

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**Факультет транспорту та механічної інженерії**

(повне найменування факультету)

**Кафедра прикладної механіки та мехатроніки**

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ВЕРСТАТІВ З  
ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ІМм-21

**Костюк Максим Володимирович**

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

**Редько Ростислав Григорович**

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

**Четвержук Тарас Іванович**

(підпис)

Луцьк – 2023 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Р.Редько

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Костюк Максим Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Дослідження механізмів верстатів з паралельною кінематикою*

Керівник роботи: *Редько Ростислав Григорович, к.т.н., доцент*, затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» січня 2023 р. № 42/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: 1.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: *результати аналізу наявної в літературних джерелах інформації, патентно-інформаційні дослідження щодо аналізу відомих схем, конструкцій і елементів МПС, результатів їх розробки, дослідження та експлуатації; вплив характеристик механізмів паралельної структури на техніко-економічні показники верстатів, у яких вони застосовуються; рекомендації щодо створення МПС, які ефективно працюють у певних типах технологічного обладнання.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

*Анотація. Зміст. Вступ. 1 Огляд механізмів паралельної структури, що використовуються в технологічному обладнанні. 2 Порівняльний аналіз традиційних механізмів технологічного обладнання і МПС. 3 Аналіз типових структур і кінематичних схем обладнання на основі МПС. 4 Використання МПС для підвищення ефективності технологічного обладнання. Висновки. Перелік посилань. Додатки.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Недоліки традиційних механізмів технологічного обладнання – 1 лист (ф.А1), вимоги та принципи побудови вискоефективних механізмів – 1 лист (ф.А1), аналіз коефіцієнта корисної дії – 1 лист (ф.А1), класифікація технологічного обладнання з ПК – 1 лист (ф.А1), дослідження розташування виконавчого органу по відношенню до об'єкту позиціонування – 1 лист (ф.А1), узагальнена структурно-кінематична схема МПС – 1 лист (ф.А1), структура класифікаційних ознак технологічного обладнання з ПК - 1 лист (ф.А1).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

02.09.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми, огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>15.09.23</i>	
2.	<i>Огляд механізмів паралельної структури, що використовуються в технологічному обладнанні</i>	<i>01.10.23</i>	
3.	<i>Порівняльний аналіз традиційних механізмів технологічного обладнання і МПС</i>	<i>15.10.23</i>	
4.	<i>Аналіз типових структур і кінематичних схем обладнання на основі МПС</i>	<i>25.10.23</i>	
5.	<i>Використання МПС для підвищення ефективності технологічного обладнання</i>	<i>01.11.23</i>	
6.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>20.11.23</i>	
7.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>25.11.23</i>	
8.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	<i>01.12.23</i>	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_ (підпис)

Костюк М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Редько Р.Г.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Костюк М.В. Дослідження механізмів верстатів з паралельною кінематикою. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2023.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 4 розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження ефективності використання механізмів паралельної структури в технологічному обладнанні. Для досягнення мети в роботі поставлені і виконані такі задачі: проведено аналіз наявної в літературних джерелах інформації, що стосується об'єкта досліджень, зокрема у сфері патентування; на основі патентно-інформаційних досліджень проведено аналіз відомих схем, конструкцій і елементів МПС, результатів їх розробки, дослідження та експлуатації; виконано оцінку ступеня впливу характеристик механізмів паралельної структури на техніко-економічні показники верстатів, у яких вони застосовуються; розроблено рекомендації щодо створення МПС, які ефективно працюють у певних типах технологічного обладнання. Об'єктом досліджень є закономірності впливу факторів конструктивного та кінематичного характеру на функціональні можливості технологічного обладнання з механізмами паралельної кінематики. Предметом досліджень є механізми паралельної структури, що працюють в технологічному обладнанні.

Ключові слова: технологічне обладнання, механізми паралельної структури, верстат, заготовка, деталь, режими різання, формоутворюючі рухи.

## ABSTRACT

Kostyuk M.V. Study of mechanisms of machines with parallel kinematics. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Applied Mechanics" specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2023.

The master's thesis consists of an introduction, 4 chapters, conclusions and proposals, a list of used sources.

The purpose of the qualification work is to study the effectiveness of the use of parallel structure mechanisms in technological equipment. To achieve the goal, the following tasks were set and fulfilled in the work: an analysis of information available in literary sources related to the object of research, in particular in the field of patenting, was carried out; on the basis of patent and information research, an analysis of known schemes, structures and elements of MPS, the results of their development, research and operation was carried out; an assessment of the degree of influence of the characteristics of the mechanisms of the parallel structure on the technical and economic indicators of the machines in which they are used was performed; recommendations have been developed for the creation of MPS that work effectively in certain types of technological equipment. The object of research is the patterns of influence of structural and kinematic factors on the functional capabilities of technological equipment with parallel kinematics mechanisms. The subject of research is the mechanisms of the parallel structure working in technological equipment.

Key words: technological equipment, parallel structure mechanisms, machine tool, workpiece, part, cutting modes, forming movements.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. ОГЛЯД МЕХАНІЗМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ.....	12
1.1. Основні терміни та визначення, що використовуються для означення структур МПС та їх елементів.....	12
1.2 Аналіз патентування механізмів верстатів з паралельною структурою .....	17
1.3. Поява та розповсюдження технологічного обладнання з МПС ....	21
1.4. Мета і задачі наступних досліджень .....	25
2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ І МПС .....	26
2.1. Порівняльний аналіз принципів побудови традиційних механізмів і МПС .....	26
2.2. Порівняльна характеристика МПС і традиційних механізмів технологічного обладнання .....	29
2.3. Аналіз впливу типу з'єднання в механізмах традиційного технологічного обладнання та в МПС на коефіцієнт корисної дії механічної системи .....	33
3. АНАЛІЗ ТИПОВИХ СТРУКТУР І КІНЕМАТИЧНИХ СХЕМ ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ МПС .....	38
3.1. Базові структурні елементи МПС .....	38
3.2. Встановлення класифікаційних ознак технологічного обладнання з МПС .....	42
3.3. Класифікація технологічного обладнання з МПС .....	50
3.4. Теоретичні передумови моделювання формоутворюючих рухів верстатів нових компоновок .....	54

4. ВИКОРИСТАННЯ МПС ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ .....	58
4.1. Оцінка функціональних можливостей технологічного обладнання на основі МПС .....	58
4.2. Оцінка можливостей застосування МПС у робото технічних вимірювальних системах .....	60
4.3. Оцінка передумов розширення області практичного використання МПС .....	68
4.4. Оцінка шляхів оптимізації роботи верстатів з МПС .....	70
4.5. Оцінка можливості поєднання МПС із традиційними механізмами технологічного обладнання .....	70
4.6. Нова концепція побудови верстатів з МПС .....	72
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ .....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	80

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БТА – багатошпindelний токарний автомат;

ДЕ – джерело енергії;

З – заготовка, що затискається;

ЗМ – затискний механізм (механізм затиску заготовки токарних автоматизованих верстатів);

ЗЦ – затискна цанга;

МЗ – муфта затиску;

П – патрон;

ППМ – передавально – підсилюючий механізм;

ПрЗ – привод затиску (привод механізму затиску заготовки);

ПСМ – пружна система механізму;

ТА – токарний автомат;

ТЗ – труба затиску;

Ш – шпindel.

## ВСТУП

*Актуальність теми.* У технологічному обладнанні використовуються різноманітні механізми, які відрізняються службовим призначенням, технологічними і функціональними можливостями, кінематичними структурами, принципом дії та конструктивним виконанням. Вибір та сукупність відповідних механізмів реалізує загальну функцію технологічного обладнання – виробництво продукції необхідної якості з заданою продуктивністю.

Незважаючи на різноманітність функціонального призначення, кінематичної структури та конструктивного виконання механізмів, усі вони мають багато спільного за принципами побудови та проектування.

Слід відмітити, що більшість механізмів, застосованих у технологічному обладнанні побудовані на традиційних підходах та принципах їх проектування, мають визначені недоліки конструкторського, технологічного та функціонального характеру, які закладаються на етапах їх проектування.

Технологічні можливості верстатних систем визначаються кінематичною структурою, компоновкою, конструктивним виконанням, рівнем автоматизації та технічною характеристикою.

Технологічне обладнання з механізмами паралельної структури (МПС) має більш широкий спектр технологічних можливостей ніж традиційні верстати внаслідок забезпечення виконавчому органу до шести ступенів вільності, що дозволяє здійснювати йому переміщення у просторі відносно усіх осей координатної системи та реалізувати майже усі схеми формоутворення поверхонь деталей, а також інші процеси виготовлення продукції за одну установку деталі з усіх сторін, крім базових.

Концепція проектування технологічного обладнання з МПС передбачає конструктивне виконання кінематичних ланцюгів у вигляді просторових стрижневих ферм, які мають незначну масу рухомих елементів, що обумовлює отримання надвисоких швидкостей та прискорень виконавчого органу: частота обертання шпинделя досягає 120 000 хв-1, а в окремих випадках майже 180 000 хв-1 (при процесах шліфування) швидкість лінійних переміщень має величину до 100 м/хв, а прискорень – 50 м/с<sup>2</sup>.

Для цілеспрямованого проектування просторових механізмів паралельної структури необхідно розробити їх теорію, яка дозволить визначити рухи, різні положення механізму та сили, які діють в його елементах.

Крім того, необхідно мати також поглиблений аналіз просторових кінематичних ланцюгів та механізмів, а саме:

- аналіз умов обертальності;
- можливості попадання в "особливі", в тому числі "мертві", положення;
- можливості "розгалуження" рухів;
- можливості введення додаткових закріплень, без порушення рухомості механізму.

Тому в останні десятиріччя значно зросла кількість теоретичних досліджень просторових механізмів та відбувається інтенсивне збільшення літературних джерел у цій галузі.

*Мета і задачі дослідження.* Метою магістерської роботи є дослідження ефективності використання механізмів паралельної структури в технологічному обладнанні.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі задачі:

1. Провести аналіз наявної в літературних джерелах інформації, що стосується об'єкта досліджень, зокрема у сфері патентування.

2. На основі патентно-інформаційних досліджень провести аналіз відомих схем, конструкцій і елементів МПС, результатів їх розробки, дослідження та експлуатації.

3. Оцінити ступінь впливу характеристик механізмів паралельної структури на техніко-економічні показники верстатів у яких вони застосовуються.

4. Розробити рекомендації щодо створення МПС які ефективно працюють у певних типах технологічного обладнання.

*Об'єктом досліджень є закономірності впливу факторів конструктивного та кінематичного характеру на функціональні можливості технологічного обладнання з механізмами паралельної кінематики.*

*Предметом досліджень є механізми паралельної структури, що працюють в технологічному обладнанні.*

## РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕХАНІЗМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ, ЩО  
ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ

1.1. Основні терміни та визначення, що використовуються для означення структур МПС та їх елементів

Починаючи з 40-х рр. ХХ ст. запропоновано значну кількість механізмів паралельної структури, але аналіз вітчизняних та закордонних публікацій у галузі досліджень та проектування багатокоординатних та багатопоточних механізмів показує, що дослідники різних наукових центрів використовують різноманітні найменування подібних механізмів, найбільш поширеними з них є механізми: з паралельною структурою; платформеного типу; вищого класу; з паралельною топологією; з паралельним приводом; паралельні; паралельної структури; з паралельною кінематикою; з паралельними зв'язками.

Усі наведені найменування механізмів, в основному, точно визначають їх кінематичну структуру та специфічні властивості, але з метою вдосконалення термінології, на нашу думку, слід прийняти єдину назву "механізми паралельної структури" (МПС). Назви "механізми платформеного типу", "механізми вищого класу", "механізми з паралельними зв'язками" не можуть бути застосовані для усіх подібних механізмів, тому що вони визначають тільки деякі їх індивідуальні особливості. Назва "механізм з паралельною топологією" також є некоректним, тому що термін "топологія" у математиці має визначений зміст, пов'язаний з відображенням деяких математичних образів. Термін "паралельна структура", на думку авторів, найбільш точно визначає фізичну сутність, взаємне розміщення та зв'язок складових частин, специфічні властивості та принцип дії всього класу подібних механізмів, що полягає, в першу чергу, в одночасному паралельному функціонуванні всіх кінематичних ланок, які складають основу механізмів.

Але, що стосується технологічного обладнання, побудованого на основі МПС, доцільно буде застосувати термін "технологічне обладнання з паралельною кінематикою". МПС відрізняються функціональним

призначенням, кінематичною структурою, ступенями вільності, принципом дії та конструктивним виконанням, які розділяються на дві групи:

– повнопаралельні – механізми, у яких кількість ( $n$ ) ступенів вільності ( $F$ ) виконавчого органу дорівнює кількості кінематичних ланок ( $m$ ), кожна з яких має індивідуальний привід за допомогою якого виконавчий орган механізму реалізує задані координатні переміщення.

Таким чином, для повнопаралельного механізму:

- кількість ступенів вільності  $n=6$ ;
- кількість кінематичних ланок  $m=6$ .

Тоді,  $n = m$ .

– неповнопаралельні – механізми, у яких кількість ( $n$ ) ступенів вільності виконавчого органу більше, ніж кількість кінематичних ланок ( $m$ ), кожна з яких має два та більше індивідуальних приводів переміщень (рис. 1.1).

Механізм складається з рухомого виконавчого органу (ВО) та нерухомого стаціонарного блоку НСБ, які шарнірно з'єднані трьома основними кінематичними ланками, кожна з яких має індивідуальний привід, та трьома додатковими кінематичними ланками, які теж мають індивідуальний привід. Додаткові кінематичні ланки з'єднують основні кінематичні ланки з нерухомим стаціонарним блоком.

ВО подібного механізму реалізує шість координатних переміщень (три переміщення здійснюються трьома основними кінематичними ланками  $m_o=3$ , а три переміщення реалізуються трьома додатковими кінематичними ланками  $m_d=3$ ).

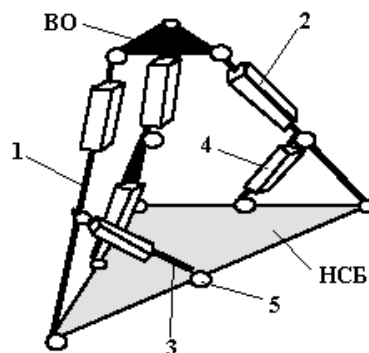


Рисунок 1.1 Неповно-паралельний механізм

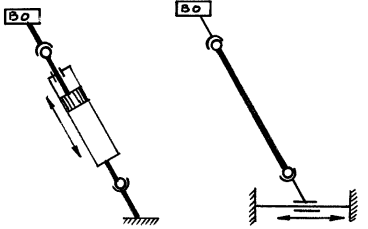
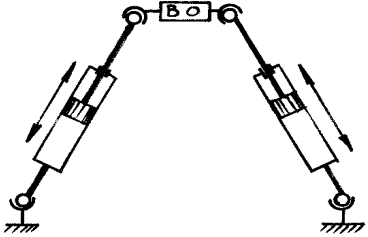
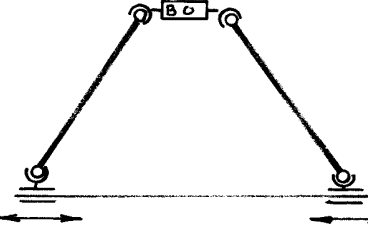
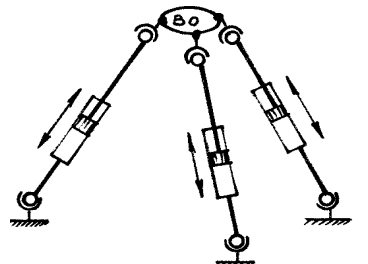
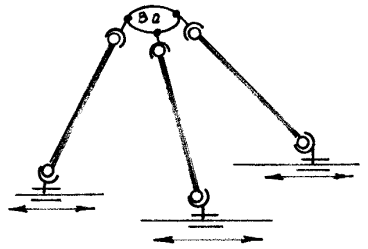
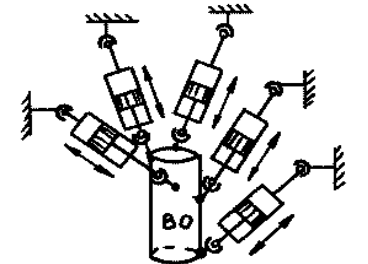
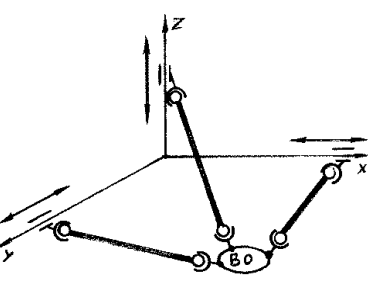
Таким чином, для неповнопаралельного механізму  $n=6$ ;  $m=3$ ;  $n > m$ . Дослідженням та проектуванням МПС займається значна кількість науково-дослідних центрів світу: виробничі фірми, проектні організації та наукові лабораторії багатьох університетів США, Німеччини, Франції, Італії, Японії, Кореї та ін.. Але, як показує аналіз наукових публікацій, інформація щодо єдиної класифікації та термінології у цій галузі відсутня. На кафедрі "Металорізальні верстати та системи" Кіровоградського національного технічного університету і кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ "КПІ" ведеться робота по узагальненню і вдосконаленню термінології, основних положень та систематизації механізмів паралельної структури та визначення їх місця при створенні технологічного обладнання для обробки, складання, випробування та вимірювання машинобудівної продукції.

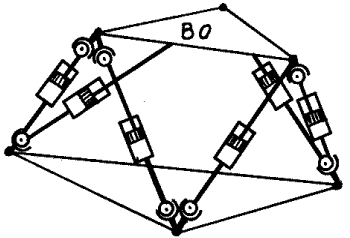
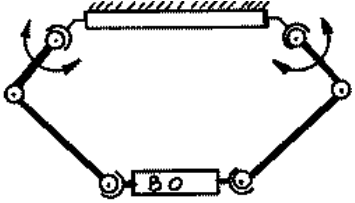
В запропонованій термінології використана існуюча термінологія з теорії механізмів та машин, теоретичної механіки та деталей машин. У табл. 1.1 наведена термінологія, яка використовується в даному посібнику.

Таблиця 1.1. – Основні терміни та визначення

Термін	Визначення	Схема
1	2	3
Механізм паралельної структури	Механізм, в якому рухомий виконавчий орган шарнірно зв'язаний з нерухомим елементом кінематичними ланцюгами, кожний з яких має індивідуальний привід або накладає визначену кількість зв'язків на переміщення виконавчого органу	—
Технологічне обладнання з паралельною кінематикою	Технологічне обладнання, побудоване на основі механізмів паралельної структури	—
Опорний шарнір	Трьохрухома кінематична обертальна пара, яка з'єднує нерухомий елемент механізму з кінематичним ланцюгом	—

Сферичний шарнір	Трьохрухома кінематична обертова пара, елементи якої виконані у вигляді сфери	—
Універсальний шарнір	Пристрій для передачі обертального руху між штангою та нерухомим елементом механізму, осі яких не лежать на одній прямій та мають відносне переміщення	—
Замкнений кінематичний ланцюг	Кінематичний ланцюг, кожна ланка якого з'єднана з двома кінематичними парами та створює замкнений контур	
Незамкнений кінематичний ланцюг	Система з'єднаних кінематичними парами ланок, які не створюють замкнений контур	
Паралельне з'єднання механізмів (кінематичних ланок)	Сукупність механізмів (кінематичних ланок), в якій усі входні та вихідні ланки взаємозв'язані	
Послідовне з'єднання механізмів (кінематичних ланок)	Сукупність механізмів (кінематичних ланок), в якій вихідна ланка попереднього механізму з'єднана з входною ланкою наступного механізму та далі аналогічно.	
Сферичний механізм паралельної структури	Механізм, у якому всі постійні та миттєві осі обертання ланок перетинаються в одній точці	—
Метод перетворення координат опорних шарнірів механізмів паралельної структури	Визначення положень ланок та виконавчих органів механізму паралельної структури шляхом використання залежностей аналітичної геометрії	—

Штанга	Стрижень, який у механізмах паралельної структури є основною кінематичною ланкою для передачі рухів та навантажень	 <p>Змінної довжини      Постійної довжини</p>
Біпод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання двох штанг змінної довжини	
Біглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання двох штанг постійної довжини	
Трипод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг змінної довжини	
Триаглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини	
Пентапод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох основних та двох додаткових штанг змінної довжини	
Ортоглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини з ортогональним розташуванням напрямних	

Гексапод	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання шести штанг змінної довжини	
Гексаглайд	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання шести штанг постійної довжини	
Дельта	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного з'єднання штанг, які виконані у вигляді паралелограмного механізму, а перетворення рухів реалізується шляхом примусового обертання опорних шарнірів, змонтованих на нерухомому стаціонарному блоку	
Ножиці	Технологічне обладнання з паралельною кінематикою, побудоване на основі кінематичного V-подібного з'єднання двох прямокутних пластин, а перетворення рухів реалізується шляхом використання додаткових кінематичних ланок з штангами змінної довжини, шарнірно з'єднаних з рухомим або нерухомим елементами механізму	

1.2. Аналіз патентування механізмів верстатів з паралельною структурою  
 Прогнозування на основі використання патентної інформації дозволяє виявити, які ідеї на даний час є прогресивними і перспективними, а які є

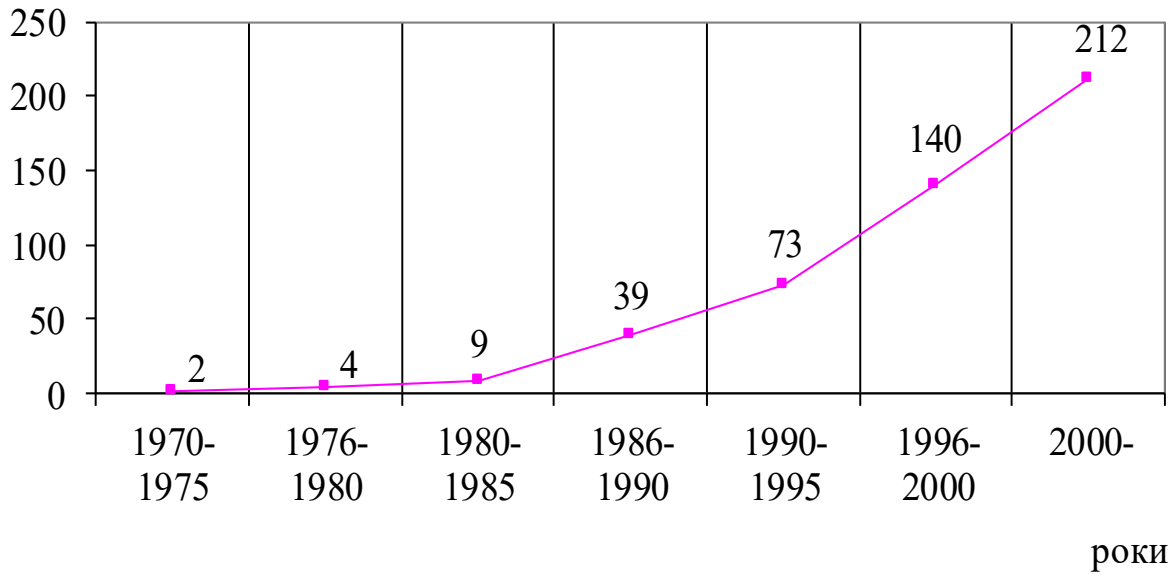
застарілими. Після зародження нової ідеї і появи перспективного винаходу відбувається зосередження винахідницької діяльності на цій ідеї. З'являються в зростаючій кількості нові винаходи, що стосуються різних способів, пристроїв і конструкцій, для реалізації цієї ідеї (рис. 1.2, а).

Далі починаючи з певного моменту винахідницька активність у певному напрямку поступово зменшується, оскільки можливості ідеї вичерпуються. Новий якісний стрибок можливий при появі нових піонерських ідей. Так на основі отриманого з БД звіту проведено аналіз росту кількості патентів по роках (рис. 1.2, б) та здійснено прогнозування їх росту поліномною моделлю на 5 років (рис. 1.3).

Так криву динаміки патентування можна описати поліномною моделлю  $y = -0,0014x^3 + 8,7381x^2 - 17589x + 1E+07$ . Згідно прогнозу на період з 2003 на кінець 2008 долі слід очікувати появи не менше 110 нових патентів (рис. 1.4). Тобто патентна активність зросте. Кількість патентів за цей період у порівнянні з 1995-2000 долею може подвоїтись. При появі нової піонерської ідеї, можна очікувати ще більшого росту числа патентів у даній галузі, нових патентів у цій області в найближчі 10-12 років. На попередньому рівні завтратилася кількість патентів в області приводів рухові та конструкцій пристроїв для передачі рухові.

На основі аналізу звіту по БД було виявлено, що перші патенти, які опосередковано стосуються верстатів з паралельною кінематикою з'явилися в 1970-1980 роках (рис. 1.4). Смороду в основному відносяться до пристроїв для симуляції рухові в деяких технічних системах. Період з 1985 по 1995 рік характеризується зростанням кількості патентів, що стосуються роботів та маніпуляторів. З 1995 долі різко зростає кількість патентів по конструкціях верстатів з паралельною кінематикою, а також системах позиціювання та методах контролю.

а) КІЛЬКІСТЬ ПАТЕНТІВ



б)

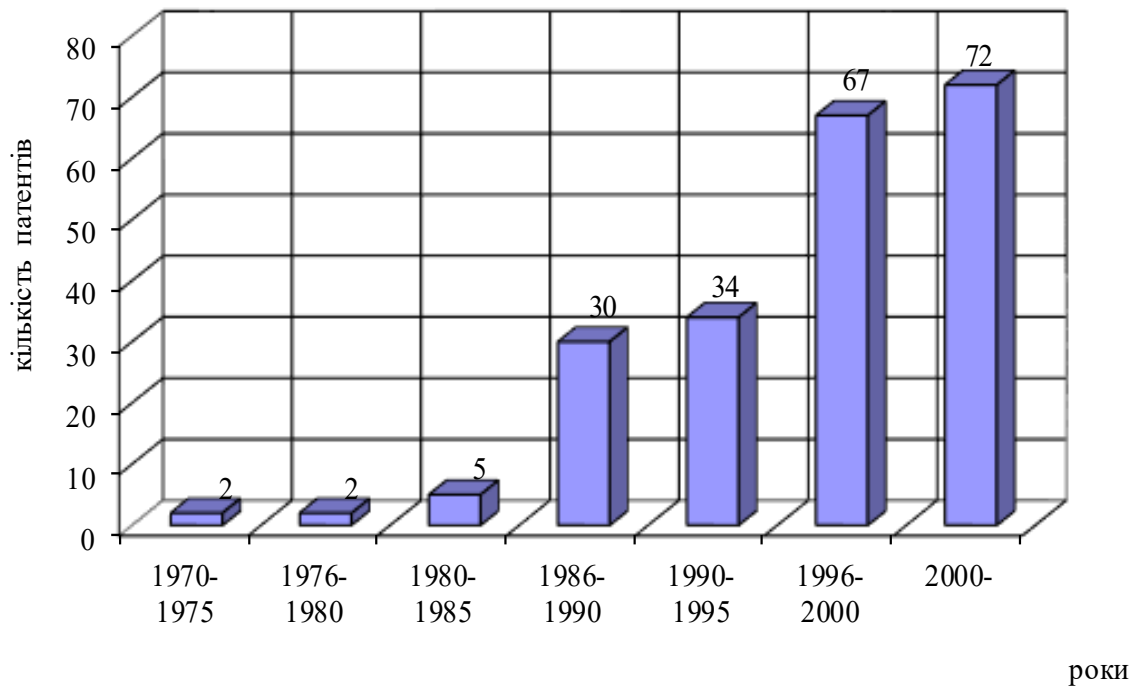


Рисунок 1.2 Динаміка патентування механізмів верстатів з паралельною кінематикою: а – кумулятивна крива; б – по роках (часовий інтервал 5 років)

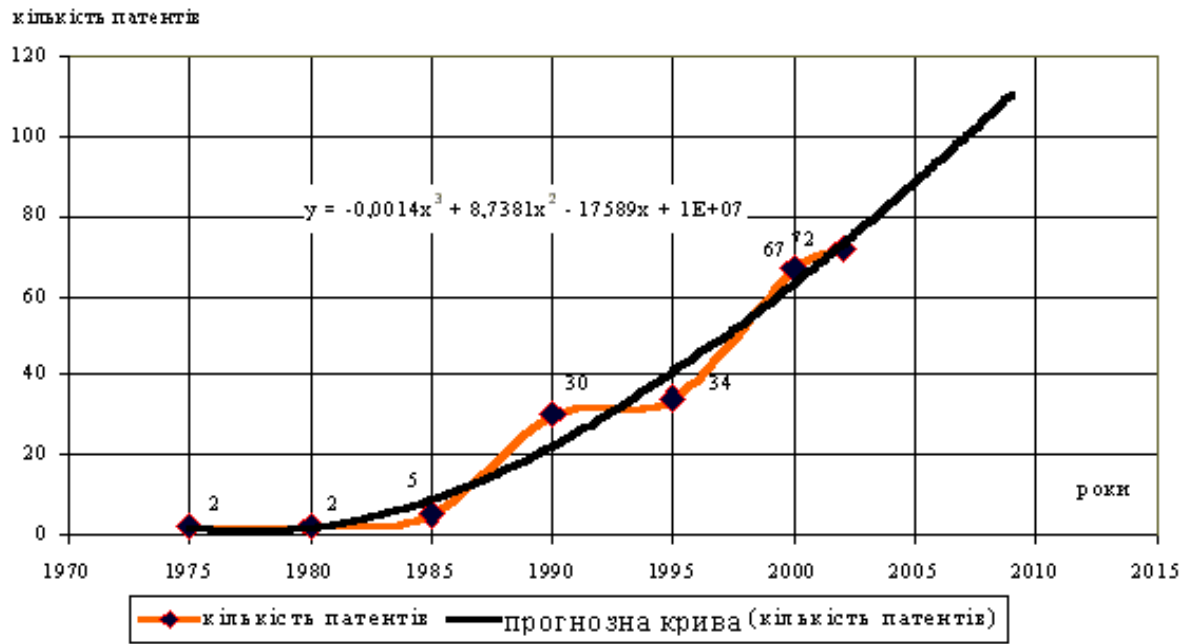


Рисунок 1.3 Прогноз росту числа патентів

Як видно з рис. 1.3 за останні роки винахідницька активність по роботах маніпуляторів та симуляторів рухові об'єктів знизилась, спостерігається чітка тенденція росту в області патентування конструкцій верстатів з паралельною кінематикою, системи позиціонування та методів точного контролю.

Патентна статистика характеризує розподіл нових ідей по галузям знань. На основі статистичного і якісного аналізу патентів можна виявити найбільш важливі області розвитку техніки, у яких сконцентрована в даний момент винахідницька діяльність в окремих країнах. Аналіз динаміки патентування, яка характеризується хронологічним розподілом патентів по датах пріоритету, країнам і тематичним напрямкам, відповідних рубриках МПС, дозволяє в результаті статистичного експерименту розкрити тенденції в розвитку тематичного напрямку або конкретного запатентованого технічного рішення шляхом багатоаспектного напрямку або конкретного запатентованого технічного рішення шляхом багатоаспектного аналізу зв'язків з іншими об'єктами та екстраполювати ці тенденції на 10-12 років уперед.

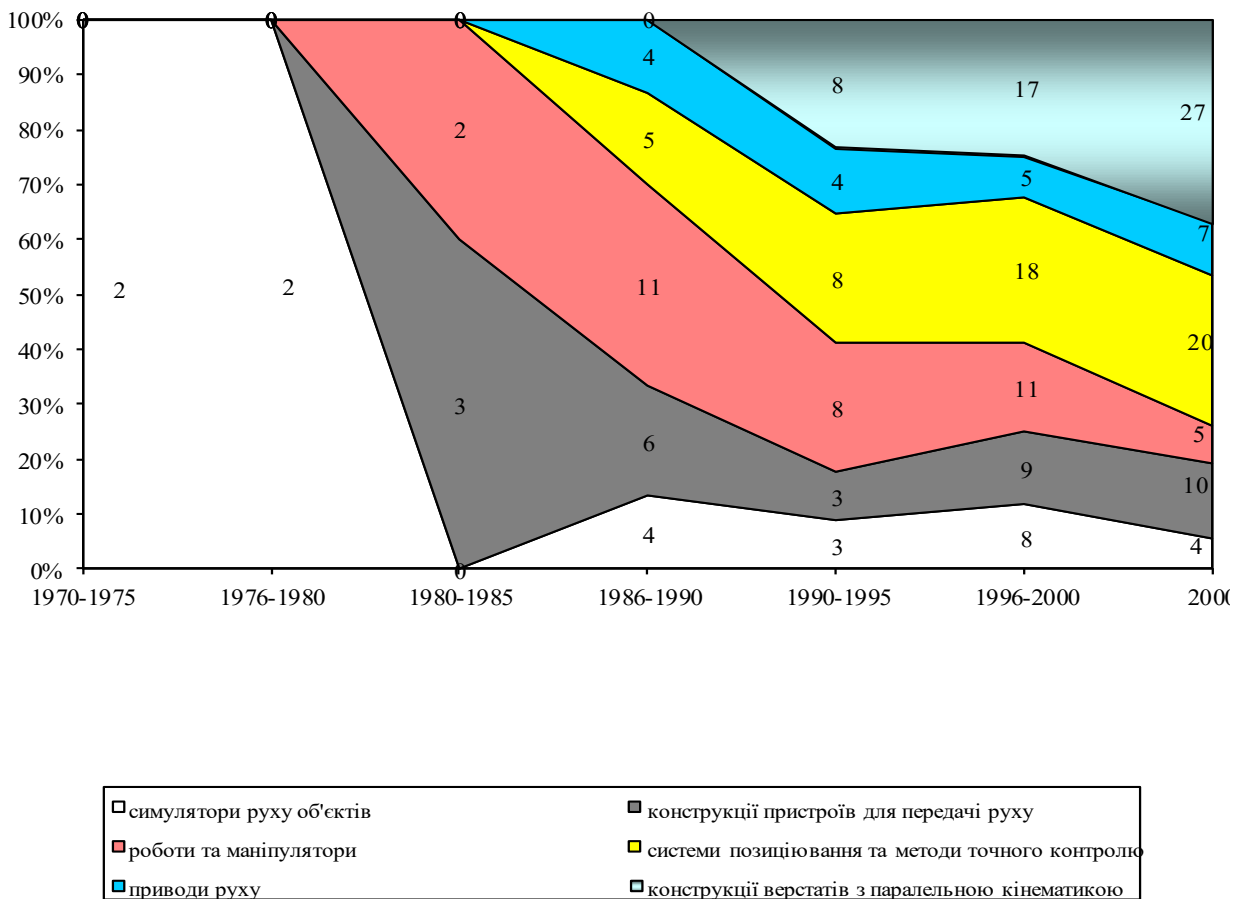


Рисунок 1.4 Динаміка зміни винахідницької активності стосовно верстатів з МПС

### 1.3. Поява та розповсюдження технологічного обладнання з МПС

Уперше верстати з паралельною кінематикою запропоновані для виробництва в 1994 році в Чикаго на виставці IMTS'94 фірмами Giddings&Lewis й Ingersoll. Характерною рисою нових компоновок верстатів з МПС є сполучення шпиндельної головки з рухливою платформою, до якої прикріплені кінці від трьох до шести прямолінійних штанг, що переміщуються лінійно, або накладають обмежуючі зв'язки для обертового руху ВО. Напрямок руху штанг МПС не завжди збігається зі світовою системою координат X,Y,Z. Так у верстатах типу Hexapod, Tripod, Tricert робочий рух кожної штанги окремо збігається із власною віссю штанги, а у верстатах типу Linapod, Triaglide, Hexaglide другий кінець штанги розташований на каретці, що переміщується уздовж ходового гвинта. Це умова, як було вже раніше відзначено, дозволяє розділити верстати з МПС на дві основні групи:

- Верстати зі змінною (регульованою) довжиною штанг.
- Верстати з постійною довжиною штанг.

Аналіз літературних джерел [2, 3, 7] показує, що з моменту першої демонстрації верстатів із МПС фірм Giddings&Lewis й Ingersoll у світі налічується не більше 60 моделей готових до практичного використання, а компоновальних схем приблизно 25.

Для переміщень ВО штангами з регульованою довжиною застосовуються стандартні серводвигуни й двигуни з порожнім валом, а для штанг із постійною довжиною – система «серводвигун + кулькова гвинтова передача». Традиційні переміщення ВО по осях X, Y, Z потребують від верстатів з паралельною кінематикою багатокординатної інтерполяції, а робоча зона має складну форму. Доцільним вважається використання верстатів із трьома штангами для 3-координатної обробки, а верстати з паралельною кінематикою типу Hexarod й Hexaglide для забезпечення шести ступенів вільності ВО.

Сьогодні 9 країн світу (рис. 1.5) є виробниками СПК, серед яких лідируючі місця займають Німеччина, Китай, Росія, США, Японія, Італія, Швеція, Франція, Австрія.

Своє місце в ряді верстатів з МПС зайняли верстати типу Tricert, що виконують функції, як верстата, так і робота. Уперше з'явилися вони в 1992 році. Сюди також входять верстати типу Hexarod ( що працюють по шести осях координат), Linarod або Triglide ( що працюють по трьох осях координат аналогічно верстатам типу Tricert).



Рисунок 1.5 Розподіл моделей верстатів з МПС (ВПК) по країнах-виробниках

Характерними рисами цієї конструкції є сполучення шпindelної головки із платформою, до якої прикріплені кінці трьох або шести прямолінійних штанг, що переміщуються лінійно, але не по осях координат X, Y, Z. У верстатів типу Hexapod й Tricert осі збігаються із центрами штанг, а у верстатів типу Linapod й Triglide один кінець кожної штанги розташований на каретці, переміщуваної уздовж нерухомо встановленого кулькового гвинта, причому всі три гвинти розташовані в одній площині й в одному напрямку. Додаткові осі обертання можуть бути розташовані на шпindelній платформі, а оскільки у верстатів Tricert цих осей дві, їх можна вважати п'ятикоординатними. Першими верстатами, що одержали практичне застосування, цього типу були верстати моделі Tricert 600, яких до теперішнього часу продано 130 шт.

Більший верстат із цієї серії - мод. Tricert 805, розроблений фірмою Neos Robotics, уперше показано на виставці IMTS'98 і призначений для виконання механічної обробки на важких режимах, демонструвався також на виставках ЕМО'99 і МАСН'2000. Його робоча зона становить 800\*800\*400мм, привод фірми Ibag потужністю 30кВт (з короткочасним перевантаженням до 80 кВт) забезпечує частоту обертання шпинделя до 30 000 хв<sup>-1</sup>, а інструментальний магазин розраховано на 12 інструментів з конусом HSK63. У цей час на заводах різних галузей промисловості працює приблизно 20 верстатів мод. Tricert 805.

На думку фірми Siemens, що приймає активну участь в розробці СПК, їхніх вузлів і систем керування в співробітництві з рядом фірм і реалізувала з тих пор в усім світі 16 таких структур, верстати типу Tricert найбільш перспективні. Їхню майбутню частку в загальній кількості СПК фірма оцінює порядку 60% і верстатів типу Linarod приблизно 20%, тоді як верстатів типу Нехарод лише 5% і верстатів з іншими типами паралельних структур - 15%. Передбачається, що загальний річний випуск таких верстатів досягне в найближчому майбутньому 3300шт.

У такий спосіб надалі можна розраховувати на випуск 1800 верстатів типу Tricert, хоча до теперішнього часу на заводи відправлено всього лише таких 14 верстатів вартістю кожен приблизно 400 000 доларів США. Вони можуть мати різні компоновання. На ЕМО'99 був, наприклад, показаний верстат мод. Tricert 805 типу багатоцільового з вертикальною компоновкою й встановлений на триподну опорну конструкцію з конусоподібним огородженням. Цей варіант безумовно мав високу жорсткість, але доступ до заготовок у нього був сильно обмежений. Фірма Neos Robotics створює також похилу (під кутом 45 градусів) і горизонтальну компоновки. Фактично це плита, на якій розташований блок Tricert паралельної кінематики і яку під різними кутами встановлюють між вертикальними стійками для забезпечення гнучкості позиціонування. Потім плиту разом із блоком Tricert і стійки розміщують на станині, на якій можуть бути додатково змонтований пристрій зміни супутників, а також нерухомий або поворотний робочий стіл. Похила компоновка є оптимальною, оскільки в цьому випадку блок Tricert виступає з вертикальних стійок, забезпечуючи можливість

обслуговування різних затискних і транспортних пристроїв. Новизна такого модульного підходу полягає в тому, що похилу компоновку нескладно перетворити у вертикальну або горизонтальну.

Фірма Neos Robotics планує створення автоматичної лінії, оснащеної блоками Tricert. Це забезпечить одержання дешевої прозводственной системи, що володіє до того ж важливою перевагою перед існуючими. Справа втом, що коли відбувається збій на одній з робочих станцій лінії, її функції бере на себе інший блок Tricert. Таким чином, лінія буде працювати доти, поки працює хоча б один блок Tricert.

#### 1.4. Мета і задачі досліджень

Метою кваліфікаційної роботи магістра є дослідження ефективності використання механізмів паралельної структури в технологічному обладнанні.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі задачі:

1. Провести аналіз наявної в літературних джерелах інформації, що стосується об'єкта досліджень, зокрема у сфері патентування.

2. На підставі патентно-інформаційних досліджень провести аналіз відомих схем, конструкцій і елементів МПС, результатів їх розробки, дослідження та експлуатації.

3. Оцінити ступінь впливу характеристик механізмів паралельної структури на техніко-економічні показники верстатів, у яких вони застосовуються.

4. Розробити рекомендації щодо створення МПС, які ефективно працюють у певних типах технологічного обладнання.

*Об'єктом досліджень* є закономірності впливу факторів конструктивного та кінематичного характеру на функціональні можливості технологічного обладнання з механізмами паралельної кінематики.

*Предметом досліджень* є механізми паралельної структури, що працюють в технологічному обладнанні.

## РОЗДІЛ 2

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ МЕХАНІЗМІВ  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ І МПС

## 2.1. Порівняльний аналіз принципів побудови традиційних механізмів і МПС

У технологічному обладнанні використовуються різноманітні механізми, які відрізняються службовим призначенням, технологічними і функціональними можливостями, кінематичними структурами, принципом дії та конструктивним виконанням. Вибір та сукупність відповідних механізмів реалізує загальну функцію технологічного обладнання – виробництво продукції необхідної якості з заданою продуктивністю.

Незважаючи на різноманітність функціонального призначення, кінематичної структури та конструктивного виконання механізмів, усі вони мають багато спільного за принципами побудови та проектування.

Слід відмітити, що більшість механізмів, застосованих у технологічному обладнанні побудовані на традиційних підходах та принципах їх проектування, мають визначені недоліки конструкторського, технологічного та функціонального характеру, які закладаються на етапах їх проектування.

Розглянемо механізм реалізації лінійного переміщення виконавчого органу технологічного обладнання (рис. 2.1).

Механізм лінійного переміщення перетворює обертальний рух двигуна у поступальний рух виконавчого органу (ВО) технологічного обладнання та складається з кінематичних ланок: трьох зубчастих передач А, В, С, гвинтової пари ГП та виконавчого органу ВО.

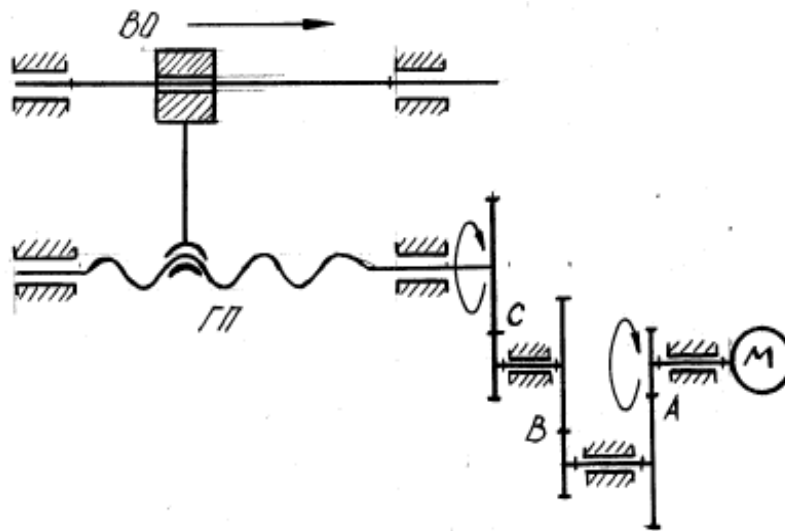


Рисунок 2.1 Механізм лінійного переміщення

Усі кінематичні ланки механізму з'єднані послідовно, при цьому вихідна ланка двигуна М з'єднана з вхідною ланкою зубчастої передачі А, вихідна ланка якої зв'язана з вхідною ланкою зубчастої передачі В, а вихідна ланка останньої з'єднана з вхідною ланкою передачі С, а та, у свою чергу, – з вхідною ланкою гвинтової передачі ГП, а її вихідна ланка – з ВО. Структурна схема послідовного з'єднання кінематичних ланок наведена на рис. 2.2.

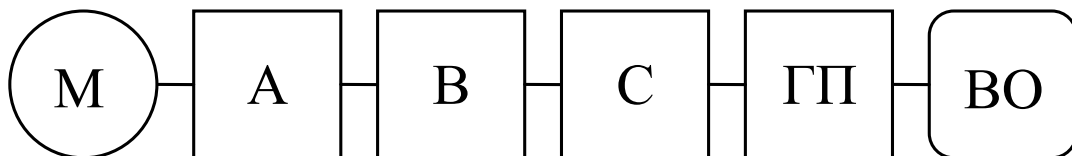


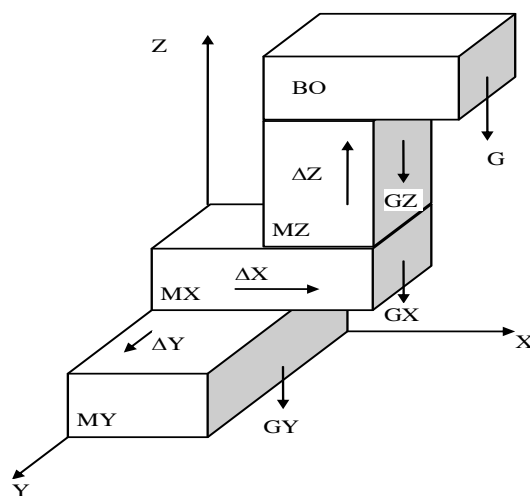
Рисунок 2.2 Структурна схема послідовного з'єднання кінематичних ланок

Механізми або кінематичні ланцюги з послідовним з'єднанням мають особливості: положення, швидкість та прискорення вихідної ланки попереднього механізму співпадають з відповідними величинами вхідної ланки наступного механізму, але сили в них однакові за величиною та протилежні за напрямком. Передаточне відношення сукупності послідовно з'єднаних механізмів дорівнює добутку передаточних відношень усіх механізмів системи. Аналогічно вирішується визначення коефіцієнта корисної дії механізмів.

Слід відмітити, що такі механізми мають, як правило, тільки одне функціональне призначення: передача потоку рухів та сил одним кінематичним ланцюгом, тому необхідна кількість функцій технологічного обладнання, а також потоків рухів та сил реалізується аналогічною кількістю кінематичних ланцюгів або механізмів. Схема сукупності механізмів для реалізації 3-координатного переміщення виконавчого органу наведена на рис. 2.3, а його структурна схема – на рис. 2.4.

Виконавчий орган ВО та кожний із складових механізмів характеризується масою ( $G_Y$ ,  $G_X$ ,  $G_Z$ ) та  $G$ , а також похибкою позиціонування ( $\Delta Y$ ,  $\Delta X$  та  $\Delta Z$ ). При переміщенні виконавчого органу ВО у задану точку А з координатами  $Y_a$ ,  $X_a$  та  $Z_a$  визначені механізми під час функціонування переміщують відповідні маси: механізм МУ переміщує маси механізмів МХ, МЗ та ВО, механізм МХ переміщує масу механізмів МЗ та ВО, а механізм МЗ – масу ВО, що обумовлює появу великих рухомих мас та впливає на динамічні характеристики технологічного обладнання.

Крім того, при переміщенні механізмів та виконавчого органу у кінцеві положення виникають додаткові сили внаслідок зміщення їх центрів мас, що обумовлює появу напружень згину у відповідних елементах кінематичних ланок, а також перекосу рухомих елементів на напрямних.



ВО – виконавчий орган; МУ, МХ, МЗ – механізми переміщень по відповідним осям координат

Рисунок 2.3 Механізм 3-координатного переміщення

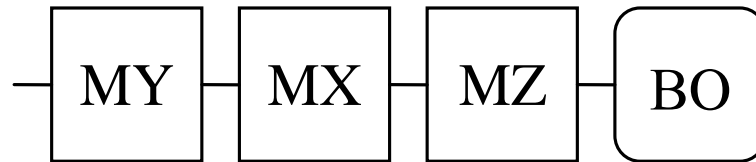


Рисунок 2.4 Структурна схема механізму 3-координатного переміщення

Точність позиціонування виконавчого органу залежить від сумарної похибки системи послідовно з'єднаних механізмів (чим більше кінематичних ланок має механізм переміщень, тим більша похибка позиціонування).

Таким чином, послідовне з'єднання механізмів негативно впливає на основні характеристики технологічного обладнання: точність, жорсткість та динамічні характеристики.

Досвід експлуатації механізмів технологічного обладнання показує, що майже усі вони мають визначені недоліки конструктивного, технологічного та функціонального характеру (рис. 2.5).

## 2.2. Порівняльна характеристика МПС і традиційних механізмів технологічного обладнання

Слід відмітити, що внаслідок традиційних підходів до проектування технологічного обладнання, більша частина цих недоліків закладається у його конструкцію на перших етапах його проектування, а саме:

- практично усі існуючі механізми технологічного обладнання мають розімкнені кінематичні ланцюги, що не забезпечує необхідний рівень їх жорсткості. У таких випадках необхідна жорсткість кінематичних ланок забезпечується шляхом збільшення розмірів поперечних перерізів тягових елементів механізмів, що збільшує матеріалоємність та підвищені енергетичні витрати на їх переміщення;

- незамкненість кінематичних ланцюгів створює консольні конструкції механізмів та нераціональне розміщення їх центрів ваги, що обумовлює перекося рухомих елементів на напрямних та створює додаткові навантаження;

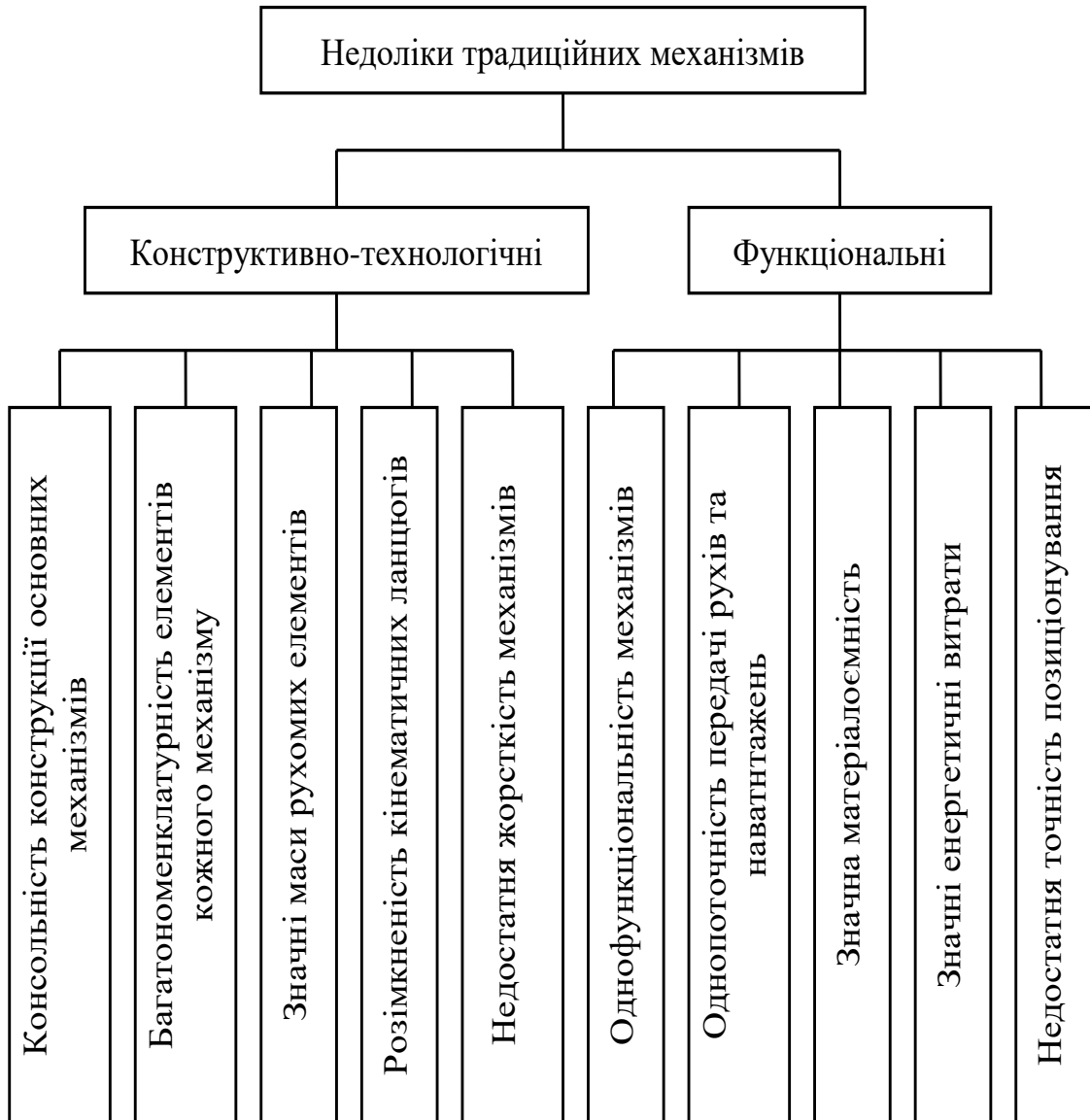


Рисунок 2.5 Недоліки традиційних механізмів технологічного обладнання

– однофункціональність механізмів обумовлює збільшення номенклатури їх складових елементів, що також впливає на матеріалоемність технологічного обладнання та збільшує витрати на його виробництво;

– однопоточність передачі рухів та навантажень потребує збільшення жорсткості елементів механізму за рахунок підвищення матеріалоемності та попереднього натягу елементів.

Підвищення ефективності технологічного обладнання здійснюється як шляхом удосконалення конструкцій існуючих механізмів, так і пошуком нових нетрадиційних рішень їх побудови.

Одним з перспективних напрямків удосконалення механізмів технологічного обладнання є їх побудова на основі:

- передачі потоку рухів і сил декількома кінематичними ланцюгами шляхом раціонального перерозподілу рухів та навантажень між ними;
- реалізації паралельної передачі енергії декількома кінематичними ланцюгами та механізмами;
- створення замкнених кінематичних ланцюгів, які відтворюють замкнений контур підвищеної жорсткості;
- побудови безконсольних конструкцій механізмів.

Отже, удосконалення, створення та проектування високоефективних механізмів може формуватись на положеннях, наведених на рис. 2.6.

Структурні схеми механізмів послідовного, паралельного та паралельно-послідовного з'єднання наведені на рис. 2.7.

Аналіз наведених структурних схем механізмів показує, що їх розташування (послідовне або паралельне) у загальному енергетичному потоку від ведучої до веденої кінематичної ланки впливає майже на усі параметри функціонування технологічного обладнання: точність позиціонування, жорсткість, динамічні характеристики, коефіцієнт корисної дії та інші.

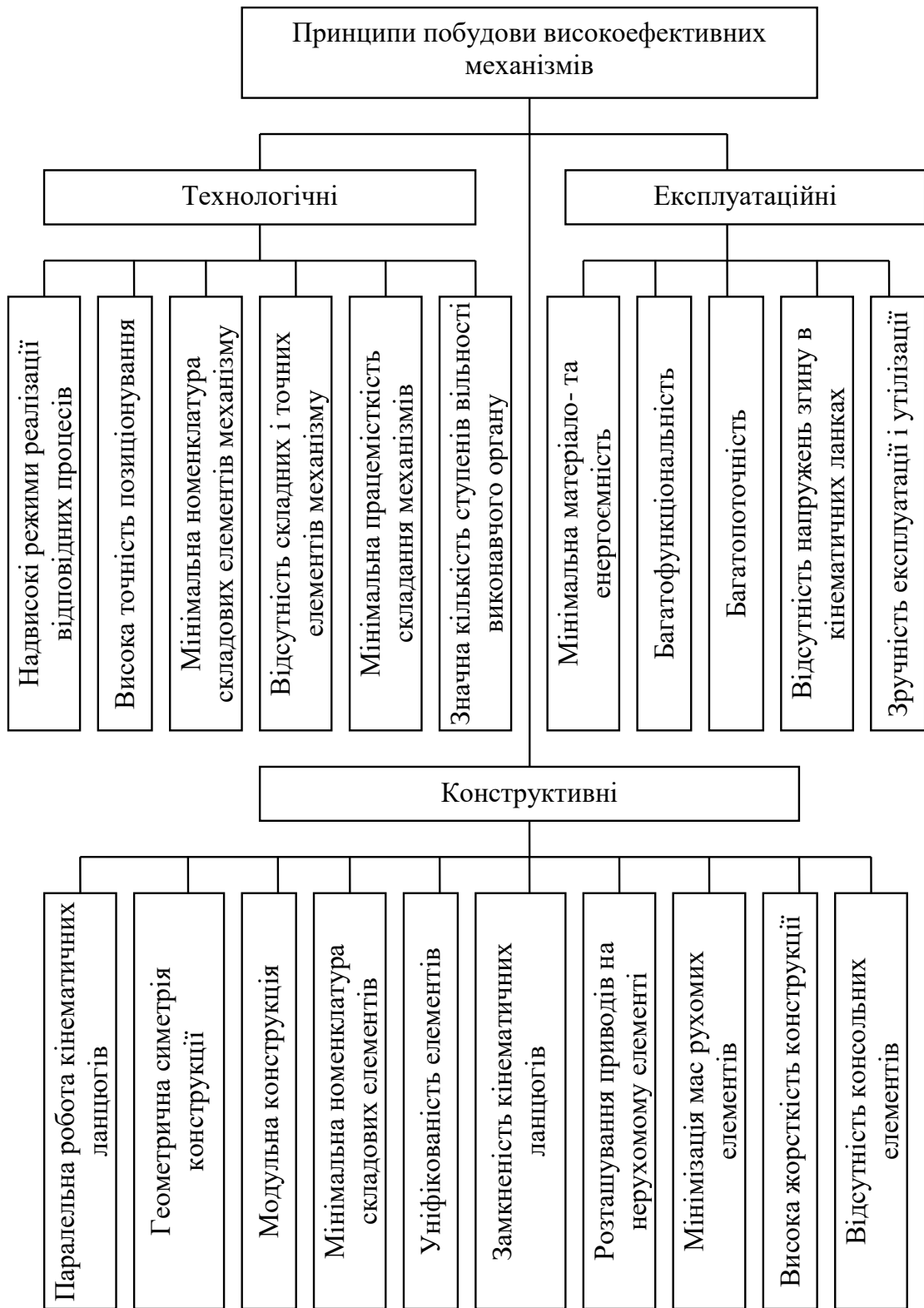
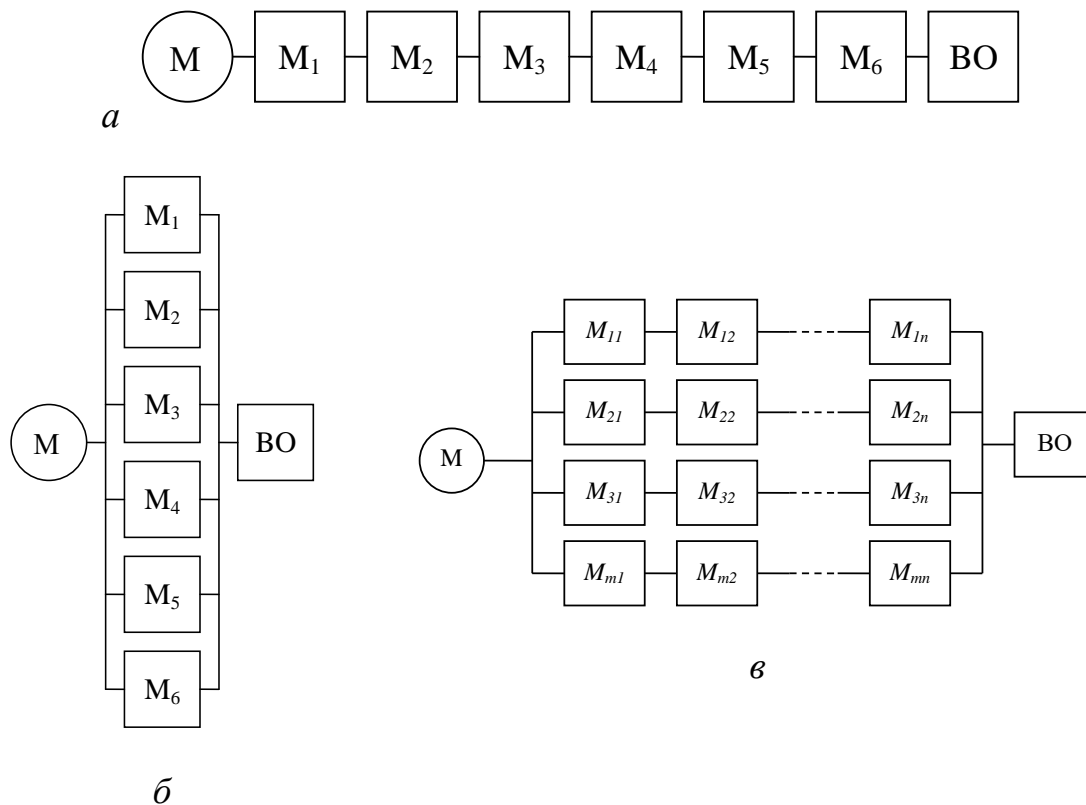


Рисунок 2.6 Вимоги та принципи побудови вискоефективних механізмів

2.3. Аналіз впливу типу з'єднання в механізмах традиційного технологічного обладнання та в МПС на коефіцієнт корисної дії механічної системи

Для послідовного з'єднання  $n$  механізмів  $M_1...M_6$  (рис. 2.7, а) з коефіцієнтом корисної дії  $\eta_1... \eta_6$ .

Перший механізм  $M_1$  витрачає роботу рухомих сил  $A_1$  та виконує корисну роботу:  $A_2 = A_1\eta_1$ .



а) послідовне з'єднання механізмів; б) паралельне з'єднання механізмів; в) паралельно-послідовне з'єднання механізмів

Рисунок 2.7 З'єднання механізмів

Другий механізм  $M_2$  витрачає роботу рухомих сил  $A_3$  та виконує корисну роботу  $A_3 = A_2\eta_2$  або  $A_3 = A_1\eta_1\eta_2$ .

Продовжуючи подібні міркування отримуємо рівняння для визначення корисної роботи  $A_n$  системи механізмів:

$$A_n = A_l \prod_{i=0}^n \eta_i \quad (2.1)$$

Загальний ККД системи механізмів з послідовним з'єднанням відносно енергетичного потоку визначається за формулою

$$\eta = \frac{A_n}{A_l} = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (2.2)$$

При паралельному з'єднанні  $m$  механізмів  $M_1 \dots M_m$  (рис. 2.14, б) кожний  $k$ -й механізм системи витрачає роботу рухомих сил  $A_k$  та виконує корисну роботу:

$$A_{nk} = A_k \eta_k.$$

Загальна робота рухомих сил, яка витрачається усіма механізмами, визначається як:  $A = \sum_{k=1}^m A_k$ .

Корисна робота, яку виконують усі механізми:

$$A_n = \sum_{k=1}^m A_k \eta_k. \quad (2.3)$$

Загальний коефіцієнт корисної дії системи механізмів з паралельним з'єднанням визначається як:

$$\eta = \frac{A_n}{A} = \frac{\sum_{k=1}^m A_k \eta_k}{\sum_{k=1}^m A_k}. \quad (2.4)$$

При паралельно-послідовному з'єднанні механізмів (рис. 2.14, в) розглядають окремі ділянки ланцюгів, які мають паралельне або послідовне з'єднання, ККД яких слід розраховувати за відповідними формулами. Після чого, залежно від структури з'єднань механізмів визначається загальний ККД.

Загальний ККД системи механізмів, з'єднаних паралельно-послідовно визначається за формулою:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^m A_{nk}}{\sum_{k=1}^m A_k} = \frac{\sum_{k=1}^m A_k \prod_{i=1}^n \eta_{ki}}{\sum_{k=1}^m A_k}, \quad (2.5)$$

де  $n$  – кількість механізмів, з'єднаних послідовно у паралельних ланцюгах;

$m$  – кількість паралельних ланцюгів.

Отже, коефіцієнт корисної дії системи механізмів паралельного з'єднання буде більшим за величиною, ніж системи механізмів, з'єднаних послідовно та паралельно-послідовно.

Подібні міркування можна провести для інших параметрів функціонування технологічного обладнання, у результаті яких теж отримуємо аналогічні висновки.

Порівняльний аналіз переваг та недоліків механізмів з їх послідовним та паралельним з'єднанням показує, що найбільш ефективно функціонують останні, які дозволяють зменшити енергетичні витрати на переміщення рухомих мас виконавчих органів, забезпечити мінімальну матеріалоемність та збільшити коефіцієнт корисної дії. Тому при побудові технологічного обладнання слід віддавати перевагу МПС.

Таким чином, використання у технологічному обладнанні системи механізмів паралельного з'єднання або створення механізмів з паралельним з'єднанням його кінематичних ланок має значні переваги у порівнянні з системою механізмів послідовного з'єднання.

Наведеним вимогам повністю відповідає створення МПС, основною властивістю яких є передача енергетичних потоків та рухів декількома паралельними шляхами. Подібні механізми мають визначені переваги у порівнянні з традиційними механізмами, основними з яких є:

- використання кінематичних ланок у вигляді стрижнів, які працюють як на розтягування, так і на стискання при відсутності напруг згину;
- можливість розташування виконавчих органів на нерухомих або на елементах, які рухаються повільно;
- застосування рухомих елементів мінімальної маси, які витрачають незначні енергетичні потоки для переміщення виконавчого органу;
- використання замкнених стрижневих систем при паралельній передачі навантаження створює жорстку просторову ферму;
- раціоналізації розподілу напрямків та величин навантажень

дозволяють зменшити енергетичні витрати та забезпечити мінімальне навантаження на кінематичні ланки та приводи;

– мінімізація кількості з'єднань елементів та кінематичних ланок механізму, що обумовлює зменшення пружних деформацій, підвищення жорсткості системи, а також реалізує високу точність позиціонування виконавчого органу та поліпшує динамічні характеристики технологічного обладнання.

МПС – це новий клас просторових механізмів, фізична сутність яких полягає у тому, що рухомий виконавчий орган технологічного обладнання шарнірно пов'язаний з його нерухомим елементом (стаціонарним блоком) кінематичними ланцюгами, кожний з яких має індивідуальний привод або накладає визначену кількість зв'язків на переміщення виконавчого органу.

Багатопоточність та паралельність передачі навантажень у МПС дозволяє їм здійснити оптимальний перерозподіл сил та рухів на декілька кінематичних ланок, які побудовані у вигляді стрижнів з відповідними шарнірами на кінцях та мають незначну масу, що обумовлює відсутність напружень згину. Вони працюють лише на розтягування або стискання. Замкненість кінематичних ланок обумовлює створення геометрично симетричної конструкції механізму. Усі кінематичні ланки механізму працюють одночасно (паралельно), що дозволяє виконавчому органу рухатись у просторі, забезпечуючи необхідний закон переміщення.

Крім того, можливість розташування індивідуальних приводів кінематичних ланок на нерухомому стаціонарному блоку (несучій системі) також зменшує масу рухомих елементів, що дозволяє надавати надвисокі швидкості та прискорення виконавчому органу.

Поряд з визначеними властивостями та перевагами механізмів паралельної структури вони мають і відповідні недоліки, пов'язані з використанням складних та високо вартісних інформаційних систем, які за допомогою датчиків дозволяють отримати інформацію про стан всіх елементів енергетичної системи, пристроїв програмного управління, тому що для завдання управляючих імпульсів окремим приводам по координатним осям опорні точки

траєкторії у робочому просторі повинні бути перераховані у відповідності зі зміною довжини штанг або координат опорних шарнірів відносно напрямних. Перетворення координат повинно виконуватись у такті інтерполяції пристрою управління відповідної технологічної машини, що вимагає потужного програмного забезпечення.

Крім того, кінематична структура механізму незалежно від фактичного положення виконавчого органу принципово допускає можливість зіткнення окремих кінематичних ланок, тому поряд з перетворенням координат необхідно контролювати такт інтерполяції зони вірогідного зіткнення.

## РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ТИПОВИХ СТРУКТУР І КІНЕМАТИЧНИХ СХЕМ  
ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ МПС

## 3.1. Базові структурні елементи МПС

Розглянемо послідовну побудову та принцип дії механізмів паралельної структури. На рис. 3.1 наведена схема однокоординатного механізму – гідромеханічного приводу посту пальної дії.

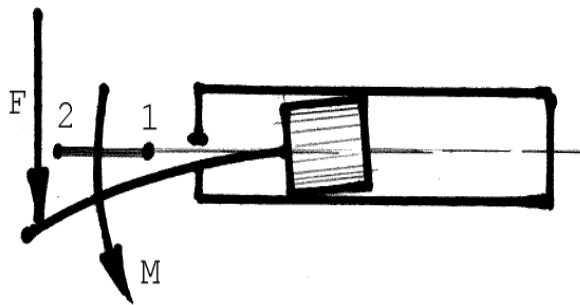


Рисунок 3.1 Однокоординатний механізм

При функціонуванні гідроциліндру шток поршня переміщується від точки 1 до точки 2, реалізуючи заданий закон переміщення виконавчого органу. У точці 2 на шток гідроциліндру діє сила  $F$ , яка провокує виникнення крутного моменту  $M$ , що обумовлює згин штоку та перекіс штоку в циліндрі. Для усунення цього недоліку необхідно підвищити жорсткість механізму за рахунок збільшення розмірів поперечного перерізу штоку, що збільшує матеріалоемність механізму та зайві енергетичні витрати на переміщення виконавчого органу.

Але підвищити жорсткість подібного механізму можна іншим, нетрадиційним підходом – шляхом шарнірного з'єднання двох аналогічних за конструктивним виконанням однокоординатних механізмів (рис. 3.2).

Специфічною властивістю подібного механізму є повна відсутність напружень згину в штоках внаслідок перерозподілу діючої сили  $F$  на дві складові  $F_1$  та  $F_2$ , що діють вздовж осі кожного штоку.

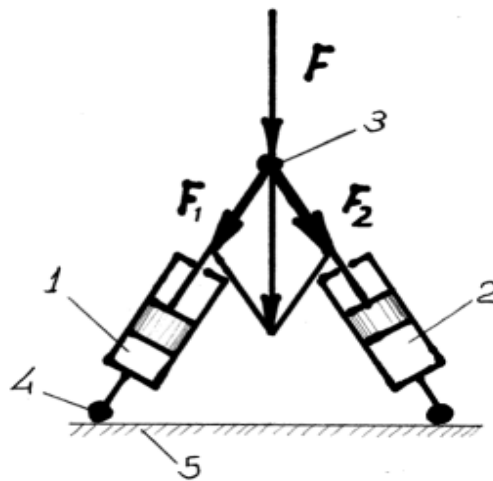


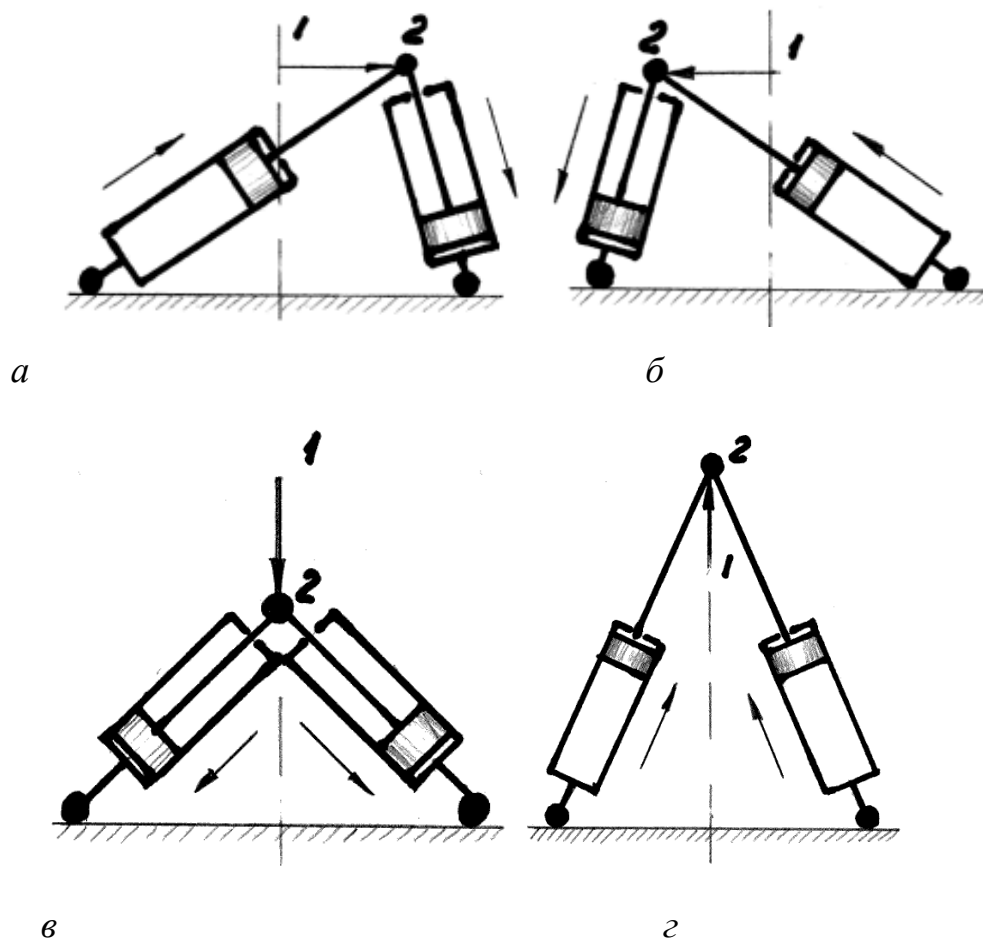
Рисунок 3.2 Двокоординатний механізм паралельної структури

Механізм складається з виконавчого органу 3 та нерухокої несучої системи 5, шарнірно з'єднаних двома кінематичними ланками змінної довжини 1 та 2. Кожна кінематична ланка складається з гідроприводу поступальної дії та шарніру 4, який змонтований на несучій системі.

При одночасній (паралельній) узгодженій зміні довжин обох кінематичних ланок виконавчий орган переміщується у площині  $XOZ$  у заданому напрямку (рис. 3.3). Наприклад, при зміні довжин кінематичних ланок на однакову величину виконавчий орган рухається у вертикальному напрямку (рис. 3.3, в, г).

Таким чином, подібна конструкція двокоординатного механізму дозволяє збільшити його жорсткість при одночасному зменшенні матеріалоемності кожного однокоординатного механізму, усунути згин штоків та перекіс поршнів у гідроциліндрах за рахунок створення замкненої системи діючих навантажень та їх перерозподілу між штоками.

При приєднанні до розглянутого механізму додаткових кінематичних ланок, можна отримати МПС з заданою кількістю координатних переміщень.



а – вліво; б – вправо; в – вниз; г – вгору

Рисунок 3.3 Переміщення виконавчого органу двохкоординатного механізму у площині XOZ

Розглянемо одну з класичних схем МПС – шестикоординатний механізм паралельної структури ("гексапод") (рис. 3.4).

Механізм складається з рухомого виконавчого органу ABC, який шарнірно зв'язаний з нерухомим елементом механізму KNM за допомогою шести однорухомих кінематичних ланок KA, MA, MC, NC, NB і KB, кожна з яких має індивідуальний привід  $D_1 \dots D_6$ , який призначений для зміни довжини кінематичної ланки.

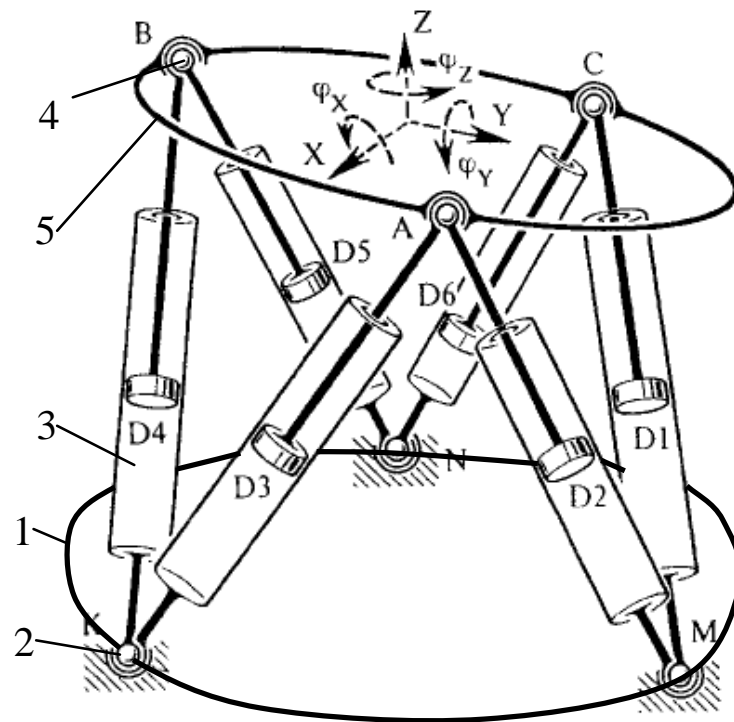


Рисунок 3.4 Шестикоординатний механізм паралельної структури (платформа Стюарта)

Кінематична ланка складається з відповідного механізму лінійних переміщень (пнеumo-, гідро- або лінійний електропривід) та двох шарнірів (сферичного або універсального).

Механізм є системою двох елементів: рухомого виконавчого органу та нерухомого стаціонарного блоку, з'єднаних між собою кінематичними ланками змінної довжини.

Фіксовані довжини кінематичних ланок однозначно визначають відносне положення усіх складових елементів механізму, які створюють досить жорстку просторову конструкцію. Змінюючи довжини  $l$  кінематичних ланок, можна змінювати відносне положення виконавчого органу у просторі; а також реалізувати будь-який заданий закон його переміщень. Таким чином, задане положення виконавчого органу в просторі реалізується шляхом координатного управління кожним конкретним приводом відповідної кінематичної ланки.

Наведений механізм створений на основі "платформи Стюарта", також має назву " $l$ -координатний механізм" (по А.Ш. Коліскору).

### 3.2. Встановлення класифікаційних ознак технологічного обладнання з МПС

Для отримання уяви про конструкцію технологічного обладнання на основі МПС наведемо його узагальнену схему (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 Узагальнена структурно-кінематична схема МПС

В самому загальному вигляді в МПС можна виділити вихідну ланку і основу, котрі з'єднані деякою кількістю  $n$  кінематичних ланцюгів паралельно в розумінні передачі руху і зусиль. В кожному кінематичному ланцюгу встановлюється один або кілька приводів. На вихідній ланці встановлюється інструментальна або вимірювальна головка. МПС дозволяє забезпечити до шести ступенів вільності вихідної ланки, що розширює технологічні можливості верстата.

На рис. 3.4 наведена кінематична схема одного з перших, що отримали розповсюдження, МПС, який названий ім'ям його творця.

Вихідна ланка 5 зв'язана з основою 1 шістьма кінематичними ланцюгами у вигляді штанг 3 змінної довжини. Кожна штанга зв'язана з вихідною ланкою сферичними шарнірами 4, а з основою – карданными шарнірами 2. Змінюючи довжину штанг 3, можна орієнтувати вихідну ланку 5 в просторі по шести координатам (трьом поступовим  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  і обертовим  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ,  $\varphi_z$ ). Якщо встановити на вихідній ланці 5 інструментальну головку, то можна отримати верстат, котрий дозволить обробляти складні фасонні поверхні.

Для забезпечення працездатності МПС необхідно перевірити ступень рухливості і нерухливості механізму [3].

Кількість ступенів рухливості вихідної ланки відносно основи (нерухомої)  $W_{сп}$ , котру може забезпечити механізм, визначається за формулою Малишева:

$$W_{сп} = 6(n_{зв}-1)-5P_1-4P_2-3P_3-2P_4-P_5, \quad (2.6)$$

де  $n_{зв}$  – кількість ланок механізму;

$(n_{зв} - 1)$  – кількість рухомих ланок механізму;

$P_1, P_2, \dots, P_5$  – кількість кінематичних пар 1-го, 2-го, ..., 5-го класів.

Ступінь нерухомості механізму  $W_{сн}$ , що визначається як ступінь рухомості механізму при зафіксованих парах з керуємими приводами, повинна дорівнюватися нулю:

$$W_{сн} = 6(n_{зв}-n_{в}-1)-5(P_1-P_{1В})-4(P_2-P_{2В})-3(P_3-P_{3В})-2(P_4-P_{4В})-(P_5-P_{5В}), \quad (2.7)$$

де  $n_{в}$  – кількість керуючих ланок з розташованими на них керованими приводами в кінематичних ланцюгах;

$P_{1В}, P_{2В}, \dots, P_{5В}$  – кількість керуючих кінематичних пар 1-го, 2-го, ..., 5-го класів.

Якщо для МПС  $W_{сн} \neq 0$ , то такий механізм непрацездатний і вихідна ланка буде мати некеровані рухи. Тому для забезпечення працездатності МПС необхідно забезпечити умови:

$$W_{сп} > 0, \quad W_{сн} = 0 \quad (2.8)$$

Концепція створення нового покоління технологічного обладнання реалізується шляхом впровадження в ньому механізмів паралельної структури, внаслідок чого обладнання отримає нову якість та перехід до реалізації більш сучасних технологічних процесів. Механізми паралельної структури відрізняються різноманітністю кінематичних схем, методами перетворення рухів, ступенями вільності, компоновками та конструктивним виконанням основних елементів.

Інтенсивне впровадження інформаційних пошукових систем та систем автоматизованого проектування технологічного обладнання та механізмів обумовлює визначення їх місця серед інших машин, чіткого кодування кожного

конкретного технологічного обладнання та механізму паралельної структури, а також створення їх класифікації.

Класифікація обладнання та механізмів, як система підпорядкованих понять, установлює зв'язки між визначеними параметрами технологічного обладнання та їх характеристиками, яка використовується для зберігання та пошуку необхідної інформації щодо технологічного обладнання, їх типів та складових компонентів.

Існує значна кількість різноманітних класифікацій технологічного обладнання та їх компоновок на основі:

- типізації технологічних процесів;
- аналізу структур часу обробки;
- рівня автоматизації технологічного обладнання;
- рівня агрегування технологічного обладнання;
- розташування інструменту відносно заготовки. Використовується для однопозиційного технологічного обладнання.

Слід відмітити, що внаслідок специфічних властивостей технологічного обладнання паралельної структури існуючі класифікації не можуть бути застосовані до нього.

Таким чином, класифікація технологічного обладнання і, зокрема, верстатного з паралельною кінематикою на цей час взагалі відсутня.

Перша спроба класифікації технологічного обладнання з паралельною кінематикою здійснена на кафедрі металорізальних верстатів та систем Кіровоградського національного технічного університету [11]. В її основу покладені узагальнені принципи аналізу відповідних параметрів, а саме: функціональних, кінематичних, конструктивних та експлуатаційних властивостей технологічного обладнання (рис. 3.6).

Наведені класифікаційні ознаки технологічного обладнання з паралельною кінематикою у конкретних умовах виробництва використовуються для різних сполучень, а їх розподіл на групи є взагалі умовним.

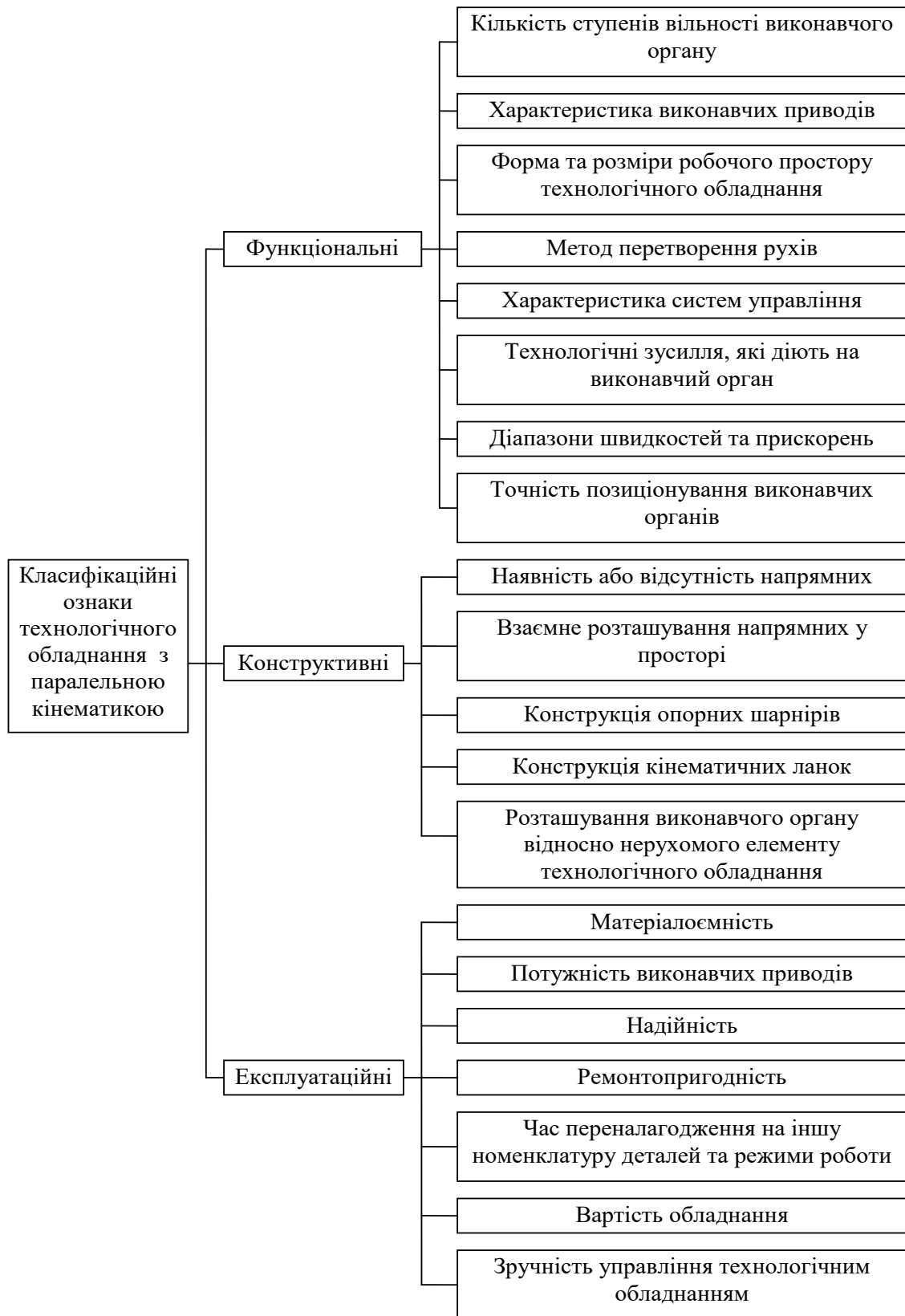


Рисунок 3.6 Структура класифікаційних ознак технологічного обладнання з паралельною кінематикою

Під час проектування технологічного обладнання з паралельною кінематикою слід враховувати конкретні умови їх експлуатації, які обумовлюють більш детальну градацію основних характеристик:

- компоновочно-геометричні;
- динамічні та швидкісні;
- силові, експлуатаційні, жорсткісні та інші.
- точнісні;

Більшість параметрів технологічного обладнання визначаються сукупністю та складом технологічних задач, для яких воно створюється.

Враховуючи, що механізми паралельної структури складають основу технологічного обладнання та виконують усі основні, допоміжні та установчі рухи його виконавчих органів, необхідно спочатку розробити класифікацію механізмів, а потім на її основі створити класифікацію технологічного обладнання з паралельною кінематикою.

Усі механізми паралельної структури, які використовуються для компоновок технологічного обладнання, незважаючи на різноманітність їх кінематичних структур та конструктивного виконання підрозділяються на дві групи:

- повнопаралельні – механізми, в яких кількість ступенів вільності виконавчого органу дорівнює кількості кінематичних ланцюгів з індивідуальними приводами, за допомогою яких створюються переміщення виконавчого органу відносно осей координат;
- неповнопаралельні – механізми, в яких кількість ступенів вільності виконавчого органу більше, ніж кількість кінематичних ланцюгів, кожний з яких має два та більше індивідуальних приводів.

Таким чином, є логічний зв'язок між кількістю кінематичних ланок відповідного механізму паралельної структури та ступенями вільності виконавчого органу технологічного обладнання. Кожний механізм паралельної структури перетворює рух його вхідних ланок у заданий рух виконавчого органу.

За методом перетворення рухів МПС підрозділяються на механізми, у яких рух виконавчого органу створюється наступними шляхами (рис. 3.7):

– шляхом зміни координат опорних шарнірів. Такі механізми мають кінематичні ланки 2 постійної довжини (рис. 3.8).



Рисунок 3.7 Класифікація механізмів паралельної структури за методом перетворення рухів виконавчого органу

Виконавчий орган 1 (рис.3.8) змінює своє положення у просторі залежно від координат опорних шарнірів 4 відносно осі штоку гідроциліндру 3. Якщо лівий шарнір 4 загальмувати, а правий переміщувати вправо, то виконавчий орган буде розташований під кутом до горизонтальної осі. У випадку, коли два шарніра (лівий та правий) переміщуються одночасно та на однакову величину виконавчий орган переміщується відносно вертикальної осі шляхом зміни довжин кінематичних ланок (зміни відстані між центрами шарнірів рухомого та нерухомого елементів механізму). Кожна кінематична ланка механізму виконана у вигляді штанги 2 змінної довжини з приводом поступальної дії (гідроциліндр або лінійний електропривід) (рис. 3.9).

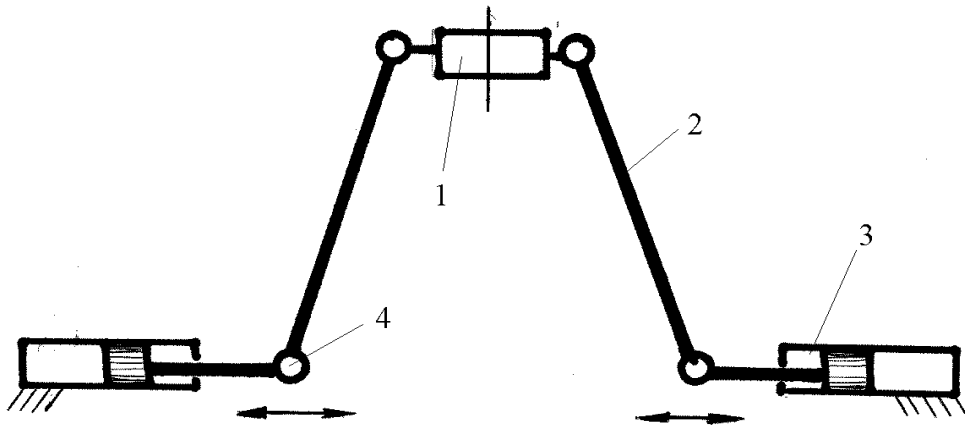


Рисунок 3.8 Механізм з кінематичними ланками постійної довжини

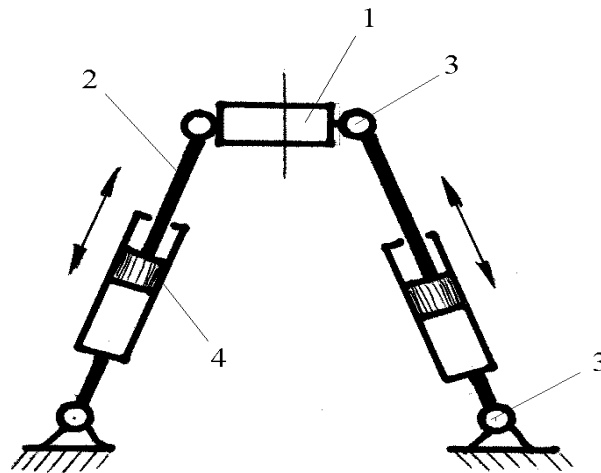


Рисунок 3.9 Механізм з кінематичними ланками постійної змінної довжини

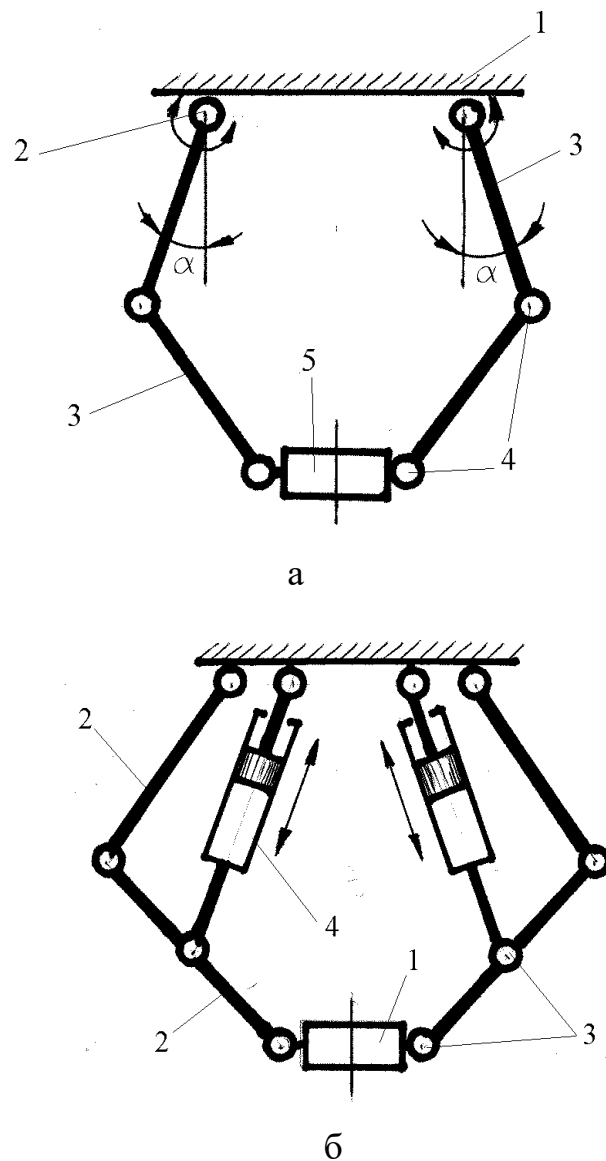
Положення у просторі виконавчого органу 1 залежить від довжини кожної кінематичної ланки 2 (рис. 3.9), зміна якої реалізується за допомогою приводу поступальної дії 4. При одночасній зміні довжин всіх кінематичних ланок на однакову величину виконавчий орган переміщується у вертикальному напрямку, а при зміні їх на різну величину – виконавчий орган обертається відносно відповідної осі координат.

– шляхом примусового обертального руху шарнірів, змонтованих на нерухомому елементі механізму (рис. 3.10, а). Механізм складається з трьох кінематичних ланок постійної довжини, виконаних у вигляді попарно-паралельно з'єднаних штанг, виконаних аналогічно паралелограмному механізму.

Положення виконавчого органу 1 (рис. 3.10, а) у просторі залежить від кута обертання шарніру 2. При одночасному повороті всіх шарнірів 2 на

однаковий кут, виконавчий орган 1 переміщується відносно вертикальної осі координат, а при їх обертанні на різні кути, виконавчий орган обертається відносно відповідної осі координат.

– шляхом зміни кута між кінематичними ланками постійної довжини. Механізм (рис. 3.10, б) складається з двох кінематичних ланок, виконаних у вигляді двох шарнірно зв'язаних прямокутних пластин (V-подібний механізм), одна з яких з'єднана з нерухомим стаціонарним блоком додатковою кінематичною ланкою змінної довжини з індивідуальним приводом.



а – паралелограмними; б – з додатковою ланкою змінної довжини

Рисунок 3.10 Механізми з кінематичними ланками постійної довжини

Положення виконавчого органу 1 (рис. 3.10, б) у просторі залежить від величини кута між пластинами основних кінематичних ланок 2. Зміна кута реалізується за допомогою додаткових кінематичних ланок 4 з індивідуальним приводом. При одночасній зміні кутів на однакову величину, виконавчий орган переміщується відносно вертикальної осі координат, а при зміні кутів на різну величину – виконавчий орган переміщується у горизонтальному напрямку.

Технологічне обладнання, побудоване на основі відповідних механізмів паралельної структури, також може бути класифіковане аналогічно.

Враховуючи, що кількість ступенів вільності виконавчого органу технологічного обладнання з паралельною кінематикою залежить від кількості кінематичних ланок механізму, на основі якого воно побудоване, можна запропонувати наступну його класифікацію. (рис. 3.11).

### 3.3. Класифікація технологічного обладнання з МПС

Кожний різновид технологічного обладнання з паралельною кінематикою згідно літературних джерел має свою назву, яка в основному характеризує його специфічні властивості. Механізми паралельної структури, які використовуються у технологічному обладнанні мають різні за конструктивним виконанням кінематичні ланки, а саме:

- шарнірно-важільні, складаються з визначеної кількості штанг постійної довжини, кожна з яких на кінцях має відповідні шарніри (універсальні або сферичні);



Рисунок 3.11 Класифікація технологічного обладнання з паралельною кінематикою за кількістю кінематичних ланок та ступенів вільності

- штанги змінної довжини, складаються з телескопічних або іншого конструктивного виконання штанг, на кінцях яких змонтовані шарніри. Штанги мають можливість змінювати довжину у залежності від заданого закону руху виконавчого органу;
- паралелограмний механізм, складається з двох штанг постійної довжини, розміщених попарно-паралельно, на кожному кінці яких змонтовані відповідні шарніри;
- сферичний механізм, кожна кінематична ланка виконана з двох послідовно з'єднаних напівкілець. Інформація щодо використання їх у технологічному обладнанні відсутня;
- V-подібний механізм, складається з двох шарнірно з'єднаних прямокутних плоских елементів, на кінцях яких змонтовані шарніри.

У технологічному обладнанні з паралельною кінематикою використовують різні виконавчі приводи поступальної та обертальної дії (рис. 3.12).

Приводи обертальної дії використовуються у технологічному обладнанні з паралельною кінематикою, у механізмах якого застосовується метод перетворення рухів:

- шляхом зміни кута між елементами V-подібного механізму;
- примусового обертального руху шарнірів, змонтованих на нерухомому стаціонарному блоку.

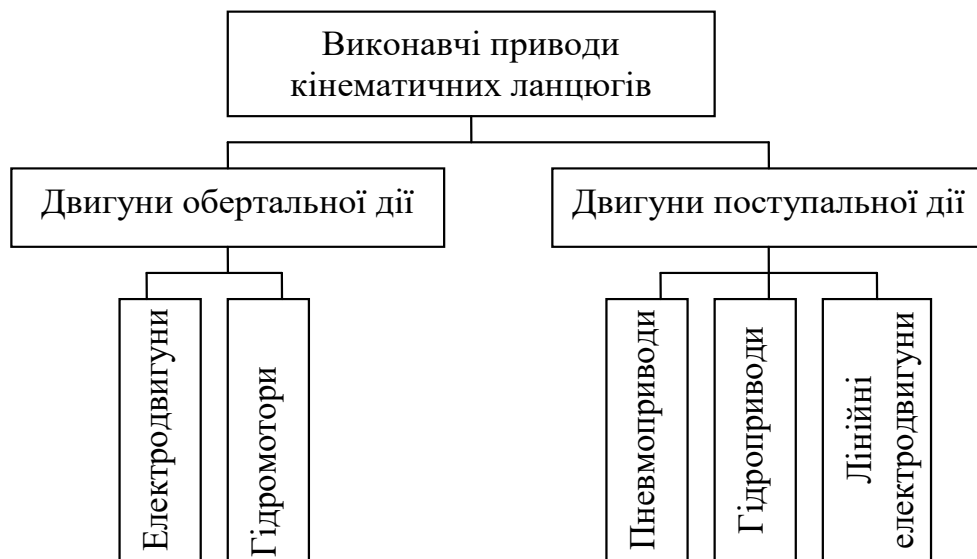


Рисунок 3.12 Класифікація приводів виконавчих органів технологічного обладнання з паралельною кінематикою

При застосуванні методу створення рухів:

- шляхом зміни довжини кінематичних ланок;
- шляхом зміни координат опорних шарнірів використовуються в основному лінійні приводи (пнеumo-, гідроциліндри та лінійні електроприводи).

У верстатному обладнанні з МПС розташування приводу головного руху виконавчого органу може бути:

- на рухомому виконавчому органі;
- на нерухомому елементі механізму.

Приводи додаткових та прискорених рухів виконавчих органів, а також приводи зміни довжини штанг можуть бути розташовані на нерухомому стаціонарному блоку обладнання або на його рухомих кінематичних ланках.

Для перетворення рухів у МПС використовуються різні традиційні механізми перетворення рухів (рис. 3.13).

Крім того, виконавчий орган технологічного обладнання з паралельною кінематикою може мати різне розташування у просторі по відношенню до об'єкту позиціонування (рис. 3.14).

Верстати з паралельною кінематикою, які мають чотири або п'ять кінематичних ланок (та аналогічну кількість ступенів вільності) принципово побудоване на основі трьохкоординатного МПС. Додаткові (одна або дві) кінематичні ланки обумовлюють лише розширення технологічних можливостей подібного обладнання аналогічно застосуванню багатоінструментальних головок або поворотних робочих столів у традиційному технологічному обладнанні.



Рисунок 3.13 Класифікація механізмів перетворення рухів

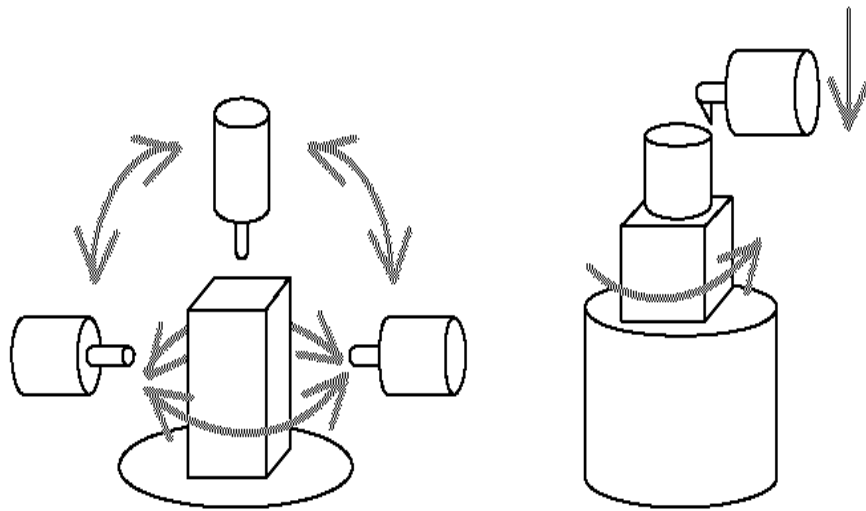


Рисунок 3.14 Розташування виконавчого органу по відношенню до об'єкту позиціонування

#### 3.4. Теоретичні передумови моделювання формоутворюючих рухів верстатів нових компонок

Проектування нових верстатів з механізмами паралельної структури потребує формалізації зв'язків між компонентами системи для математичного описання з подальшим візуальним моделюванням і оцінкою очікуваних технічних характеристик та визначенням оптимальних значень показників і конструкцій запропонованих верстатів.

Геометричні перетворення формотворної системи механізмів паралельної структури мають вигляд [3]

$$A_{II} = A_1(x) \cdot A_2(y) \cdot A_3(z) \cdot A_4(\varphi) \cdot A_5(\psi) \cdot A_6(\theta), \quad (3.1)$$

де  $A_1, A_2, A_3$  - матриці перетворення переміщенням ВО уздовж координатних осей  $X, Y, Z$ ;

$A_4, A_5, A_6$  - матриці перетворення обертанням ВО навколо тих же осей;

Аргументами матриць є величини переміщень  $x, y, z$  і кути Ейлера  $\varphi, \psi, \theta$  поворотів навколо осей  $x, y, z$  відповідно.

У верстатах з керованою довжиною штанг (гексаподах) дистанції між шарнірними опорами рухливої платформи й стаціонарним блоком  $a$ -  $A, b$ -  $B$ ,

... $n$ -  $N$  визначається при відомих віртуальних координатах кожної штанги окремо, якими є аргументи  $x, y, z, \varphi, \psi, \theta$ .

Використовуючи рівняння (3.1), можна визначити значення координат шарнірів  $a, b, \dots, n$  у системі стаціонарного блоку  $SXYZ$  при їхніх відомих координатах у системі рухливої платформи  $PX'Y''$ :

$$\begin{aligned} x_{i\{SXYZ\}} &= \cos(\psi) \cos(\theta) \cdot x_{i\{PX'Y'Z'\}} - \cos(\psi) \sin(\theta) \cdot y_{i\{PX'Y'Z'\}} + \sin(\psi) \cdot z_{i\{PX'Y'Z'\}} + X_P \\ y_{i\{SXYZ\}} &= (\sin(\varphi) \sin(\psi) \cos(\theta) + \cos(\varphi) \sin(\theta)) \cdot x_{i\{PX'Y'Z'\}} + (\sin(\varphi) \sin(\psi) \sin(\theta) + \\ &+ \cos(\varphi) \cos(\theta)) \cdot y_{i\{PX'Y'Z'\}} - \sin(\varphi) \cos(\psi) \cdot z_{i\{PX'Y'Z'\}} + Y_P; \\ z_{i\{SXYZ\}} &= (-\cos(\varphi) \sin(\psi) \cos(\theta) + \sin(\varphi) \cos(\theta)) \cdot x_{i\{PX'Y'Z'\}} + \\ &+ (\cos(\varphi) \sin(\psi) \sin(\theta) + \sin(\varphi) \cos(\theta)) \cdot y_{i\{PX'Y'Z'\}} - \cos(\varphi) \cos(\psi) \cdot z_{i\{PX'Y'Z'\}} + Z_P. \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $x_{i\{PX'Y'Z'\}}, y_{i\{PX'Y'Z'\}}, z_{i\{PX'Y'Z'\}}$  - координати шарнірних місць з'єднання рухливої платформи в системі координат  $PX'Y''$ .

$X_P, Y_P, Z_P$  - положення системи відліку рухливої платформи в системі координат  $PX'Y''$ .

Довжина кожної штанги механізму паралельної структури відповідно складе

$$\begin{aligned} d_i &= \sqrt{\left(x_{i\{SXYZ\}} - x_{i\{PX'Y'Z'\}}\right)^2 + \left(y_{i\{SXYZ\}} - y_{i\{PX'Y'Z'\}}\right)^2 + \left(z_{i\{SXYZ\}} - z_{i\{PX'Y'Z'\}}\right)^2}, \\ &\quad (i = a, b, \dots, n). \end{aligned} \quad (3.3)$$

При комп'ютерному моделюванні формотворних рухів і проектуванні верстатів зі штангами постійної довжини варто визначити положення нижніх кінців штанг на напрямних верстата [13, 19, 20].

У цьому випадку сполучимо центр сфери  $\vec{r}_S$  радіусом  $R_S$ , що приймемо рівним довжині відповідної штанги  $l_1, l_2 \dots l_i$  із центром кожного шарніра  $a, b, \dots, n$  рухливої платформи. Тоді точка перетинання поверхні сфери  $C = \{\vec{r}_S, R_S\}$  з лінією, що представлена напрямної  $P_A, P_B \dots P_i$  на станині буде положення відповідної каретки по керованій осі  $Z$  у системі координат верстата. Розрахунок точок перетинання двох геометричних об'єктів  $C_1$  і  $C_2$  складається в розв'язанні рівняння  $D(C_1, C_2) = 0$ . Конкретний вид його лівої частини залежить від компоновки верстата, розмірів і розташування напрямних у просторі. У

векторній формі точка перетинання прямої  $P_i$  і поверхні сфери  $C=\{\vec{r}_S, R_S\}$  визначається з рівняння

$$\vec{r}^* = \vec{r}_S + (\vec{\tau}_P \times \Delta r \times \vec{\tau}_P) \pm \sqrt{R_S^2 - (\Delta r \times \vec{\tau}_P)^2} \vec{\tau}_P, \quad (3.4)$$

де  $\vec{r}_S, R_S$  – радіус-вектор положення центра й радіус сфери відповідно;

$\vec{\tau}_P, r_P$  – точка і вектор напрямку прямої;  $\Delta r = \vec{r}_P - \vec{r}_S$ .

Скалярно дана задача описується спільним розв'язком параметричних рівнянь - ліній, що визначають напрямні верстата, і сфери із центром, сполученим з віссю обертальної кінематичної пари рухливої платформи з ВО

$$\begin{cases} F(t) = 0 \\ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2. \end{cases} \quad (3.5)$$

Для механізму паралельної структури із прямолінійними напрямними вираз (3.5) у системі координат верстата прийме вид

$$\begin{cases} y_i = k \cdot z + b & (i = 1 \sim n) \\ x_i = t \cdot z + d & (i = 1 \sim n) \\ (x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2 + (z - z_{0i})^2 = l_i^2 & (i = 1 \sim n). \end{cases} \quad (3.6)$$

Підставивши праву частину рівнянь прямої у рівняння поверхні сфери й розкривши дужки, одержимо

$$A \cdot z^2 - 2B \cdot z + C = 0 \quad (3.7)$$

де  $A=(1+k^2+t^2)$ ;  $B=(z_0+(b+y_0) \cdot k+(x_0+d) \cdot t)$ ;  $C=(z_0^2+(b+y_0)^2+(x_0+d)^2-l_i^2)$ .

Остаточо, корні рівняння (3.7) визначають положення нижніх кінців штанг МПС на напрямних верстата

$$d_{z_{i(1,2)}} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (3.8)$$

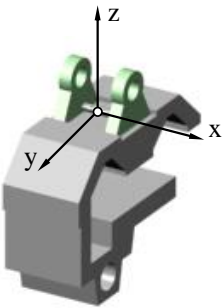
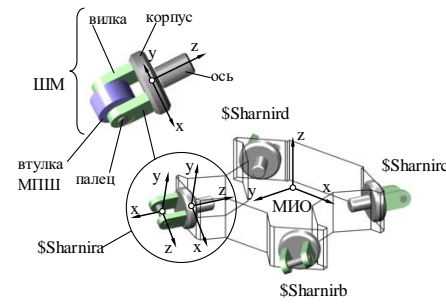
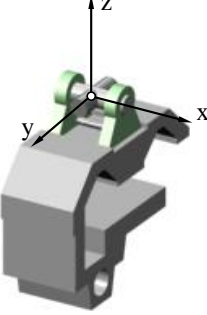
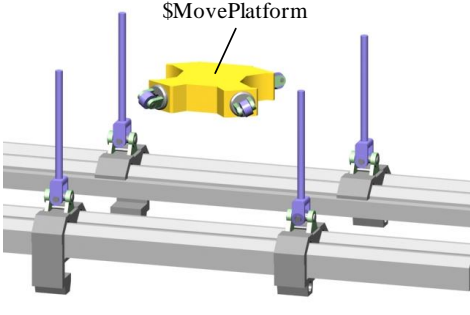
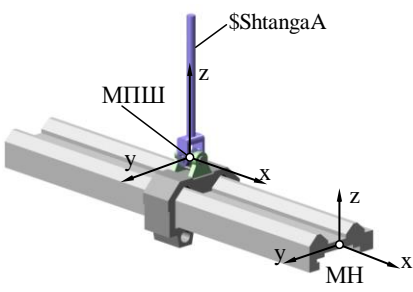
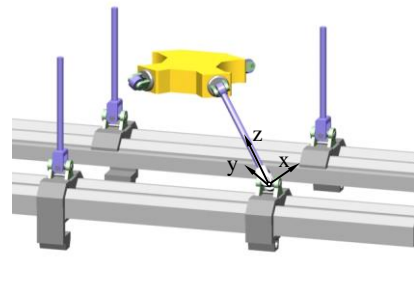
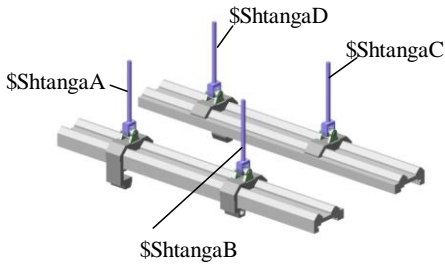
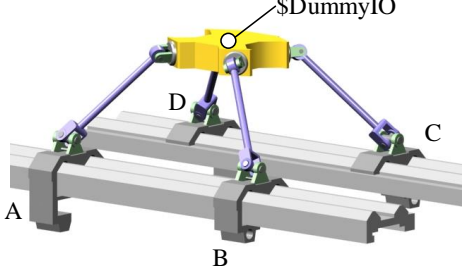
Якщо потрібно, то для переходу у світову систему координат необхідно зробити заміну аргументів  $z$  на  $x$ , і  $z_0$  на  $x_0$ .

Побудова зв'язаної тривимірної моделі виконується по модульно (табл. 3.1) [13, 14].

Модуль зміни координат (МЗК) опорних шарнірів – згруповані об'єкти каретка й корпус шарніра.

Шарнірний модуль (ШМ) – згруповані два циліндри з перенесеної в центр групи опорною точкою і зв'язані контролером прямої кінематики.

Таблиця 3.1. – Послідовність побудови й ієрархія модулів верстата МПС

№ п/п	Загальний вид / опорна крапка / ім'я об'єкта в моделі	№ п/п	Загальний вид / опорна крапка / ім'я об'єкта в моделі
1	 <p>4 Екземпляри іменами \$OporaA \$OporaB \$OporaC \$OporaD</p>	5	 <p>Модуль рухливого блоку виконавчого органа (МВО)</p>
	Модуль зміни координат опорних шарнірів (МЗК)		
2	 <p>4 Екземпляри іменами \$SharnirA \$SharnirB \$SharnirC \$SharnirD</p>	6	 <p>Складання модулів 2МН&gt;4МЗК&gt;4ШМ&gt;4МПШ без зв'язку з МВО</p>
	Шарнірний модуль - ШМ (шарнір Кардана)		
3	 <p>Модуль штанг постійної довжини (МПШ) і модуль напрямних (МН)</p>	7	 <p>Почерговий зв'язок модулів МПШ<sub>1,2,3,4</sub> з МВО за допомогою контролера LookAt</p>
	Модуль штанг постійної довжини (МПШ) і модуль напрямних (МН)		
4	 <p>Паралельна структура модулів 2МН→4МЗК→4ШМ→4МПШ</p>	8	 <p>Остаточне складання 2МН&gt;4МЗК&gt;4ШМ&gt;4МПШ&gt;МВО</p>
	Паралельна структура модулів 2МН→4МЗК→4ШМ→4МПШ		

## РОЗДІЛ 4

ВИКОРИСТАННЯ МПС ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

4.1. Оцінка функціональних можливостей технологічного обладнання на основі МПС

Сьогодні ми можемо спостерігати підвищений інтерес до функціональності ВПК, і як правило, його багатофункціональність стає визначальним фактором при виборі верстата. Більшість верстатобудівних фірм включає в нові моделі токарних верстатів можливість виконувати фрезерування поверхонь, у тому числі, складнопрофільних, шліфування, переважно чистове, свердління, зубонарізування, вимір і ряд інших операцій. Перший токарний верстат моделі V100 на основі МПК зі штангами змінної довжини розроблений фірмою Index-Werke і представлений на міжнародній виставці METAV'2000. У цьому верстаті шарнірно-стрижневі МПС використані для формоутворюючих рухів шпindelної бабки з токарним затискним патроном для заготовок. Робочий простір верстата V100 обмежено зоною 250 x 250 x 150 мм при максимальному діаметрі деталі 130 мм.

При обробці масивних деталей для поліпшення динамічних характеристик, особливо при високошвидкісній обробці, доцільно для токарних операцій зберегти жорстку нерухому або рухому (при необхідності) бабку, а шарнірно – стрижневі МПС використати для формоутворюючих рухів супорта з інструментом (або інструментальною системою).

У випадку гостріння довгомірних деталей необхідно збільшувати робочий простір. Із цією метою, потрібно сполучити результуючу траєкторію вершини інструмента з кінематичними властивостями й з'єднати обсяг рухів зі структурою верстата. Таким чином, можна задати потрібний ступінь вільності ВО для виконання токарним верстатом багатофункціональних завдань і розділити їх між традиційною й паралельною структурами. У результаті

виходить компоновання токарного багатоцільового верстата, де за рахунок твердих кінематичних зв'язків у вигляді штанг постійної довжини через шарнірні з'єднання окремого механізму поздовжньої подачі з відповідною точкою на корпусі рухливої платформи, відбувається самоорієнтація осі револьверної головки з інструментом.

Для поздовжньої подачі нижніх кінців кожної штанги по напрямних верстата використовуються кулькові гвинтові передачі. Короткі технологічні рухи з високою динамікою можуть бути реалізовані за допомогою паралельної структури в сполученні із традиційною кінематикою, що дозволяє використати всю робочу зону.

Керування подачею й орієнтацією різального інструменту виконується комплексно системою програмного керування (ЧПК) від чотирьох крокових двигунів, кожний з яких задає рух окремого механізму поздовжньої подачі, установленими шарнірами нижніх кінців штанг рухливої платформи. У результаті керованого руху нижніх кінців штанг відбувається переміщення й обертання рухливої платформи щодо координатних осей верстата X, Y, Z. Зміна положення нижнього кінця однієї зі штанг залишає без змін положення інших штанг, хоча й викликає зміну положення в просторі рухливої платформи, на якій установлений інструмент. При одночасному русі нижніх опор чотирьох штанг у будь-якій комбінації з різним значенням поздовжньої подачі й напрямком відбувається складний рух й орієнтація інструмента за рахунок того, що корпус рухомої платформи самовстановлюється у відповідне положення в координатному просторі верстата. Таким чином, рухома інструментальна платформа може мати від чотирьох до шести ступенів вільності щодо системи координат верстата й управляється переміщенням тільки по координаті Z нижніх кінців штанг постійної довжини, шарнірно пов'язаних із приводом подачі. Кожна штанга постійної довжини є твердою кінематичною ланкою, що управляється приводом подачі по напрямних верстата й зв'язана з корпусом рухливої платформи що несе інструмент.

#### 4.2. Оцінка можливостей застосування МПС у робото технічних вимірювальних системах

Технологічне обладнання з МПС (ТОПК) відрізняється від традиційного можливістю виконання на ньому не тільки операцій обробки та складання, а й випробування та контролю виробів без транспортних операцій, що значно підвищує продуктивність, поліпшує якість виробів, а також підвищує культуру виробництва. Застосування ТОПК, що має необхідний рівень мобільності зміни технологічних функцій, починаючи зі зміни інструмента (в тім числі й вимірювального) у процесі виготовлення виробу і закінчуючи адаптивним керуванням цим процесом, є принципово новим вирішенням проблеми підвищення якості виготовлення машин у специфічних умовах гнучкого багатомономенклатурного серійного виробництва.

ТОПК має значно ширші технологічні можливості у порівнянні з традиційними верстатними системами внаслідок його побудови на принципово нових концепціях:

– використання багатофункціональних та багатопоточних стержневих механізмів паралельної структури (рис. 4.1) дозволяє за допомогою одного механізму виконувати транспортні, установчі та технологічні операції;

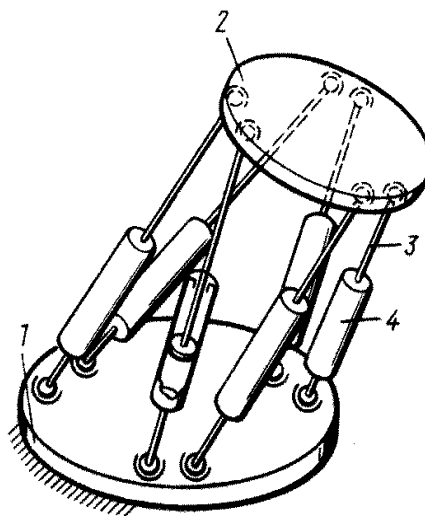


Рисунок 4.1 Кінематична схема 1-координатного робота

1 – нерухомий елемент; 2 – виконавчий орган-об'єкт маніпулювання; 3 – кінематичний ланцюг; 4 – лінійний привод

застосування вбудованих високомоментних приводів і швидкодіючої обчислювальної техніки робить можливим керування технологічними переміщеннями виконавчого органа механізму та компенсацію пружних переміщень під дією сил різання, чим забезпечує стійку роботу технологічної машини при нестійкому положенні механізму;

– використання вбудованих систем контролю сприяє створенню технологічних систем із елементами штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати операції, що виконуються вручну.

Для транспортування, маніпулювання, орієнтації та позиціонування об'єктами призначені різноманітні за кінематичною структурою, компонованням та конструктивним виконанням робототехнічні системи. Сучасні моделі маніпуляторів побудовані на основі *l*-координатних механізмів паралельної структури (рис. 4.1, 4.2), вихідний орган яких переміщується приводами, що регулюють відстань між заданими точками рухомої та нерухомої платформи. У таких робототехнічних системах шість ступенів свободи забезпечуються шляхом лінійних переміщень виконавчих кінематичних ланцюгів, що реалізують відповідний закон руху (рис. 4.1).

Робот складається з основи (нерухомої платформи) 1, виконавчого органу 2, з'єднаних попарно шістьма штангами 3. Довжина кожної штанги регулюється індивідуальним лінійним приводом 4. Конструкція робота значно спрощується шляхом використання усіх шести штанг з приводами аналогічного виконання. На виконавчому органі робота можна закріпити необхідний пристрій у залежності від виду робіт, що виконуються.

Для вирішення практичних завдань доцільним є закріплення шарнірів штанг безпосередньо до об'єкту маніпулювання (рис. 4.2). Конструкція такого механізму дає можливість формувати робочий простір та його робочу зону згідно з особливостями технологічного процесу та конструктивною формою об'єкта маніпулювання.

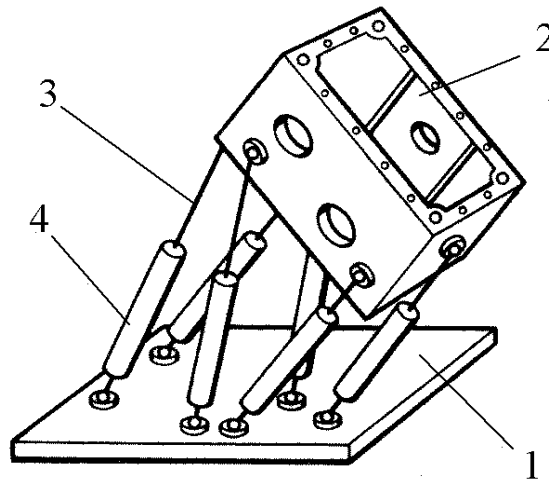


Рисунок 4.2 Об'єкт маніпулювання, що використовується як вихідна ланка:

1 – нерухомий елемент; 2 – виконавчий орган-об'єкт маніпулювання; 3 – кінематичний ланцюг; 4 – лінійний привод

Створений  $l$ -координатний робот з 24-ма ступенями свободи (рис. 4.3), який складається з чотирьох однотипних модулів і внаслідок високої маневреності може виконувати різноманітні технологічні операції. Робот має послідовне осьове компонування модулів. Такий робот із дискретними приводами має  $2^{24}$  положень у просторі. Якщо послідовно включати приводи з інтервалом через одну секунду, необхідно більше 30 років на здійснення усіх можливих положень виконавчого органа у просторі.

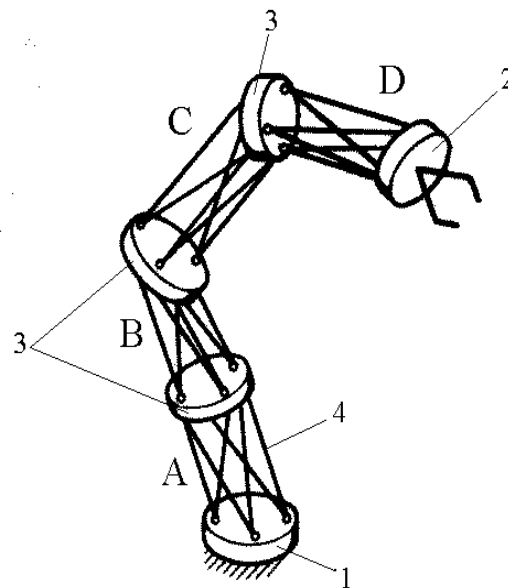


Рисунок 4.3 1-координатний робот із 24-ма ступенями свободи

До складу робота входять чотири послідовно з'єднані шестикоординатні модулі А, В, С, D паралельної структури. Кожний модуль має рухомий та нерухомий елементи, що шарнірно зв'язані кінематичними ланцюгами, зміна довжини яких реалізується лінійними приводами.

Широкі можливості синтезу різноманітних робототехнічних систем на основі сукупності однотипних модулів відкривають нові перспективи вирішення проблеми “несумісності” універсальних роботів із різними видами технологічного обладнання.

Схема робота із системою керування в абсолютних координатах зображена на рис. 4.4.

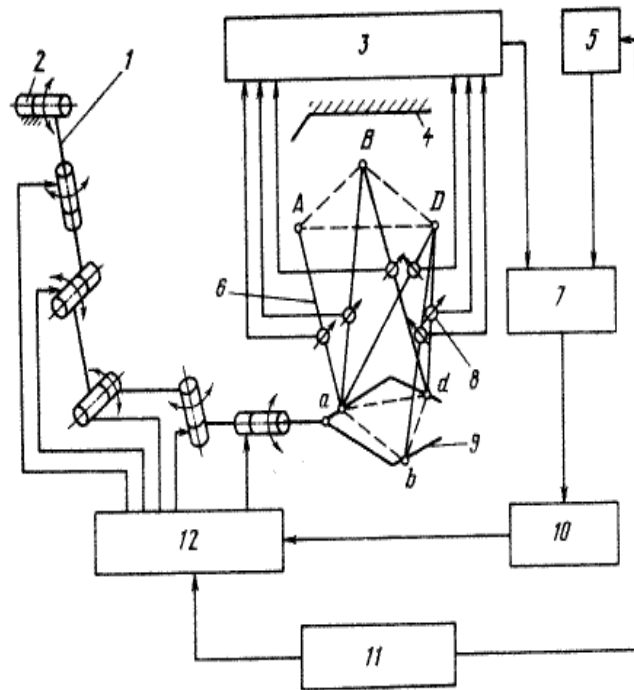


Рисунок 4.4 Схема робота із системою керування в абсолютних координатах

Робот містить кінематичні ланки 1, з'єднані між собою обертальними кінематичними парами 2. У кожній парі є привод, який здійснює відносний рух (поворот) зв'язаних ланок. Поточне положення у просторі вихідної ланки 9 характеризується координатами  $l_1=aA$ ;  $l_2=aB$ ;  $l_3=aD$ ;  $l_4=dB$ ;  $l_5=dD$ ;  $l_6=bD$ . Точки А, В, D належать базі 4, а точки а, b, d – вихідній ланці.

Система зворотного зв'язку є сукупністю шести пристроїв для вимірювання лінійних переміщень, які отримують інформацію щодо координат  $l_1, l_2, \dots, l_6$ . Кожний такий пристрій містить струну 6 та датчик 8 (типу автоматичної рулетки) для вимірювання поточної довжини струни або апаратуру для безконтактних вимірювань (наприклад, лазерну або ультразвукову). У процесі переміщення вихідної ланки інформація про поточні координати  $l_1, l_2, \dots, l_6$  надходить у блок 3. Одночасно з блока 11 програми, яка задає рух вихідної ланки, у блок 5 надходить інформація про відносні положення ланок, на підставі якої розраховуються задані значення поточних координат  $l_1^*, l_2^*, \dots, l_6^*$ . У блоці 7 з урахуванням координат  $l_1, l_2, \dots, l_6$  і  $l_1^*, l_2^*, \dots, l_6^*$  визначається неузгодженість між поточними заданими та фактичними положеннями вихідної ланки. Після цього у блоці 10 визначаються ланки, переміщенням яких може бути ліквідована ця неузгодженість. Дані з блоків 10 та 11 надходять у блок 12, у якому формується програма керування приводами ланок.

Розвиток машинобудування висуває нові вимоги до автоматизації процесів контролю, що обумовлює значне зростання швидкодії КВМ та забезпечення їх високих маніпуляційних властивостей. Роботи з паралельною кінематикою можуть здійснювати маніпуляції як із контрольно-вимірювальною оснасткою, так і з підконтрольними виробами. Прикладами такого обладнання є верстат-пентапод мод. P-800 німецької фірми Metrom, верстати-гексаподи мод. PM-600 японської фірми Okuma і TM-1000 АО "Лапик" (Росія), верстатні столи-гексаподи мод. Hexabot американської фірми Hexel Corporation, а також верстат-триподи ряду зарубіжних фірм.

Основним компонентом *верстата-гексапода мод. COSMO CENTER PM-600* є шестикоординатний механізм паралельної структури (рис. 4.5, 4.6), штанги 2 якого виконані у вигляді кульково-гвинтових пар та інтегровані у порожнистий привод, корпус якого з'єднаний із базовою конструкцією верстата 1 через опорні шарніри 4.



Рисунок 4.5 Загальний вигляд верстата-гексапода мод. COSMO CENTER PM-600 фірми OKUMA (Японія)

Така конструкція кінематичних ланок не обмежує максимальну довжину штанг, що дозволяє значно збільшити розміри робочого простору та забезпечити швидкість переміщення штанг до 120 м/хв із прискоренням до 15 м/с<sup>2</sup>. Частота обертання шпинделя з потужністю привода 7 кВт досягає 30000 об/хв. Виконавчий орган може повертатися у межах робочого простору на кут до 25° від вертикальної осі. Верстат можна використовувати і як КВМ.

*Технологічний модуль АО "Ланук"* (Грузія) забезпечує виконання в єдиному комплексі функцій багатоцільового технологічного обладнання та КВМ. На ньому можна виконувати операції фрезерування, розточування, свердління, розмітку та вимірювання деталей. Модуль можна за 10 хвилин без спеціального переналагодження перетворити у КВМ.

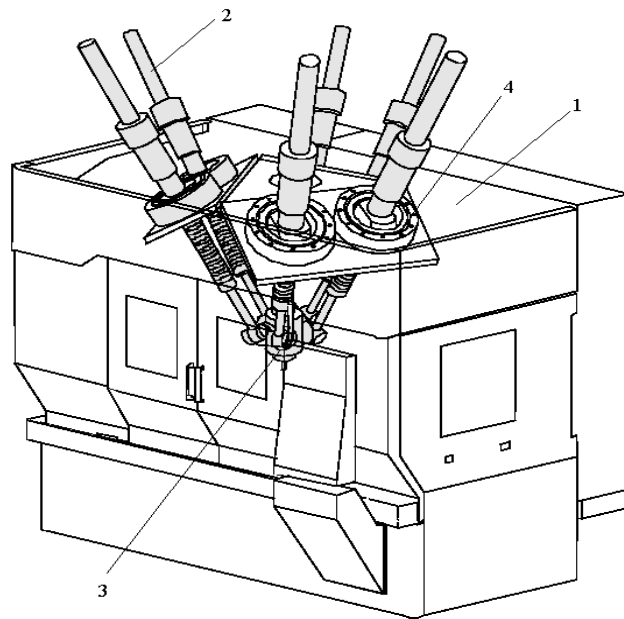


Рисунок 4.6 Структура верстата-гексапода моделі COSMO CENTER PM-600

Обробний центр моделі ТМ-1000 (рис. 4.7) АО "Лапик" має шість трубчастих опорних штанг, які розташовані на робочому столі та попарно зв'язані верхньою частиною і створюють три кронштейни, що з'єднані між собою іншими трубчастими елементами та утворюють таким чином опорну раму. На рамі встановлені шість телескопічних штанг, приводні електродвигуни постійного струму та фрикційні приводи.

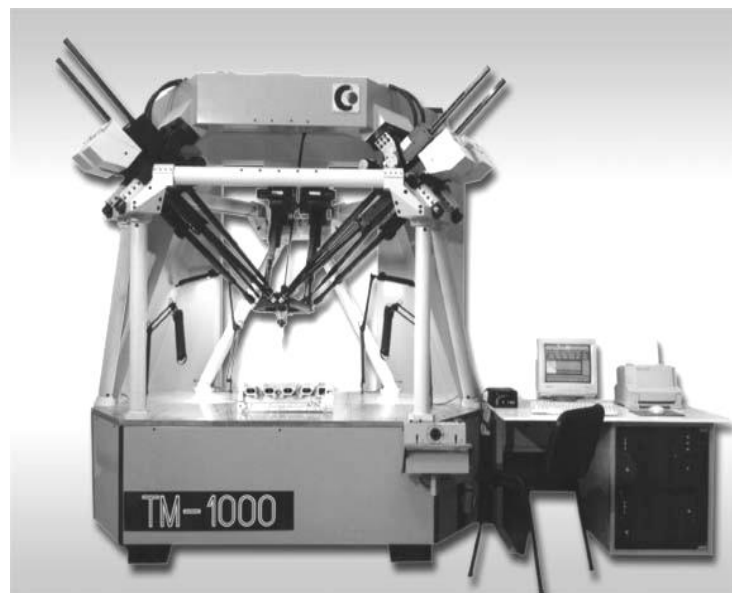


Рисунок 4.7 Загальний вигляд обробного центра мод. ТМ-1000АО "Лапик"

Для кожної штанги передбачена система зворотного зв'язку на основі лазерного інтерферометра, який зв'язаний з верхньою платформою та шпинделем або вимірювальним щупом. У останньому випадку використовуються гелій-неонові лазери та оптоволоконні світловоди, завдяки чому точність позиціонування виконавчих органів відносно координатних осей досягає 0,8 мкм. Рама верстата та його штанги з'єднується за допомогою універсальних шарнірів, які забезпечують їх одночасне вертикальне та бокове переміщення. Штанги змонтовані на опорній рамі верстата і з'єднані з платформою.

Для збільшення зносостійкості замість зубчастих передач використовують шарніри та фрикційні приводи. Команди на переміщення можуть бути задані у кодах ISO або на спеціальній мові.

Платформа може виконувати наступні базові рухи: переміщення до заданої точки або на задану відстань при одночасному повороті у задане положення; поворот у задане положення або на заданий кут без переміщення; переміщення точки, розташованої на платформі, відносно заданої гвинтової лінії з одночасним обертанням відносно цієї лінії.

Вантажопідйомність кожної штанги досягає 750 Н.

Система керування верстатом має функцію саморегулювання, яка забезпечує його стабільну точність завдяки усуненню похибок, викликаних природними деформаціями конструкції. Після введення вихідних даних у систему керування компенсуються похибки з урахуванням температури, вологості та атмосферного тиску.

Експлуатація подібних верстатів показала їх високу ефективність при обробці складнофасонних поверхонь елементів крил літаків, прес-форм, штампів. Маса цих верстатів 2,5...3,5 т, розміри робочого простору до 1000×700×500 мм. Кут повороту відносно осей координат не перевищує 45°; точність позиціонування вузлів становить 0,8...1,4 мм. КВМ за конструкцією аналогічні технологічному обладнанню. Довжина деталей, які на них вимірюються, не перевищує 1000 мм.

Головна задача гнучкої автоматизації у єдиному виробничому циклі – ефективне використання інтелектуальної праці за рахунок застосування верстатів з ЧПУ у сполученні з роботизацією і комп'ютеризацією управління. Розвиток перспективних технологій на основі гнучких виробничих систем (ГВС) сформував новий науковий напрямок, що одержав назву мехатроніка (механіка і електроніка), яка послужила основою створення технологічного обладнання з паралельною кінематикою [2, 3, 10, 14].

#### 4.3. Оцінка передумов розширення області практичного використання МПС

Відтоді, як ВПК набули промислового застосування, стало очевидно, що ці верстати мають певну перспективу, що дозволяє їм конкурувати в майбутньому з верстатами традиційної конструкції. Однак інтенсивний розвиток цих верстатів тільки починається, тому в деяких областях, де традиційні верстати впритул наблизилися до своєї технічної й економічної межі (що характерно, наприклад, для стандартних багатоцільових верстатів), ВПК поки неконкурентоспроможні. У той же час, результати дослідження прикладів успішного використання цих верстатів показали, що коли вони були зосереджені в «вузьких місцях», для верстатів традиційної конструкції, те це дозволило їм виявити свої якості найкращі з технологічної точки зору якості, і одночасно уникнути властивих таким верстатам недоліків. Проте, зовсім очевидна необхідність проведення подальших досліджень і розробок ВПК для того, щоб істотно розширити область їхнього практичного використання. При цьому варто звернути увагу на наступні моменти:

Оскільки прогнозувати конструкцію й продуктивність ВПК складніше, ніж традиційних верстатів, для вибору відповідної кінематики й оптимізації його конструкції необхідно скористатися ефективними інструментами стосовно до рішення завдання спеціального застосування цього верстата, ефективно

використовуючи тим самим його концептуальні можливості, наприклад модульність або здатність до зміни конфігурації.

ВПК, як відомо, містять у собі чимало щодо нових компонентів, наприклад шарнірів, які з однієї сторони є звичайними компонентами, яких чимало на будь-якому ВПК, але з іншої сторони (ключовими для одержання високої продуктивності верстата. Тому дуже важливо їхнє постійне вдосконалювання, що веде, зокрема, до істотного підвищення лінійної твердості верстата з обліком, зрозуміло, вартості цих компонентів.

Динамічні характеристики ВПК нерідко не відповідають очікуванням споживачів. Для поліпшення цих характеристик і досягнення високих швидкостей переміщень по координатах у сполученні з високою точністю цих переміщень, нелінійну динаміку ВПК, а також вплив стиків у шарнірах варто закладати в програми керуючих контролерів.

Такі операції як калібрування ВПК й оцінка його геометричної точності необхідно прагнути проводити безпосередньо в цеху, дозволяючи тим самим сполучати їх з такими ж операціями, проведеними у верстатів традиційної конструкції.

Внаслідок невисокої складності своїх механічних вузлів ВПК мають досить високий потенціал зниження вартості. Це підтверджується тими їхніми виробниками, які успішно виступають на ринку, зокрема фірмами SMT Tricert й Renault Automation Comau. Однак цьому заважає висока ціна на деякі вузли цих верстатів, наприклад на шарніри. Тому для підвищення їхньої конкурентоздатності відносно вартості необхідно збільшувати продуктивність, підвищувати обсяг випуску й рівень стандартизації комплектуючих.

#### 4.4. Оцінка шляхів оптимізації роботи верстатів з МПС ВПК

У цей час, як відзначено в доповіді Т. Трайба (T. Treib) «Практичне застосування верстатів з паралельною кінематикою» найбільш успішно зазначені вимоги виконують досить широко застосовувані в промисловості верстати фірм NEOS Robotics (на верстатах Tricert виконують свердління, зняття заусенців, фрезерування нескладних (і не дуже точних) автомобільних деталей), DS Technologie (на багатоцільових верстатах Ecospeed sprint фрезерують і свердлять цільні авіаційні деталі з алюмінію й різних сплавів) і Index (вертикально-токарні верстати V100 призначені для гостріння й виконання інших токарних операцій). Аналіз цих верстатів, розрахованих на число ступенів вільності від трьох до шести й що мають обмежену універсальність, дозволив розкрити основні причини їхнього успіху: правильний вибір концепції й компонування, пристосованої для здійснення конкретного кола завдань, використання характерних переваг паралельної кінематики й запобігання її ж характерних недоліків. Зокрема, багатоцільовий верстат Tricert цілком підходить для виконання високошвидкісного свердління з невисокою точністю, на верстаті V100 при обмеженні робочої зони виконують досить точні токарні роботи, а при відсутності цього обмеження здійснюють такі не потребуючі високої жорсткості верстата операції, як вимірювання, завантаження й розвантаження, лазерне маркування й т.ін..

#### 4.5. Оцінка можливості поєднання МПС із традиційними механізмами технологічного обладнання

На перший план в практиці верстатобудування і машинобудування виступають проблеми комбінації паралельної кінематики із традиційною (змішані рішення), число досяжних і реально підходящих для використання ступенів волі верстата, а також структура сервосистем. Зокрема, велике значення для практики мають розміри робочої зони, що досягає, співвідношення між швидкістю переміщення робочих органів, їхнім

прискоренням, типом прискорення й власних частот верстатів, а також між їх статичною й динамічною твердістю й точністю [5, 13, 14]. Для одержання їхнього оптимального компонування з урахуванням кінематики окремих вузлів особливо важливо широке застосування комп'ютеризованих методів проектування. У цьому зв'язку особливий інтерес представляє доповідь Ж.-П. Мерле (J.-P. Merlet) «Застосування систематичної методики оцінки й одержання оптимальної конструкції систем з паралельною кінематикою». У ньому розглядаються проблеми тривалого збереження точності таких систем, у тому числі верстатів і маніпуляторів.

У доповідях, присвячених розробці нових концепцій і конструкцій верстатів з паралельною кінематикою, розглядалися питання конструювання реконфігуруємих (верстатів, що піддають перекомпонуванию), одно- і багатокритеріальної оптимізації робочого обсягу, жорсткості й власних частот таких верстатів, а також їхньої структури, у тому числі структури комбінованих верстатів і новий підхід до їхньої розробки. Досліджувалися також критерії оптимізації верстатів з паралельною кінематикою (з рухомими й з нерухомими штангами), проблеми моделювання й оптимізації компонування гексаподів (як верстатів, так й маніпуляторів, що мають чотири ступеня вільності).

Верстати із традиційною й паралельною кінематикою мають свої вже відомі переваги й недоліки. Їх переваги, як повідомляється в доповіді Б. Куфусса «Новий підхід до розробки й оптимізації верстатів з комбінованою кінематикою», можна об'єднати, якщо у верстатах з комбінованою кінематикою використати відкриті й закриті кінематичні ланцюги. Із цією метою можливе застосування геометричного або динамічного підходу. При геометричному підході встановлюють ступені вільності, що вимагаються для виконання верстатом конкретного завдання, і розподіляють їх відповідно між традиційною й паралельною структурами. У результаті одержують верстати без кінематичного резервування, наприклад Ecospeed й Tricept. Суть цього підходу в тім, що результуючу траєкторію вершини інструмента співвідносять із

кінематичними властивостями, й обсяг руху поєднують зі структурами верстата. В результаті конкретне завдання обробки вирішується комбінацією коротких швидких і довгих повільних рухів цих органів. При фрезеруванні, наприклад, короткі рухи повинні сполучатися з піками швидкості. У результаті короткі рухи з високою динамікою можуть бути здійснені за допомогою паралельної структури, об'єднаної із традиційною кінематикою, що дозволяє використати всю робочу зону.

#### 4.6. Нова концепція побудови верстатів з МПС

На підставі аналізу результатів патентно-інформаційних досліджень і попередніх наробок з використанням багаторівневого методу морфологічного аналізу виконано науково-інженерне прогнозування компоновок верстатів з МПС, що представлено нижче наведеними морфологічними матрицями.

Ці матриці (2.9...2.12) дають можливість знайти нові нетрадиційні шляхи подолання спаду верстатобудування в Україні (з метою конфіденційності зміст матриць, розроблених проф. Кузнецовим Ю. М., не розкривається, а лише наводиться деякі морфологічні формули-сполучення альтернатив, ознак).

Згорнута

$$M_{СПК} = M_3 \wedge M_{ШБ} \wedge M_{ШТ} \wedge M_{БЛ} \quad (4.1)$$

Розгорнута повна

$$M_{СПК} = \begin{matrix} \left. \begin{matrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \end{matrix} \right\} \wedge \left. \begin{matrix} 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 \\ 2.2 & 3.2 & 4.2 & 5.2 \\ 2.3 & 3.3 & 4.3 & 5.3 \\ 2.4 & 3.4 & & 5.4 \\ 2.5 & 3.5 & & \end{matrix} \right\} \wedge \left. \begin{matrix} 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 \\ 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 \\ 6.3 & 7.3 & 8.3 & 9.3 \\ 6.4 & 7.4 & 8.4 & 9.4 \\ 6.5 & 7.5 & 8.5 & \\ 6.6 & 7.6 & 8.6 & \\ & & 8.7 & \\ & & 8.8 & \\ & & 8.9 & \\ & & 8.10 & \end{matrix} \right\} \wedge \left. \begin{matrix} 10.1 & 11.1 \\ 10.2 & 11.2 \\ 10.3 & 11.3 \\ 10.4 & 11.4 \\ 10.5 & 11.5 \\ 10.6 & 11.6 \\ 10.7 & \end{matrix} \right\} \quad (4.2)$$

Кількість варіантів  $N = 4 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 7 \cdot 6 = 18144000$ .

Розгорнута усічена для тіл обертання (альтернатива 1.1)

$$M'_{СПК} = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 \\ 2.2 & 3.2 & 4.2 & 5.2 \\ 2.3 & 3.3 & 4.3 & 5.3 \\ 2.4 & 3.4 & & 5.4 \\ 2.5 & 3.5 & & \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cccc} 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 \\ & 7.2 & 8.2 & 9.2 \\ & 7.3 & 8.3 & 9.3 \\ & 7.4 & & \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cc} 10.1 & 11.1 \\ 10.2 & 11.2 \\ 10.3 & 11.3 \\ 10.4 & \\ 10.5 & \\ 10.6 & \\ 10.7 & \end{array} \right| \end{array} \quad (4.3)$$

Кількість варіантів  $N' = 5 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 3 = 226800$ .

Розгорнута усічена для корпусних й плоских деталей

$$M''_{СПК} = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.1 & 5.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.4 & 4.2 & 5.3 \\ 1.4 & 2.4 & & 4.3 & \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cccc} 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 \\ 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 \\ 6.3 & 7.3 & 8.3 & 9.3 \\ 6.4 & 7.4 & 8.4 & \\ 6.5 & & 8.5 & \\ 6.6 & & 8.6 & \\ & & 8.7 & \\ & & 8.8 & \\ & & 8.9 & \end{array} \right| \wedge \left| \begin{array}{cc} 10.1 & 11.1 \\ 10.2 & 11.2 \\ 10.3 & 11.3 \\ 10.4 & 11.4 \\ 10.5 & 11.5 \\ 10.6 & 11.6 \\ 10.7 & \end{array} \right| \end{array} \quad (4.4)$$

Кількість варіантів  $N'' = 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 6 = 2939328$ .

Запропонована нова концепція гібридних компоновок верстатів з МПС, яка наочно представлена в порівняльних і структурних схемах (рис. 4.8, 4.9) для верстатів токарної і свердлильно-фрезерної груп. Цей підхід може бути використаний при створенні іншого технологічного обладнання з МПС (багатоцільові верстати, гнучкі виробничі модулі, верстати для лазерної обробки, текстильні машини, тощо).

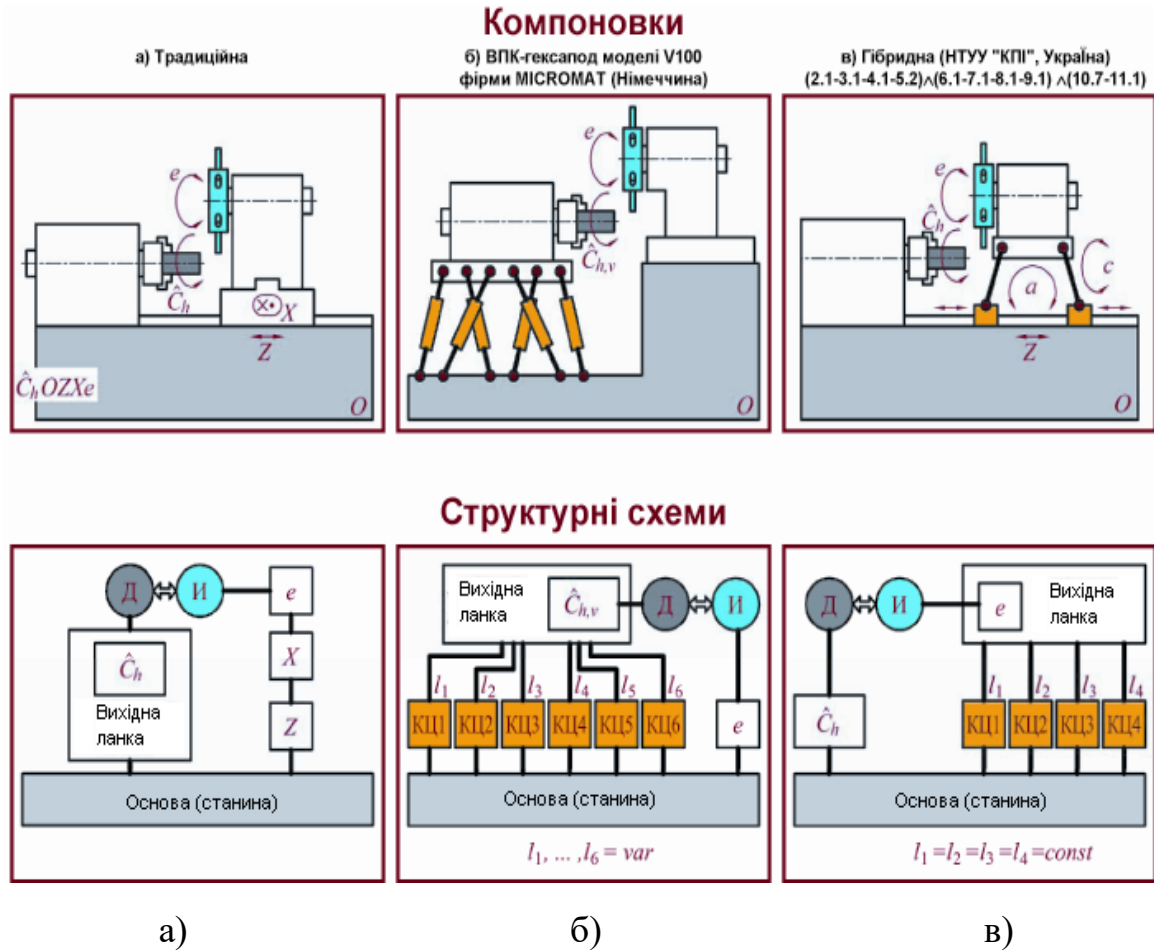
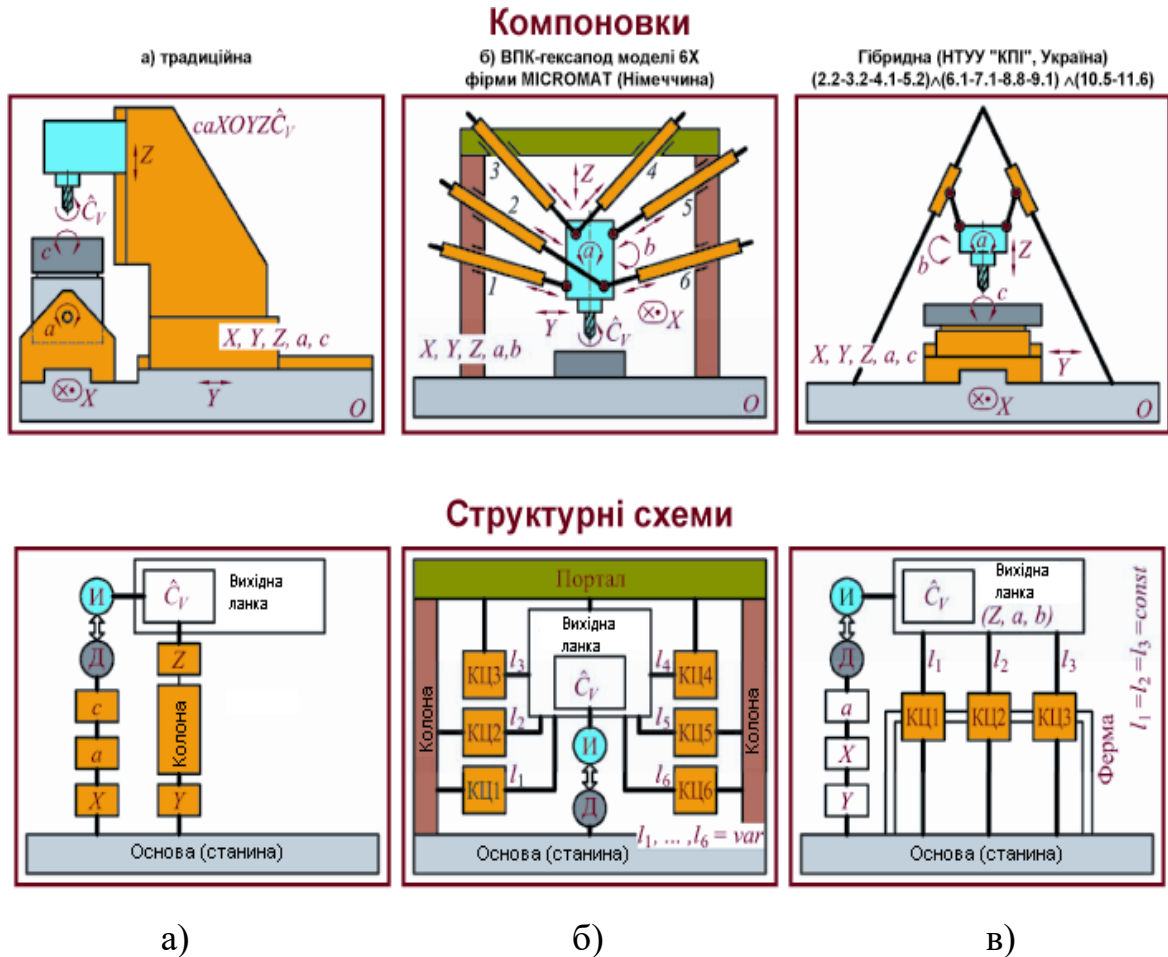


Рисунок 4.8 Порівняння компоновок і структурних схем токарних верстатів з ЧПК а) – традиційної; б) – стрижневої; в) – гібридної зі штангами постійної довжини

Розглянемо детально на прикладі верстатів токарної групи з МПС. Узагальнена схема МПС може бути представлена в вигляді просторової системи (рис.4.8). Вихідна ланка  $g$  уявляє платформу (каркас або корпус), на якій встановлено ВО. Точками  $A, B, C, \dots, N$  умовно позначені кінематичні пари будь-якого виду. Між основою  $O$  і вихідною ланкою  $g$  розташовано  $m$  незамкнених кінематичних ланцюгів, які можуть бути розгалуженими або ні. Наприклад, розгалужений кінематичний ланцюг 1 складається з двох



а) – традиційної; б) – стрижневої; в) – гібридної зі штангами постійної довжини [8, 12, 21]

Рисунок 4.9 Порівняння компоновок і структурних схем свердильно-фрезерних верстатів з ЧПК

кінематичних ланцюгів,  $1,1 - 1,2 - \dots - 1,(g - 1)$  та  $1,1' - 1,2' - \dots - 1,(g - 1)$ , що мають одну спільну ланку  $1,(g - 1)$ , яким він зв'язаний в кінематичній парі D з вихідною ланкою g. Нерозгалужений незамкнений кінематичний ланцюг  $m,1 - m,2 - \dots - m,(g - 1)$  з'єднаний в кінематичних парах S, M з основою і вихідною ланкою g.



основою через штанги постійної довжини, як це реалізується у верстатах другої групи.

Саме такий підхід закладений у пропоновану нову концепцію гібридних компоновок, які по кількості керованих координат не поступаються верстатам першої групи (рис. 4.11, 4.12).

Для реалізації нової концепції гібридних компоновок на прикладі токарних багатоцільових верстатів і забезпечення вище перерахованих вимог запропонований комплекс методів, що дозволяють перейти від традиційної схеми метало- й деревообробного устаткування (рис. 4.11, а) до ряду нових компоновок багатофункціональних і багатоцільових токарних верстатів [13, 14] з паралельною кінематикою (рис. 4.11, б).

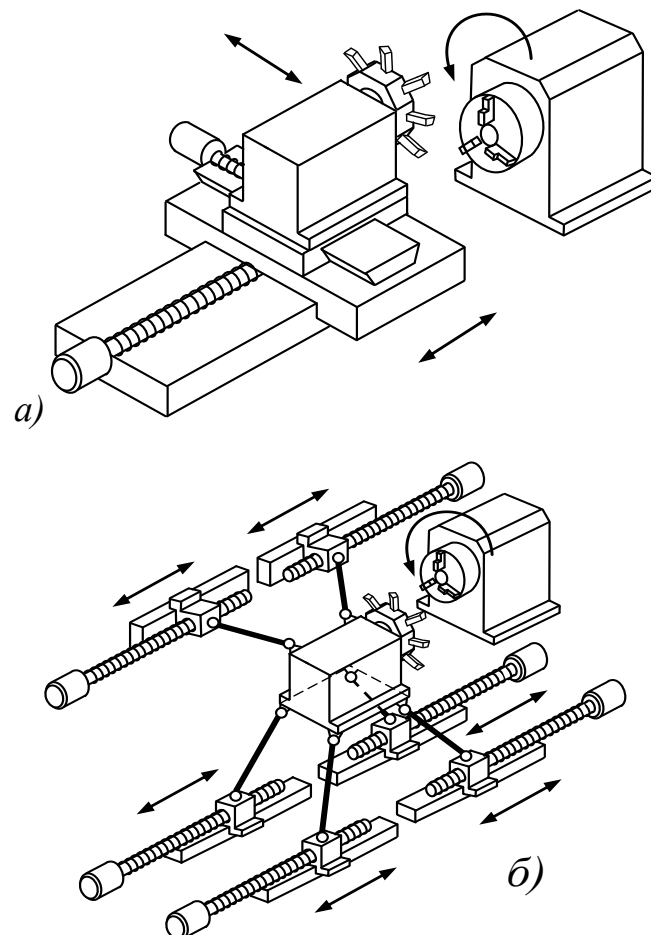
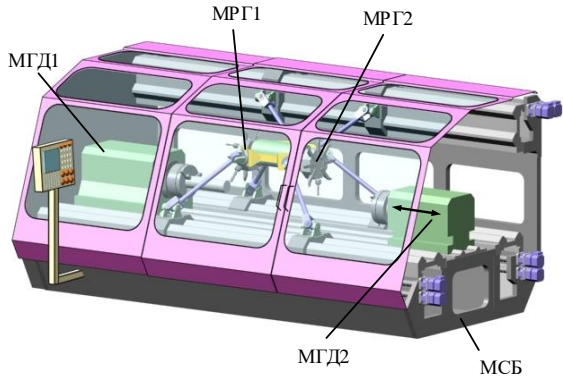
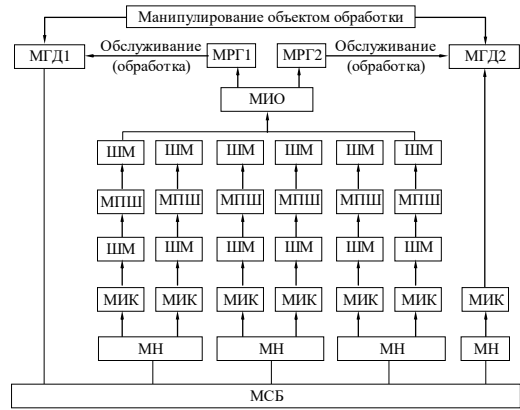


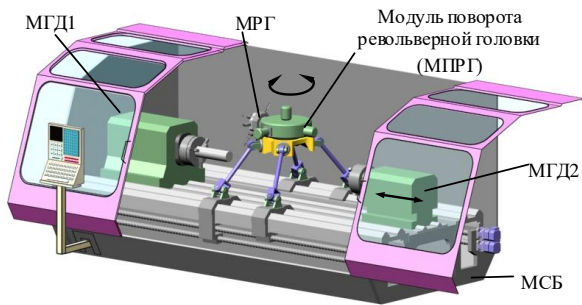
Рисунок 4.11 Формоутворюючі рухи при токарній обробці на верстаті: а) - традиційної компоновки; б) - на основі шарнірнострижневих систем з постійною довжиною штанг



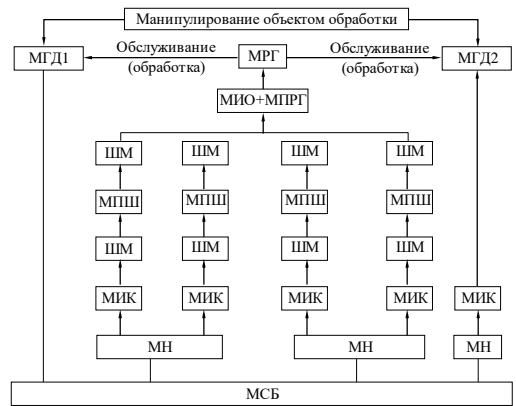
а)



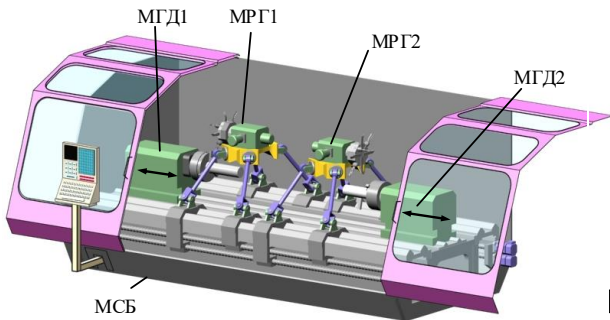
г)



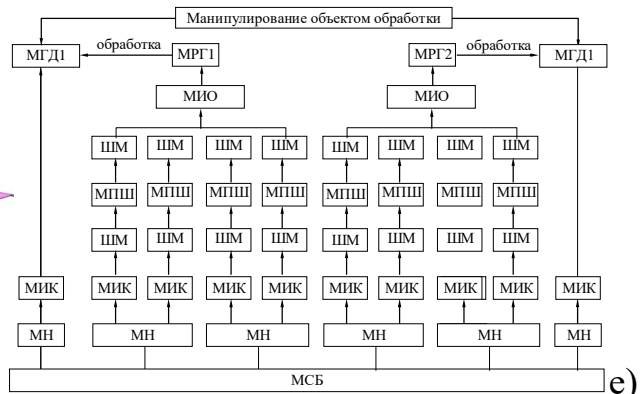
б)



д)



в)



е)

а) б) в) і відповідні їм структурні схеми, що реалізують нову концепцію побудови верстатів з паралельною кінематикою

Рисунок 4.12 Нові компоновки токарних багатоцільових верстатів

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. При створенні токарних верстатів з МПС для обробки масивних деталей доцільно виконати стабільну нерухому шпindelьну бабку, а шарнірно-стрижневі МПС використовувати для формоутворюючих рухів супорта з інструментом (або інструментальною системою).
2. При створенні токарних верстатів з МПС доцільно розділити обсяг рухів між традиційною й паралельною структурами.
3. Для підвищення технічних характеристик (жорсткість, металоємність, великі прискорення виконавчих органів і т.д.) верстата з МПС доцільно використовувати короткі штанги постійної довжини при виборі оптимального варіанта нових компоновок.
4. Для розширення технологічних можливостей верстатів з МПС є доцільним доповнення основної компоновки верстата допоміжними засобами, наприклад поворотним пристроєм інструментальної системи, робота двох і більше МПС в одній компоновці з перетинанням робочих зон й т.п.
5. Для підвищення ефективності обробки деталей певного типу на верстатах з МПС доцільно проводити створення компоновки верстата, що узгоджена з технологічними завданнями й обумовлена геометрією деталі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання / уклад. Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л.Заблоцька Луцьк : ЛНТУ, 2023. 46 с.
2. Nataliya Zubovetska, Yurii Fedorus', Volodymyr Shvabyuk, Rostyslav Redko; To the problem of developing a methodology for the frequency analysis of spindle runout. AIP Conf. Proc. 1 November 2023; 2840 (1): 040007. <https://doi.org/10.1063/5.0169334>
3. Редько Р.Г. Дослідження та вдосконалення конструкції виконавчих вузлів багатошпиндельного токарного напівавтомату для обробки шестерень / Р.Г.Редько, П.М. Цюпа, Р.П. Приступа // Студентський науковий вісник. Серія «Технічні науки». Науковий збірник. Випуск 47. – Луцьк: ІВВ ЛНТУ, 2022. - С. 266-272.
4. Редько Р.Г. Оптимізація параметрів шпиндельного вузла / Редько Р.Г., Цюпа П.М. // Тези II студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “ Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ”. Луцьк: ЛНТУ – 2022 р. – С. 24-27.
5. Redko, R., Zabolotnyi, O., Redko, O., Savchuk, S., Kovalchuk, V.: Improvement of Manufacturing Technology and Recovery of Clamping Collets for Lathe Automats. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2020).
6. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част. Під ред. Ю.М. Кузнецова. Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2003 р.
7. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Графічне моделювання робочого простору верстата-гексапода // Зб. наукових праць КДТУ / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / Вип. 13. – Кіровоград, 2003. – с. 230-235.

8. Дмитрієв Д.О. Кінетостатичний аналіз каркасних компонок верстатів з механізмами паралельної структури // Науковий журнал "Технологічні комплекси" №2, 2010. – с. 40-45.

9. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Скляр Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. /Під ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.

10. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Скляр Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою.- Кіровоград, 2004. - 449с.

11. Кузнецов Ю.М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні // Збірник наукових праць за матеріалами науково-методичної конференції "Проблеми фізико-математичної і технічної освіти і науки України в контексті євроінтеграції (Вища освіта-2006)".- К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. – с.45 -55.

12. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компонок // Вісник ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008, № 1, – с. 61-70.

13. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О. Моделювання технологічних рухів в верстатах з паралельною кінематикою при обробці складно-профільних поверхонь // Зб. наукових праць НТУ "ХП" "Современные технологии в машиностроении", вып. 1, 2008. – с. 81-89.

14. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О. Програмно-математичний апарат керування виконавчим органом багатокоординатних верстатів нових компонок // Автоматика, автоматизация, электрические комплексы и системы. – Херсон. Изд-е ХНТУ, №1(21), 2008. – с.162-169.

15. Кузнецов Ю.М., Самойленко О.В. Математичне моделювання процесу обробки полігональних поверхонь на токарному верстаті методом кінематичного налагодження // Наукові нотатки. Міжвуз. збірник за напрямом "Інженерна механіка", Луцьк, 2007, №20. – С. 232...238.

16. Кузнецов Ю.М., Самойленко О.В. Обробка полігональних поверхонь: теорія і практика. Монографія. – К.: ТОВ "ГНОЗІС", 2008. – 193 с.

17. Кузнецов Ю.М., Самойленко О.В. Полігональні поверхні в машинобудуванні та нові способи їх обробки // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский технический институт". Машиностроение. – 2001. – № 41. – С. 38...46.

18. Кузнецов Ю.М., Самойленко О.В., Валід Алі Рамадан. Модернізація багатошпиндельного токарного автомату мод. 1Б240-6 для виготовлення деталі з шестигранним отвором // Технологические системы. Научные разработки и результаты исследований. – 2002. – №2 (13). – С. 81...84.

19. Самойленко О.В. Вдосконалення токарних верстатів для обробки полігональних поверхонь методом кінематичного налагодження / Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – К., 2006. – 195 с.

20. Самойленко О.В. Дослідження пристроїв для обробки полігональних глухих отворів невеликих розмірів // Промислова гідравліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Вінниця: ВДАУ, 2007. – Вип. 1(15). – С. 105...109.

21. Bing Li . Xiaoping Hu . Hao Wang Analysis and simulation for a parallel drill point grinder. Part 2: grinding kinematic modeling and simulation // Int J Advanced Manufacturing Technology (2006) 30: P. 221–226.

22. Huang Q., Hadeby H., Sohlenius G. Connection Method for Dynamic Modelling and Simulation of Parallel Kinematic Mechanism (PKM) Machines //Int I Adv Manuf Technol (2002) 19:163 – 173, 2002. Springer – Verlag, London, Limited.