флакони, і не вищим за 30-мл флакон з адаптером у верхній частині. Крім того, був потрібен простий економічно ефективний метод виготовлення.

Було виготовлено кілька прототипів Viper SLA зі смоли Bluestone для тестування принципу до того, як конструкція була доопрацьована і виготовлена з алюмінію. Прототипи з Bluestone витримали фізичні випробування під час тестування, але були визнані занадто крихкими для довготривалого використання.

Захват (рис. 4.6) складається з виготовлених пальців з нержавіючої сталі, встановлених на пневматичному двопальцевому паралельному приводі Schunk9 MPG50.

Пристрій запобігання зіткненням Schunk OPR-8 був встановлений між захватом і фланцем робота, щоб захистити обладнання від пошкоджень у разі зіткнення (рис. 4.7).

Захват повинен був бути спроектований таким чином, щоб підхоплювати всі п'ять типів суден. Щоб спростити конструкцію і усунути необхідність використання технології заміни інструменту, при проектуванні були ретельно продумані посудини і місця, які вони будуть займати.

Встановлення захвата під кутом дозволило отримати доступ до всіх місць в системі в компактній конфігурації. Без кута неможливо було б досягти високої щільності розміщення. V-10 вимагав адаптера на найменшій посудині, тому завдяки ретельному проектуванню вдалося зменшити складність захвату.

Вибір місць захоплення дозволив однаково захоплювати пляшки обох розмірів. Таким чином, захват міг захоплювати всі п'ять типів пляшок, використовуючи два місця, одне спереду і одне посередині (рис. 4.8).

Конструкція столів була важливим фактором для забезпечення повторного використання в майбутньому, а також для того, щоб систему можна було легко переміщати.

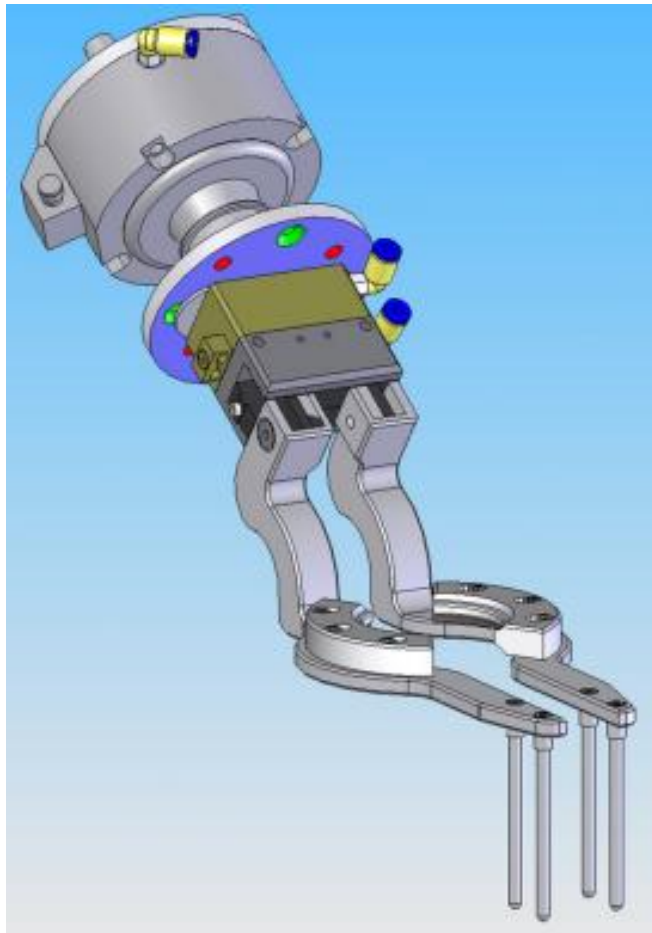


Рисунок 4.6 – Комп'ютерне проектування захвату

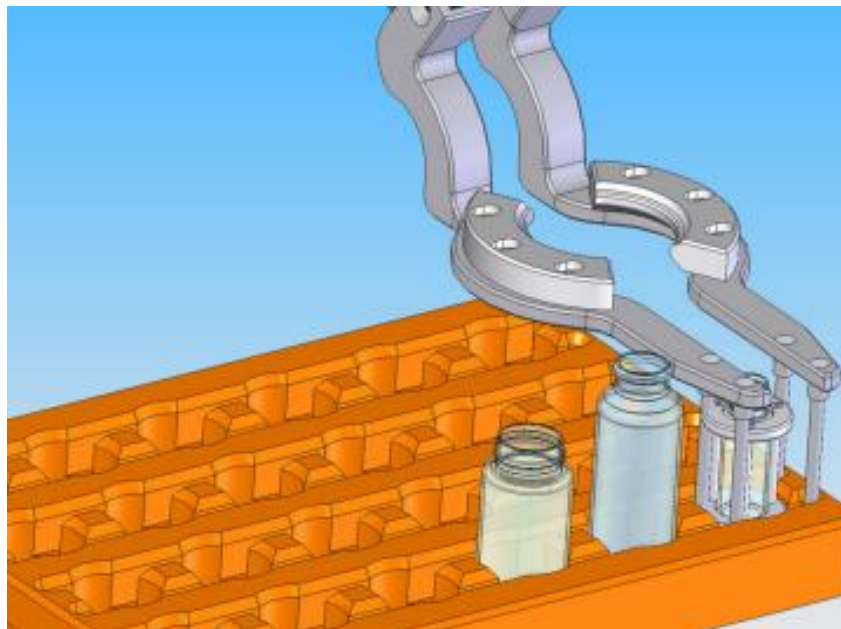


Рисунок 4.7 – Комп'ютерне проектування захвату, що показує місце захоплення флаконів

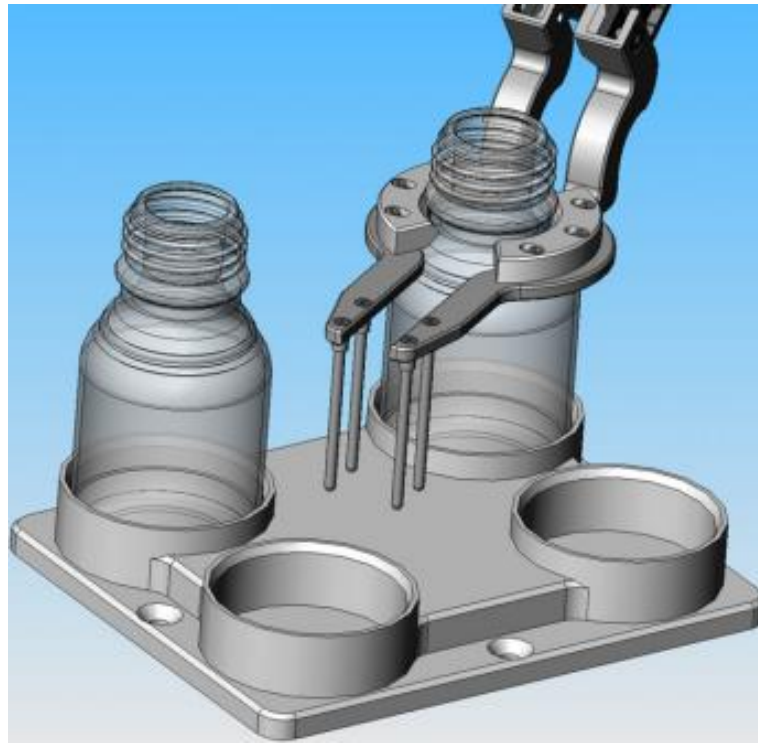


Рисунок 4.8 – Комп'ютерне моделювання захвату, що показує місце відбору
ПЛЯШОК

Система була модульована таким чином, що робот був встановлений на власному столі з контролером внизу, з ідентичними столами з обох боків, що забезпечило гнучкість у майбутньому. Наявність окремих столів дозволила переміщати кожен стіл через один дверний отвір.

Стенд також був спроектований для використання в поєднанні зі стандартним корпусом GSK. На кожній лавці були використані спеціальні підйомні ролики, які мають комбіновані ролики та вирівнювальну ніжку.

Лави виготовлені з використанням екструдованого алюмінієвого профілю ITEM10, який є простим у виготовленні, гнучким для майбутніх змін і дозволяє кріпити до нього різноманітні компоненти. Таку ж саму лавку і монтажну пластину можна використовувати для кріплення інших промислових роботів, таких як робот Kawasaki FS02N (рис. 4.9).

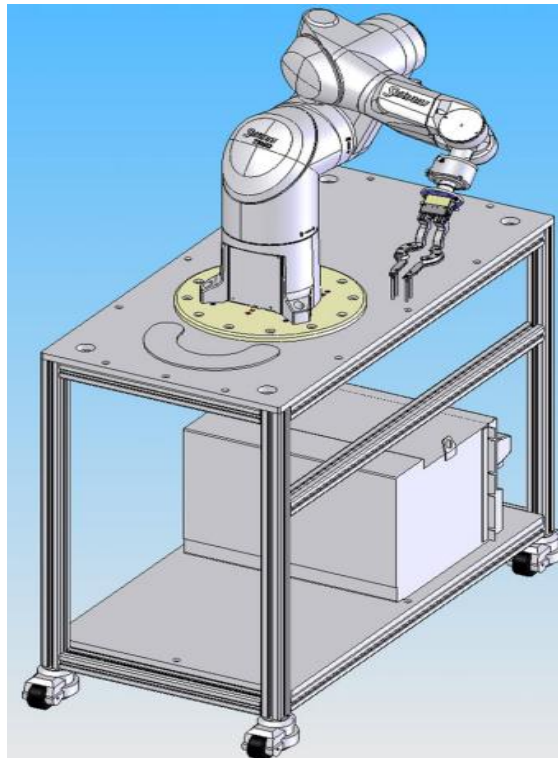


Рисунок 4.9 – Комп'ютерне проектування роботизованого стану

4.3 Програмне забезпечення “Evaporate Express”

Основний програмний пакет, який використовувався в прототипі, було збережено, але перетворено на систему, керовану базою даних, з покращеним користувацьким інтерфейсом. Драйвер для робота Staubli замінив драйвер Kawasaki.

Програмне забезпечення було розділене на два основних компоненти: набір програм управління роботом, які працювали на контролері робота Staubli, і керуюче програмне забезпечення Evaporate Express, встановлене на стандартному комп'ютері під управлінням Microsoft Windows XP.

Evaporate Express, комерційна програма на основі баз даних, написана компанією Aitken Scientific, надавала графічний інтерфейс користувача, що дозволяв вибирати зразки, які потрібно обробити. Інформація про зразки зберігалася в базі даних Microsoft Access, яка використовувалася системою під час роботи. Під час обробки зразків системою їхній статус оновлювався і зберігався в базі даних. У разі відключення електроенергії стан системи і

список зразків зберігалися, що дозволяло автоматично відновлювати роботу без втручання користувача в базу даних.

Програмне забезпечення містило низку модулів для керування різними апаратними компонентами. Модулі у вигляді об'єктів компонентної об'єктної моделі (COM) використовувалися для керування випарником V-10 і роботом Staubli. Ці модулі не були спеціально написані для Evaporate Express і могли бути використані в інших програмах. Вони також були сумісні з програмним забезпеченням для автоматизації A-S Automate від Aitken Scientific.

Модуль випарника керував V-10 через RS232; послідовний командний інтерфейс був наданий виробником, компанією Biotage. Було написано COM-об'єкт, що надає підмножину цих послідовних команд для таких операцій, як підйом і опускання ліфта, запуск протоколу тощо.

Інтерфейс керування випарником включає наступні методи:

- LoadVial() – підняти кредл і притиснути пробірку до випаровувальної головки;
- Evaporate() – запустити випаровування. Рецепт або метод і тип пробірки задаються через відповідні властивості;
- Stop() – контрольована зупинка випаровування;
- CleanNeedle() – запустити процес очищення аспіраційної голки інжекторної станції.

До властивостей, на які впливає елемент керування, належать:

- Recipe – вибір рецепту або методу, який буде використовуватися під час запуску процесу випаровування;
- VialType – вибір типу пробірки, який буде використовуватися для запуску процесу випаровування;
- Sample Volume – задати об'єм зразка, який буде використовуватися під час випаровування кількох зразків;
- Mode – встановити режим випаровування випарника;
- Status – повернути поточний стан випарника.

Модуль робота керував роботом Staubli і мав вигляд клієнта, який

взаємодіє з сервером, запущеним на контролері робота. Сервер, написаний Staubli, обробляв запити від клієнтського модуля і робив доступним ряд функцій. Вони включали запуск спеціальних програм робота для виконання конкретних завдань (наприклад, «переміщення посудини зі стелажа до випарника»), отримання інформації про стан робота і керування цифровими лініями вводу-виводу робота.

Зв'язок між клієнтом і сервером здійснювався за допомогою мережевого з'єднання на основі протоколу управління транспортом/інтернет-протоколу (TCP/IP). Модулі випарника і робота були розроблені з використанням загального інтерфейсу, що дозволяє підтримувати інші подібні пристрої в майбутньому без необхідності модифікації основного програмного забезпечення. Інтерфейс модуля робота містив наступні методи:

- StartProgram() – запуск іменованої програми на контролері робота;
 - StopProgram() – зупинити поточну програму керування роботом;
 - SetParameter() – встановити параметр у глобальному масиві параметрів, доступному для програми керування роботом;
 - QueryStatus() – повернути поточний стан контролера робота.
- Спеціальні програми для роботів, написані Aitken Scientific, керували конкретними маніпуляціями робота, необхідними для переміщення посудин по системі.

Існувало чотири основні програми робота:

- RackToEvap – взяти пробірку з однієї зі стійок і помістити її на підставку випарника;
- EvapToRack – забрати пробірку з підставки для випаровувача і повернути її у вихідне положення на стійці;
- RackToSampler – взяти пляшку або пробірку з однієї зі стійок і поставте її на інжекторну станцію;
- SamplerToRack – забрати пляшку або флакон з інжекторної станції і повернути його на вихідну позицію в стійку.

Крім того, була написана програма відновлення, яка гарантує, що робот

може безпечно повернутися в заздалегідь визначене «безпечне» положення з будь-якого місця в разі аварійної зупинки (рис. 4.10-4.12).

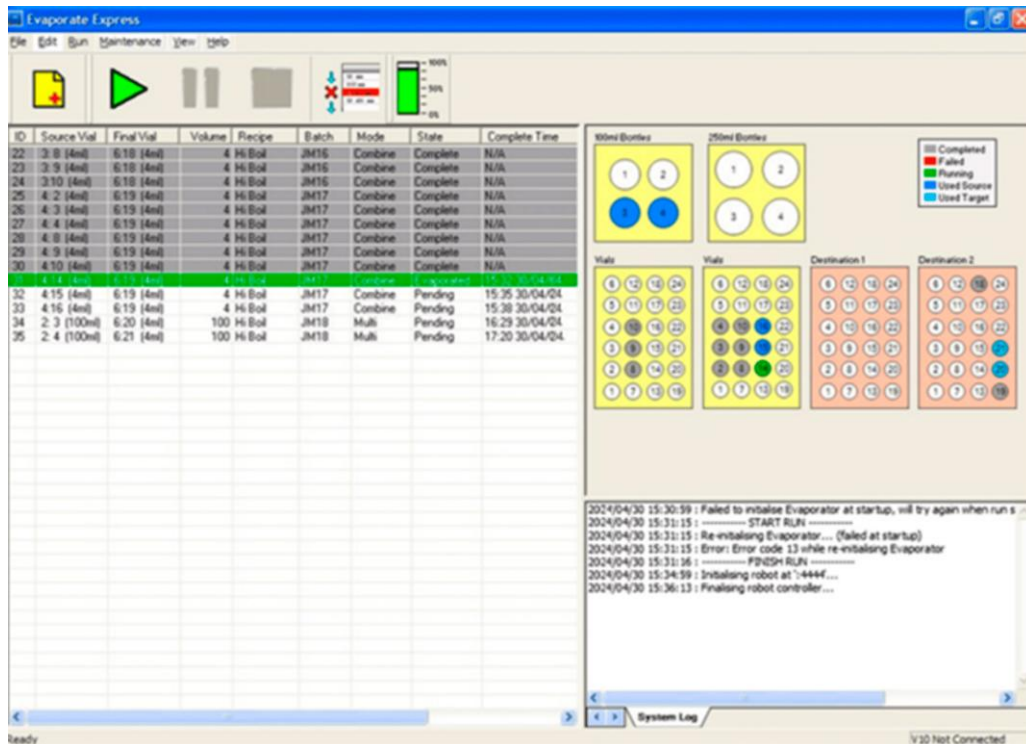


Рисунок 4.10 – Екран верхнього рівня

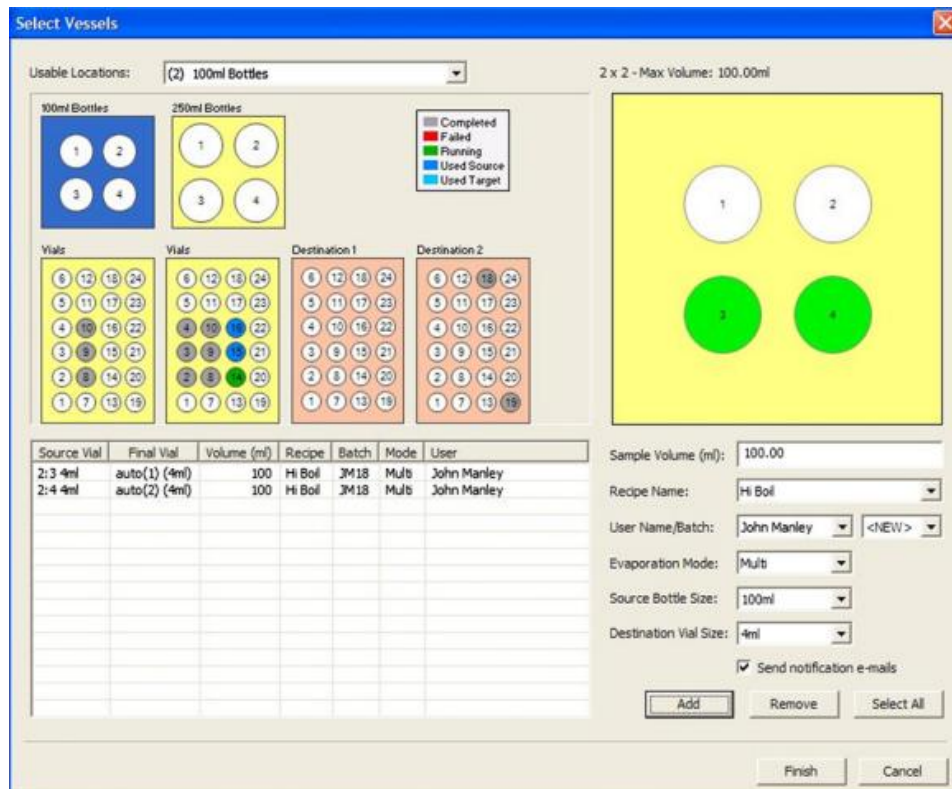


Рисунок 4.11 – Екран додавання зразків програми

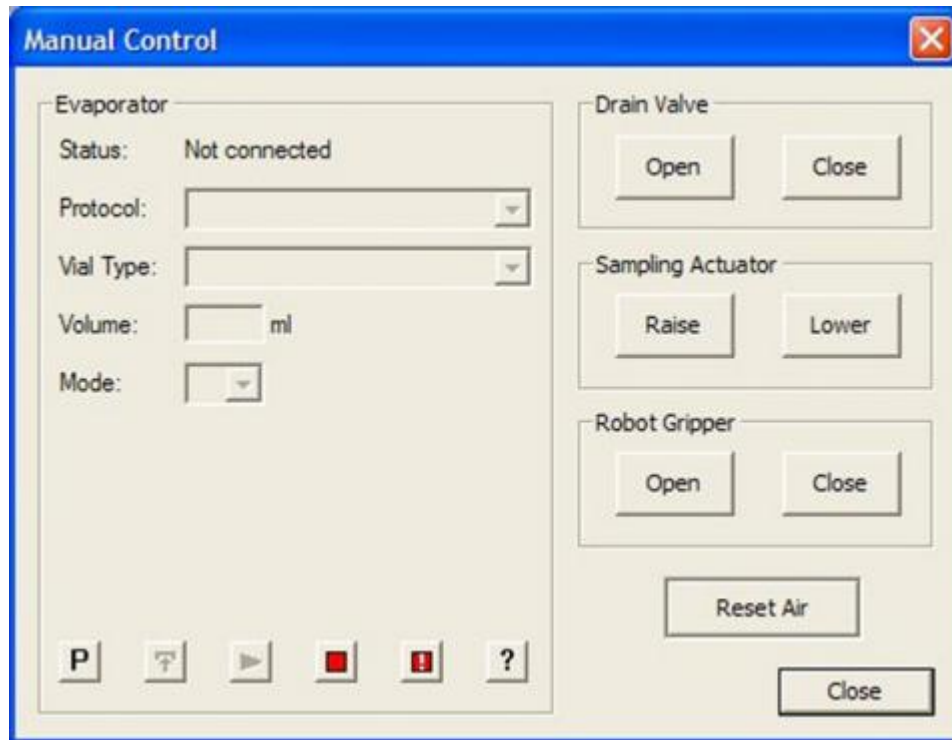


Рисунок 4.12 – Екран ручного керування програмою

4.4 Серверна програма

Staubli розробила спеціальний драйвер (GSK Command Server) для цієї програми, який працював на роботі TX60. Цей сервер був розроблений для прослуховування та реагування на повідомлення, надані клієнтом (Evaporate Express).

Сервер був розроблений так, щоб швидко відповідати клієнту, одночасно керуючи станом аварійних зупинок, дверей і маніпулятора робота. Для досягнення максимально швидкої реакції на повідомлення, отримане від клієнта, були потрібні дві окремі задачі: одна задача для прослуховування нових повідомлень, а інша – для моніторингу стану ланцюгів безпеки та активності робота.

Завдання «СЕРВЕРУ» являло собою нескінченний цикл без очікувань, пасток і затримок, завданням якого було прослуховування порту зв'язку. Будь-яке отримане повідомлення відхилялося або виконувалося залежно від активності системи та стану безпеки, який контролювався завданням

«СТАТУС». Ця задача контролювала будь-які програми, необхідні для зв'язку між клієнтом і сервером і навпаки. Єдиними повідомленнями, що генерувалися в цій задачі, були негайні відповіді на вхідні повідомлення від клієнта. Асинхронні повідомлення надсилалися клієнту за допомогою завдання «СЕРВЕР», але вони спочатку генерувалися у завданні «СТАТУС» або у програмах користувача (дії робота).

Команди, що підтримуються завданням "СЕРВЕР", включають в себе наступні:

- Run Program (G) – виконати іменовану програму робота, що знаходиться на контролері робота;
- Suspend Program (H) – призупинити виконання поточної програми робота;
- Resume Program (C) – відновити призупинену програму робота;
- Set Program Parameters (W) – встановити дані, що зберігаються у масиві параметрів програми на контролері робота. Масив параметрів програми був глобальним масивом, який програми робота могли читати для доступу до змінних даних;
- Set Digital Output (OD) – встановлює цифрові виходи на контролері робота у визначені стани;
- Get Digital Input (ID) – встановлювала стан цифрових входів на контролері робота.

Команди надсилалися клієнтом на сервер за допомогою TCP/IP-сокета. Якщо команда вимагала параметрів, вони додавалися до команди і відокремлювалися комами. Наприклад, команда «Запустити програму» вимагала два параметри: назву програми для запуску і значення таймауту (максимальний час виконання програми). Команда для запуску програми з назвою "RackToSampler" мала б вигляд: "G, RackToSampler, 120".

Отримавши цю команду, сервер негайно видав відповідь, що вказує на успіх або невдачу команди, з якою клієнт впорався відповідним чином. Ще одним нескінченним циклом було завдання «STATUS», яке відстежувало

стан будь-яких користувацьких програм або поточного руху, а також контролювало ланцюги електронного блокування та дверей. Ця задача також контролювала механізм тайм-ауту користувацьких програм.

Будь-які зміни стану передавалися на «СЕРВЕР» асинхронно. Стан усіх елементів системи перевірявся в межах кожної ітерації циклу. Командний сервер GSK мав функціональність, необхідну для взаємодії з Evaporate Express, що дозволило спростити, але в той же час розширити можливості дистанційного керування системою Sta'ubli TX60/CS8C.

На рисунку 4.13 показано різні стани програми користувача, якими керує завдання «STATUS» і які контролюються Evaporate Express за допомогою завдання «SERVER».

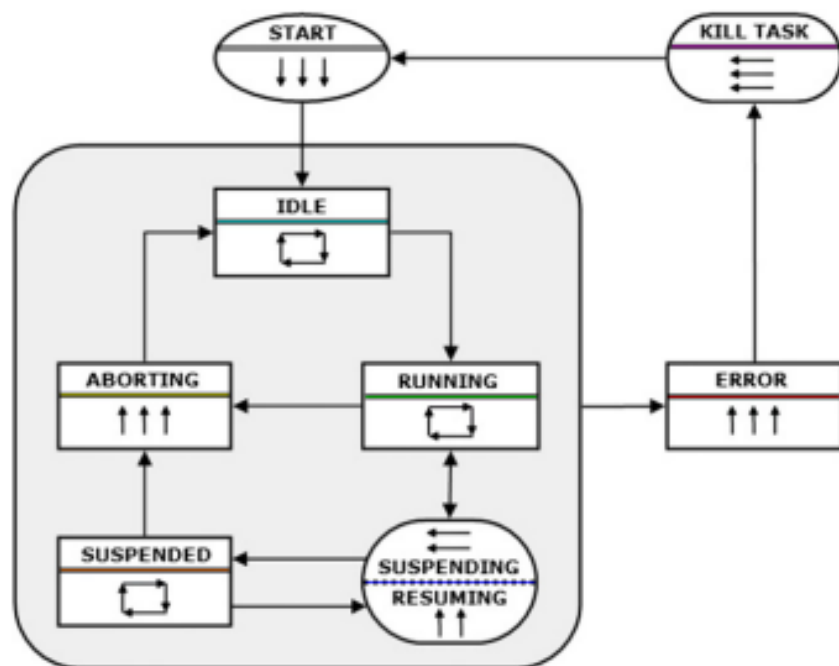


Рисунок 4.13 – Діаграма стану командного сервера GSK

4.5 Правила безпеки при роботі системи

Щоб відповідати європейським (CE) і внутрішнім стандартам безпеки, на етапі проектування необхідно було вирішити низку аспектів безпеки. Використання блокувань на корпусі гарантувало, що робот і інжектор будуть

відключені при відкритті дверей [37].

Навіть якщо інжектор рухався, коли відкривалися двері корпусу, пневматичний циліндр, а отже, і голка, негайно зупинялися. Програмне забезпечення було написано таким чином, що рухи робота були точковими, із заданою швидкістю, а маршрути були чітко визначені і протестовані. Ці програми зберігалися на контролері, так що користувачеві ніколи не доводилося взаємодіяти безпосередньо з роботом, тільки через інтерфейс, який контролював всю систему.

Електричні ланцюги були відмовостійкими і підключені безпосередньо до ланцюгів безпеки робота. З обох боків до системи були додані електронні зупинки, що дозволяють швидко зупинити роботу в разі виникнення проблеми [37].

У разі спрацювання електронної зупинки, збою живлення або іншої події, яка зупиняла робота, програмне забезпечення системи мало механізм самовідновлення, який повертав робота в безпечне положення на повільній швидкості, змінюючи попередній шлях на протилежний. Це було ретельно протестовано в різних сценаріях.

4.6 Програмування робота Staubli

Мова програмування “VAL 3 language”, яка використовувалася для керування роботом, є легкою для вивчення, що дозволяло швидко писати програми керування. Однак ця мова також дозволяла керувати роботами високої складності та інтегрувати їх з іншими системами, але вимагала експертних знань.

За допомогою знань Staubli та Aitken Scientific написано систему управління на основі вимог користувача. Нижче показано просту програму, яка переміщує пробірку зі стійки на V-10. Серія команд переміщення безпечно спрямовує робота до місця призначення і переміщує флакон або пляшку в поєднанні з відкриттям і закриттям захвату.

Базова команда «MOVE» вимагає, щоб робот перемістився з поточної позиції у вказану позицію (з використанням декартових координат x, y, z, gx, gy, rz), по прямій лінії з вказаним типом інструменту (геометрія і дія), з описом руху (швидкість, прискорення, уповільнення, змішування і т.д.). Перед кожною командою додано коментарі, що пояснюють її призначення.

```
// Забезпечити відкриття захвату
open(toolVial)

// Переміщення до підходу до стелажа
nMoveID=movel(ptRackApp,toolVial,mNormal)

// Підхід до посудини в стелажі
nMoveID=movel(appro(ptVessel,trRackWithoutAp[iVesselType]),toolVial,
mNormal)

// Переміщення до фінальної позиції посудини
nMoveID=movel(ptVessel,toolVial,mVialPickup) waitEndMove()

// Закриття захвату
close(toolVial)

// Відхід від стелажа
nMoveID=movel(appro(ptVessel,trRackWithAp[iVesselType]),toolVial,mV
ialPickup)

// Переміщення до підходу до стелажа
nMoveID=movel(ptRackApp,toolVial,mNormal)

// Переміщення до безпечної позиції
nMoveID=movel(ptSafe,toolNone,mNormal)

// Підхід до випарника з посудиною
nMoveID=movel(appro(ptEvaporator,trEvapWithAp), toolVial,mNormal)

// Переміщення у випарник
nMoveID=movel(appro(ptEvaporator,trCdlWithAp), toolVial,mEvaporator)

// Переміщення на підставку
nMoveID=movel(ptEvaporator,toolVial,mEvaporator) waitEndMove()
```

```

// Відкриття захвату
open(toolVial)
// Відхід від підставки
nMoveID=movel(appro(ptEvaporator,trCdlWithoutAp),
toolVial,mEvaporator)
// Вихід з випарника
nMoveID=movel(appro(ptEvaporator,trEvapWithoutAp),
toolVial,mEvaporator) waitEndMove()
// Переміщення до безпечної позиції
nMoveID=movel(ptSafe,toolNone,mNormal) waitEndMove() end

```

Додавання перевірок, наприклад, перевірка того, чи люлька вже була в V-10 за допомогою роботизованого вводу/виводу, побудована на базовій програмі, зробила мову дуже потужною.

```

// Перевірити, що у випарнику немає посудини на підставці
// перевірити ІО підставки для посудини
if (dioGet(diVialOnCradle)==0)
// надіслати подію помилки
call SendEvent(EV_ERROR,E_CRADLE_VIAL)
// відобразити повідомлення
putln("The evaporator cradle is already holding a vial.")
// записати повідомлення у журнал
logMsg("The evaporator cradle is already holding a vial.")
// зачекати 1 секунду
delay(1)
return
endIf

```

4.7 Висновки до четвертого розділу

Система була спроектована з відкритим доступом і інтуїтивно

зрозумілим інтерфейсом, що вимагало мінімального навчання для користувачів. У перші місяці після впровадження у хімічній лабораторії з високою пропускною здатністю, де працюють 50 осіб, система обробила велику кількість зразків без жодних проблем.

Час випаровування для V-10 був значно меншим порівняно з іншими методами випаровування, такими як центрифугування або обдув азотом, у 20–40 разів.

Хоча швидкість обробки окремих зразків на ручній системі V-10 була високою, при необхідності виконання множинних випаровувань від різних користувачів продуктивність і ефективність різко знижувалися.

Автоматизована система була розроблена для вирішення цієї проблеми завдяки можливості програмного забезпечення ставити зразки у чергу та автоматично запускати послідовності обробки за допомогою роботизованої системи.

Після впровадження автоматизованої системи у лабораторії її пропускна здатність зросла більш ніж у чотири рази, до середнього показника 20 зразків на день. Це далеко не максимальна потужність, і очікується, що використання системи збільшиться з підвищенням рівня обізнаності користувачів про її переваги.

Використання модульного підходу до проектування автоматизованих систем забезпечує швидке та економічно ефективне впровадження рішень, а також повторне використання компонентів у майбутньому зі зміною процесів. Розробка системи із застосуванням CAD також дозволяє прискорити процес розробки та ефективніше вносити зміни. Система забезпечила економію часу та підвищення ефективності випаровування розчинників для хіміків.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі розроблено автоматизовану систему управління для модульних роботизованих комплексів, призначених для інтеграції у гнучкі виробничі лінії. Метою роботи було створення ефективного рішення, що забезпечує високу продуктивність і адаптивність у промислових умовах.

У процесі виконання роботи проведено детальний аналіз сучасних технологій автоматизації та модульних робототехнічних систем. У першому розділі досліджено принципи проектування роботів, зокрема модульний підхід, який дозволяє знижувати витрати та забезпечувати гнучкість у роботі систем. Звернуто увагу на важливість децентралізації управління та адаптації алгоритмів до змін середовища.

Другий розділ присвячено аналізу архітектур модульних робототехнічних систем. Розглянуто архітектури слота, шини, секційні системи та ферми, які дозволяють створювати ефективні й надійні системи. Проведений аналіз підтвердив доцільність інтеграції різних архітектур для підвищення продуктивності роботів.

Третій розділ присвячено експериментальному тестуванню розробленої системи. Використовуючи засоби MATLAB, проведено моделювання динаміки роботів та тестування генераторів ходи, які забезпечують синхронізацію вузлів у багатотільних структурах. Результати експериментів підтвердили ефективність розробленої системи у виробничих умовах.

Отже, розроблена автоматизована система може бути успішно впроваджена у виробничих процесах для підвищення ефективності й гнучкості. Вона забезпечує зручний інтерфейс, мінімальні витрати на навчання користувачів та високу продуктивність, що робить її перспективним рішенням для сучасної промисловості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Seo, J., Paik, J., & Yim, M. (2020). Modular reconfigurable robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2(1), 63-88.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 49 с.
3. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП “УкрНДНЦ”. 2016. 30 с.
4. Сверчков М.О. Системи автоматизації для модульних роботизованих систем виробничного призначення // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей. Харків : ХНУРЕ, 2024. Вип. 2. С. 113-117.
5. Jimenez, L., Demoly, F., Deng, S., & Gomes, S. (2020). Towards a Knowledge-Based Design Methodology for Modular Robotic System. In *Product Lifecycle Management Enabling Smart X: 17th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2020, Rapperswil, Switzerland, July 5–8, 2020, Revised Selected Papers 17* (pp. 50-58). Springer International Publishing.
6. Zhou, L., & Bai, S. (2020). A new approach to design of a lightweight anthropomorphic arm for service applications. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(3), 031001.
7. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. Посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та

технології» /М. М. Поліщук, М.М. Ткач. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.

8. Dai, Y., Xiang, C. F., Liu, Z. X., Li, Z. L., Qu, W. Y., & Zhang, Q. H. (2022). Modular Robotic Design and Reconfiguring Path Planning. *Applied Sciences*, 12(2), 723.

9. Drew, D. S. (2021). Multi-agent systems for search and rescue applications. *Current Robotics Reports*, 2, 189-200.

10. Tan, N., Hayat, A. A., Elara, M. R., & Wood, K. L. (2020). A framework for taxonomy and evaluation of self-reconfigurable robotic systems. *IEEE Access*, 8, 13969-13986.

11. Dokuyucu, H. İ., & Özmen, N. G. (2023). Achievements and future directions in self-reconfigurable modular robotic systems. *Journal of Field Robotics*, 40(3), 701-746.

12. Waidelich, B., & Pollitt, G. (2023). China Maritime Report No. 29: PLAN Mine Countermeasures, Platforms, Training, and Civil-Military Integration.

13. Xu, J., D'Antonio, D. S., & Saldaña, D. (2021, May). H-modquad: Modular multi-rotors with 4, 5, and 6 controllable dof. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 190-196). IEEE.

14. Yang, J., Sadigh, D., & Finn, C. (2023). Polybot: Training one policy across robots while embracing variability. *arXiv preprint arXiv:2307.03719*.

15. Nguyen, H. D., Vu, X. S., & Le, D. T. (2021, May). Modular graph transformer networks for multi-label image classification. In *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence* (Vol. 35, No. 10, pp. 9092-9100).

16. Li, H., Wang, H., Cui, L., Li, J., Wei, Q., & Xia, J. (2022). Design and experiments of a compact self-assembling mobile modular robot with joint actuation and onboard visual-based perception. *Applied Sciences*, 12(6), 3050.

17. Spinos, A., Carroll, D., Kientz, T., & Yim, M. (2017, September). Variable topology truss: Design and analysis. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 2717-2722). IEEE.

18. Liang, G., Luo, H., Li, M., Qian, H., & Lam, T. L. (2020, October).

Freebot: A freeform modular self-reconfigurable robot with arbitrary connection point-design and implementation. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 6506-6513). IEEE.

19. Chen, J., Xie, F., Liu, X. J., & Bi, W. (2021). Stiffness evaluation of an adsorption robot for large-scale structural parts processing. *Journal of Mechanisms and Robotics*, *13*(4), 040907.

20. Usevitch, N. S., Hammond, Z. M., et al (2020). An untethered isoperimetric soft robot. *Science Robotics*, *5*(40), eaaz0492.

21. Armanini, C., Boyer, F., Mathew, A. T., Duriez, C., & Renda, F. (2023). Soft robots modeling: A structured overview. *IEEE Transactions on Robotics*, *39*(3), 1728-1748.

22. Parada, I., Sacristán, V., & Silveira, R. I. (2021). A new meta-module design for efficient reconfiguration of modular robots. *Autonomous robots*, *45*(4), 457-472.

23. Agarwal, G., Robertson, M. A., Sonar, H., & Paik, J. (2021). Design and Computational Modeling of a Modular, Compliant Robotic Assembly for Human Lumbar Unit and Spinal Cord Assistance (vol 7, 14391).

24. Matsubara, K., Tachibana, D., et al (2020). Hydrogel actuator with a built-in stimulator using liquid metal for local control. *Advanced Intelligent Systems*, *2*(5), 2000008.

25. Quadrini, F., Iorio, L., Bellisario, D., & Santo, L. (2021). Shape memory polymer composite unit with embedded heater. *Smart Materials and Structures*, *30*(7), 075009.

26. Hu, K., Rabenoroso, K., & Ouisse, M. (2021). A review of SMA-based actuators for bidirectional rotational motion: application to origami robots. *Frontiers in Robotics and AI*, *8*, 678486.

27. Zantema, H., & van Oostrom, V. (2023). The paint pot problem and common multiples in monoids. *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing*, 1-23.

28. Huang, T. Y., Gu, H., & Nelson, B. J. (2022). Increasingly intelligent

micromachines. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 5(1), 279-310.

29. Baines, R., Fish, F., Bongard, J., & Kramer-Bottiglio, R. (2024). Robots that evolve on demand. *Nature Reviews Materials*, 9(11), 822-835.

30. Fu, Q., & Li, C. (2020). Robotic modelling of snake traversing large, smooth obstacles reveals stability benefits of body compliance. *Royal Society open science*, 7(2), 191192.

31. Qureshi, A. H., Miao, Y., Simeonov, A., & Yip, M. C. (2020). Motion planning networks: Bridging the gap between learning-based and classical motion planners. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(1), 48-66.

32. Xia, H., & Guo, P. (2022). Sliding mode-based online fault compensation control for modular reconfigurable robots through adaptive dynamic programming. *Complex & Intelligent Systems*, 8(3), 1963-1973.

33. Romiti, E., Malzahn, J., Kashiri, N., et al (2021). Toward a plug-and-work reconfigurable cobot. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 27(5), 3219-3231.

34. Nainer, C., Feder, M., & Giusti, A. (2021, August). Automatic generation of kinematics and dynamics model descriptions for modular reconfigurable robot manipulators. In *2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 45-52). IEEE.

35. Wang, S., Qiu, Y., Li, W., et al (2024, August). Multi-stage Global and Local Cooperative Constrained Multi-objective Evolutionary Algorithm. In *2024 6th International Conference on Data-driven Optimization of Complex Systems (DOCS)* (pp. 200-205). IEEE.

36. Невлюдов І. Ш. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева. Харків: ХНУРЕ, 2020. 240 с.

37. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / В. А. Айвазов. Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька. ХНУРЕ. Харків : ХНУРЕ, 2018. 28 с.