

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
на тему:

**Дослідження багатокоординатного столу на основі механізму
паралельної структури з круговою напрямною**

**Research on a multi-coordinate table based on a parallel structure
mechanism with a circular guide**

Виконавець: здобувач вищої освіти 2 року
магістратури, групи ГМ-23М-З, напрямку 133
«Галузеве машинобудування»

_____ Віталій ТЕРНАВСЬКИЙ

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

Рецензент: канд. техн. наук, доцент

_____ Олег БЕВЗ

Завідувач кафедри: канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

Центральноукраїнський національний технічний університет	
Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
Андрій ГРЕЧКА

«_____» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА
Віталія ТЕРНАВСЬКОГО**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження багатокоординатного столу на основі механізму паралельної структури з круговою напрямною

2. Керівник роботи: к.т.н., доц., Іван ВАЛЯВСЬКИЙ

3. Строк подання роботи до захисту «20» травня 2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: розширення функціональних можливостей багатокоординатного столу з паралельною кінематикою

Завдання:

- проаналізувати існуючі схеми побудови механізмів паралельної структури; - розробити компоновку столу з круговою напрямною і вирішити зворотну задачу кінематики для цієї компоновки;
- дослідити геометричні параметри робочого простору запропонованої компоновки;
- розрахувати техніко-економічні показники ефективності проектування та використання обладнання з паралельною кінематикою.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Іван ВАЛЯВСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 2	Іван ВАЛЯВСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 3	Іван ВАЛЯВСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 4	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Лютий 2025	Вик.
	АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ		
		Лютий 2025	Вик.
2	РОЗРОБКА КОМПОНОВКИ БАГАТОКООРДИНАТНОГО СТОЛУ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ		
	З КРУГОВОЮ НАПРЯМНОЮ	Березень 2025	Вик.
3	ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ		
	ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ	Березень 2025	Вик.
4	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ	Квітень 2025	Вик.
5	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Квітень 2025	Вик.
6	ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	Травень 2025	Вик.

Дата видачі завдання «03» лютого 2025 р.Керівник роботи _____ Іван ВАЛЯВСЬКИЙ
(підпис)Завдання прийнято до виконання 03» лютого 2025 р.Здобувач _____ Віталій ТЕРНАВСЬКИЙ
(підпис)

Анотація

Віталій ТЕРНАВСЬКИЙ. Дослідження багатокоординатного столу на основі механізму паралельної структури з круговою напрямною. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2025. – 75 с. Матеріали презентації 9 аркушів.

Метою роботи є розширення функціональних можливостей багатокоординатного столу з паралельною кінематикою.

Для досягнення мети дослідження було вирішено такі задачі: - проаналізовано існуючі схеми побудови механізмів паралельної структури; розроблено компоновку столу з круговою напрямною; - вирішено зворотну задачу кінематики для цієї компоновки; - досліджено робочий простір запропонованої компоновки; - розраховано техніко-економічні показники ефективності проектування та використання обладнання з паралельною кінематикою.

Актуальність. Методи розширення функціональних можливостей технологічного обладнання з паралельною кінематикою з круговими напрямними недостатньо досліджені.

Наукова новизна. Запропоновано компоновку багатокоординатного столу з паралельною кінематикою з круговою напрямною та досліджено її вплив на геометричні параметри робочого простору.

Ключові слова: верстат, стіл, робочий простір, паралельна кінематика, кругові напрямні.

Abstract

Vitalii TERNAVSKYI. Research on a multi-coordinate table based on a parallel structure mechanism with a circular guide. Master's Thesis: CNTU, 2025. - 75 p. Presentation materials 9 il.

The aim of the work is to expand the functional capabilities of a multi-coordinate table with parallel kinematics.

To achieve this goal, the following tasks were accomplished:

- existing schemes of parallel structure mechanisms were analyzed;
- a layout of the table with a circular guideway was developed;
- the inverse kinematics problem for this layout was solved;
- the workspace of the proposed layout was studied;
- technical and economic indicators for the design and application of a machine tool with parallel kinematics were calculated.

Relevance. Methods for expanding the functional capabilities of technological equipment with parallel kinematics and circular guideways are insufficiently studied.

Scientific novelty. A new layout of a multi-coordinate table with parallel kinematics and a circular guideway is proposed, and its influence on the geometric parameters of the workspace is investigated.

Keywords: machine tool, table, workspace, parallel kinematics, circular guideways.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	10
1.1. Загальні відомості про технологічне обладнання з паралельною кінематикою	10
1.2. Компоновки обладнання з паралельною кінематикою	13
1.2.1. Гексаподи.....	14
1.2.2. Пентаподи	17
1.2.3. Гібридні механізми з триподом і послідовним виконавчим органом.....	20
1.2.4. Гібридні механізми з лінійною направляючою та паралельним виконавчим органом.....	24
1.3. Використання обладнання з паралельною кінематикою	26
1.4. Мета і задачі досліджень	30
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	31
2.1. Конструкція та принцип дії компоновки столу з круговою напрямною	31
2.2. Просторові функціональні залежності компоновки столу	33
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ БАГАТОКООРДИНАТНОГО СТОЛУ	46
3.1. Вплив компоновочної схеми на робочий простір	46
3.2. Узгодженість рухів кінематичних ланок при реалізації типових рухів.....	48
3.3. Вплив діапазону довжин кінематичних ланок і кутів нахилу виконавчого органу.....	51

РОЗДІЛ 4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	56
4.1. Загальні вихідні дані.....	56
4.2. Визначення витрат на підготовку виробництва	57
4.3. Визначення витрат на проведення модернізації верстата	58
4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)	63
4.5. Розрахунок показників економічної ефективності	67
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71

ВСТУП

Актуальність теми. Цифрова трансформація виробництва вимагає вищої продуктивності, гнучкості та надійності. Хоча цифрова революція запровадила комп'ютерний зір, штучний інтелект і загалом нове програмне забезпечення, датчики та системи керування для значного покращення виробничих операцій, верхня межа продуктивності (або, в деяких випадках, вузьке місце) завжди встановлюється апаратним забезпеченням. Тому виробники постійно шукають кращі технології, в основі яких лежать верстати. Верстат, як правило, включає в себе пристосування, які утримують заготовку, інструмент, що використовується для виробничої операції, і механізм, який спрямовує інструмент по заздалегідь визначеній траєкторії; додаткові механізми можуть виконувати маніпуляції з продуктом і складання.

Звичайні верстати характеризуються послідовною кінематичною архітектурою, але паралельні механізми можуть забезпечити притаманне їм покращення кінематичних і динамічних характеристик, особливо з точки зору жорсткості та швидкості. У той час як у послідовній архітектурі інструмент кріпиться до нерухомої основи верстата через послідовність жорстких частин, з'єднаних між собою приводними з'єднаннями (тобто лінійними або обертальними двигунами), паралельний верстат забезпечений декількома послідовними ланцюгами (зазвичай їх називають кінематичними ланками паралельного механізму), виготовленими як з приводних, так і з пасивних з'єднань, що з'єднують інструменти з станиною. Така компоновка надає паралельним верстатам дві ключові переваги:

- Кінематична архітектура із замкненим контуром дозволяє розподіляти навантаження між ланцюгами, що призводить до більшого корисного навантаження та менших деформацій під навантаженням. Крім того, в той час як в послідовних архітектурах поширюються похибки обертання і позиціонування, кінематика замкненого контуру паралельного механізму призводить до внутрішнього зменшення і часткової компенсації цих похибок.

- Кінематичні ланки зазвичай містять по одному двигуну. Оскільки двигуни є одними з найважливіх компонентів у механізмі, вони можуть бути зручно розміщені біля основи кожної кінематичної ланки або якомога ближче до основи, що призводить до зменшення рухомої маси і, таким чином, до покращення інерційних та динамічних характеристик.

Тому технологічне обладнання з паралельною кінематикою становить особливий інтерес для обробної промисловості, оскільки воно може покращити продуктивність виробництва. Тим не менш, інтенсивні дослідження паралельних механізмів за останні три десятиліття не знайшли відображення в промисловому використанні: лише обмежена кількість верстатів з паралельною кінематикою стали успішними в обробній промисловості, де послідовні механізми все ще значно популярніші.

Метою роботи є розширення функціональних можливостей багатокоординатного столу з паралельною кінематикою.

Для досягнення мети дослідження було вирішено такі **задачі**:

- проаналізовано існуючі схеми побудови механізмів паралельної структури;
- розроблено компоновку столу з круговою напрямною;
- вирішено зворотню задачу кінематики для цієї компоновки;
- досліджено робочий простір запропонованої компоновки;
- розраховано техніко-економічні показники ефективності проектування та використання обладнання з паралельною кінематикою.

Елементи наукової новизни роботи: запропоновано компоновку багатокоординатного столу на основі механізму з паралельною кінематикою з круговою напрямною та досліджено геометричні параметри робочого простору.

Об'єкт дослідження: багатокоординатний стіл з паралельною кінематикою з круговою напрямною.

Предмет дослідження: конструктивні залежності обладнання з паралельною кінематикою.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Загальні відомості про технологічне обладнання з паралельною кінематикою

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою зазвичай визначається як механізм, виконавчий орган якого пов'язаний з нерухомою основою за допомогою декількох незалежних кінематичних ланцюгів, які називаються ланками. Вважається, що кожна ланка містить принаймні один виконавчий механізм, а загальна кількість виконавчих механізмів дорівнює ступеню свободи виконавчого органу; виконавчий орган повинен бути повністю обмежений, коли виконавчі механізми заблоковані [1, 9]. Загальна кінематична схема механізму паралельної структури зображена на рис. 1.1.

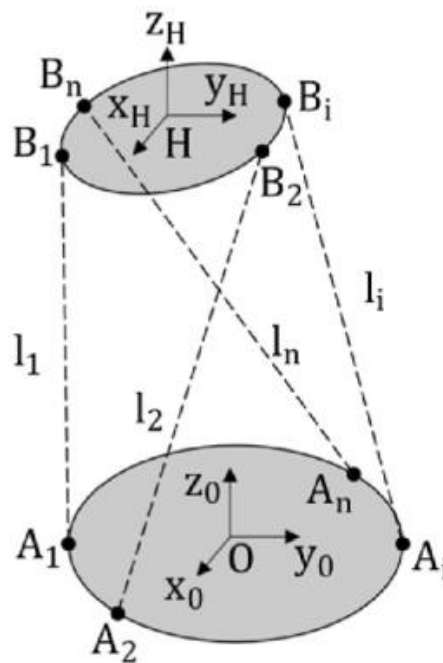


Рис. 1.1. Загальна кінематична схема механізму паралельної структури

В останні десятиліття спостерігається сплеск розвитку конструкцій технологічного обладнання з паралельною кінематикою, з безліччю

винайдених і розроблених нових архітектур. Однак, у галузі верстатобудування найбільш популярними є лише кілька конструкцій, які відповідають суворим вимогам жорсткості, корисного навантаження, швидкості та точності, які не можуть бути досягнуті багатьма популярними архітектурами (наприклад, роботами Delta та їхніми варіантами [9, 14, 16]). Таким чином, ми представляємо два різних сімейства паралельних маніпуляторів, які були особливо успішними в якості верстатів:

- Платформа Стюарта (рис. 1.2, а), яку часто називають гексаподом, являє собою конструкцію з шести кінематичних ланок змінної довжини. Така архітектура має переваги повної мобільності та багату історію і літературу, оскільки це був перший винайдений механізм паралельною структурою (Gough 1952, Stewart 1965 [25]) і перший, який був використаний як верстат [9]. Його структура стала основою багатьох інших машин з паралельною кінематикою з шістьма кінематичними ланками (наприклад, Hexaglide (рис. 1.2, б), але оригінальний дизайн у вигляді надійної, точної та жорсткої 6-координатної платформи залишається найпопулярнішим.

- Маніпулятори з низькою рухливістю мають менше шести кінематичних ланок (три (трипод), чотири (тетрапод) або п'ять (пентапод)). Багато 3-координатних маніпуляторів мають на меті роз'єднати орієнтацію та положення інструменту, щоб забезпечити роботу виконавчого органу лише в режимі переміщення або обертання; 4-х та 5-координатні верстати, такі як пентапод (рис. 1.2, в), натомість видаляють небажані ступені вільності, відмовляючись від 1-2 орієнтаційних ступенів, щоб посилити увагу на решті осей. На додаток до покращеної жорсткості і більш компактної структури, маніпулятори з меншою рухливістю значно зменшують або повністю усувають сингулярні конфігурації, що зустрічаються в робочому просторі гексаподів і подібних до них 6-координатних маніпуляторів.

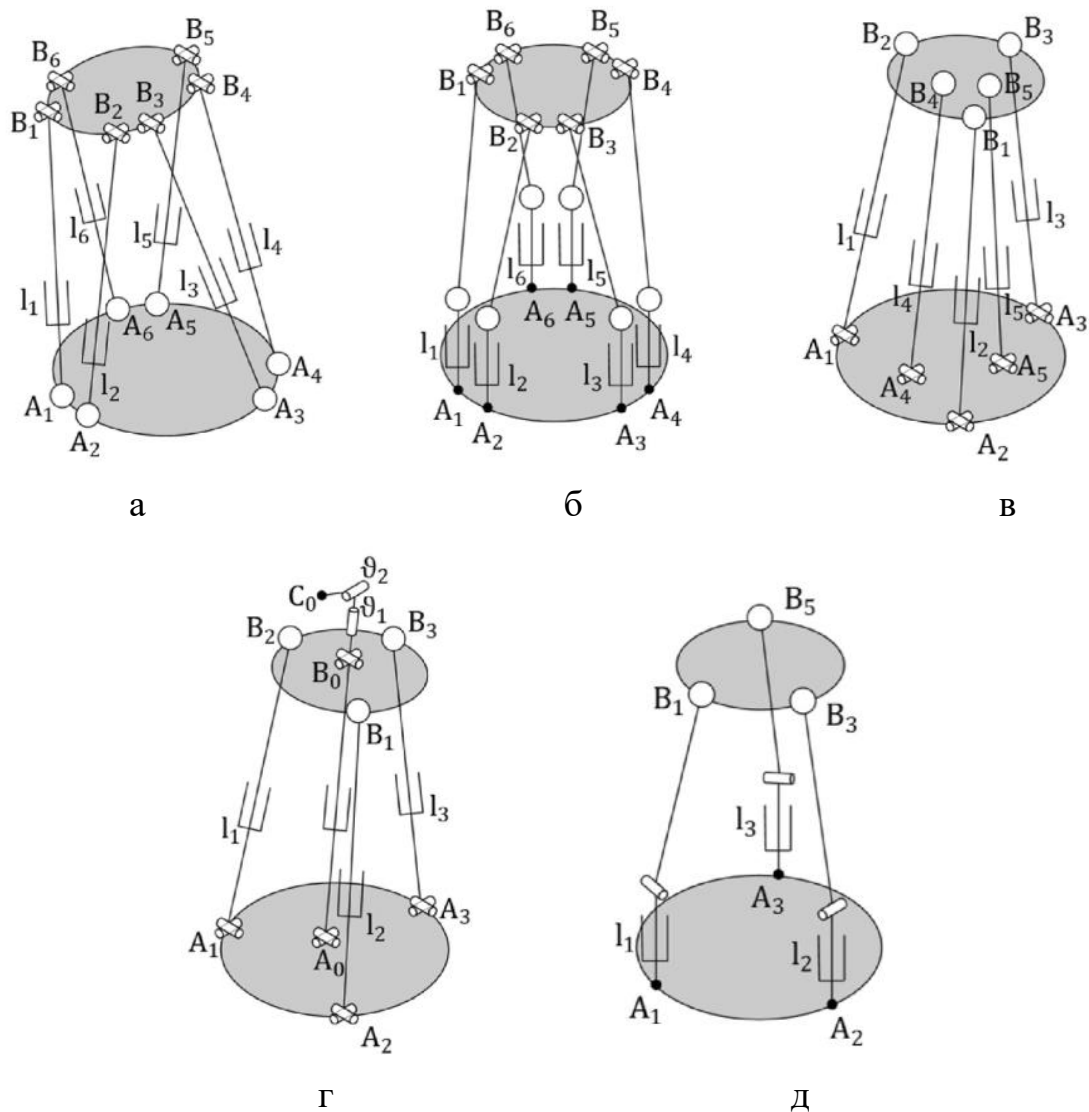


Рис. 1.2. Кінематичні схеми розповсюджених верстатів з паралельною та гібридною компоновками: а) гексапод Гауфа-Стюарта, кожна кінематична ланка якого приводиться в дію рухомим лінійним приводом (змінною величиною l_i); б) структура Hexaglide може бути отримана як варіант гексапода з лінійними напрямними і кінематичними ланками постійної довжини; в) Архітектура Metrom має п'ять активних кінематичних ланок (і 5 координат), аналогічно до Нехарод. г) Трісепт - це гібридний маніпулятор з паралельним механізмом позиціонування і 2-координатною послідовною інструментальною головкою; д) Механізм Sprint є прикладом паралельної інструментальної головки, яка забезпечує орієнтаційний рух інструментальної головки послідовного механізму позиціонування.

Окрім повнопаралельних машин, гібридні структури можуть поєднувати послідовну та паралельну архітектури, щоб збалансувати переваги та недоліки обох. Послідовні верстати зазвичай виграють завдяки великому робочому простору і обмеженій кількості сингулярностей, в той час як паралельні структури забезпечують надійність, жорсткість і точність. Таким чином, комбінація структури з низькою мобільністю і послідовного ланцюга може забезпечити більшість переваг паралельної архітектури без шкоди для робочого простору і динаміки.

Для гібридних верстатів використовуються дві поширені компоувальні схеми:

- Паралельно-послідовні верстати з паралельною кінематикою триподу для позиціонування і послідовним ланцюгом перед виконавчим органом для орієнтації, такі як Tricept (рис. 1.2, г), і його варіанти.
- Послідовно-паралельні верстати з послідовною лінійною направляючою для позиціонування і високоефективний паралельний механізм для орієнтації перед виконавчим органом, як, наприклад, механізм Sprint (рис. 1.2, д).

Ці приклади охоплюють основні паралельні компоновки, що використовуються в механічній обробці.

1.2. Компоновки обладнання з паралельною кінематикою

Завдяки високим характеристикам паралельної кінематики з точки зору точності, жорсткості, компактності, технологічне обладнання з паралельною кінематикою поступово розвиваються, демонструючи відмінні результати не тільки в теорії, але й у промисловому застосуванні. Наведені вище приклади компоновок досягли комерційного успіху: 6-координатні повнопаралельні механізми, 5-координатні повнопаралельні механізми, гібридні механізми з 3-координатним модулем і 2-координатним послідовним виконавчим органом, а

також гібридні механізми з 2-координатною лінійною напрямною і 3-координатною паралельною інструментальною головкою.

1.2.1. Гексаподи

Для обробки криволінійних поверхонь верстат повинен мати щонайменше п'ять ступенів вільності. Таким чином, платформи Стюарта та подібні 6-координатні компоновки повністю задовольняють (і навіть перевищують) цю вимогу до рухомості. Гексаподи (рис. 1.2, а), можуть забезпечити три поступальних і три обертальних ступені вільності, об'єднуючи рух своїх шести активних кінематичних ланок. На додаток до рухомості, їх компоновка має потенціал для досягнення більшої жорсткості і меншого накопичення помилок у порівнянні з традиційними компоновками верстатів. Ці особливості сприяли прийняттю платформи Стюарта як першого в світі верстата з паралельною кінематикою в 1990-х роках.

З того часу платформа Стюарта та подібні механізми, здебільшого отримані шляхом кінематичної інверсії або еквівалентності, здобули успіх в якості технологічного обладнання з паралельною кінематикою. Верстат Variax (рис. 1.3, а) є вертикальним верстатом з паралельною кінематикою, розроблений фірмою Giddings&Lewis і вперше представлений в Ноттінгемському університеті як обладнання для гнучкого виробництва. Компанія Ingersoll розробила вертикальний обробний центр VON-1000 і горизонтальний обробний центр HON-600. Станина цих машин має восьмигранну структуру (рис. 1.3, б), яка має високу жорсткість і замкнуті силові потоки.

Прогрес у сфері технологічного обладнання з паралельною кінематикою на початку 2000-х років надихнув багато дослідницьких інститутів на розробку нових конструкцій. Прикладами можуть бути: верстати мод. 6X, розроблені компанією Mikromat (Німеччина) (рис. 1.3, в) [9, 14]; верстат Hexaglide, розроблений Швейцарським федеральним технологічним

інститутом (ETH) в Цюріху (рис. 1.3, г); верстат VAMT1Y, розроблений університетом Цінхуа та Університет Тяньцзіня (рис. 1.4, а); та робот з паралельною кінематикою на базі гексапода Fanuc F200iB в Манчестерському університеті (рис. 1.4, б).



а



б



в

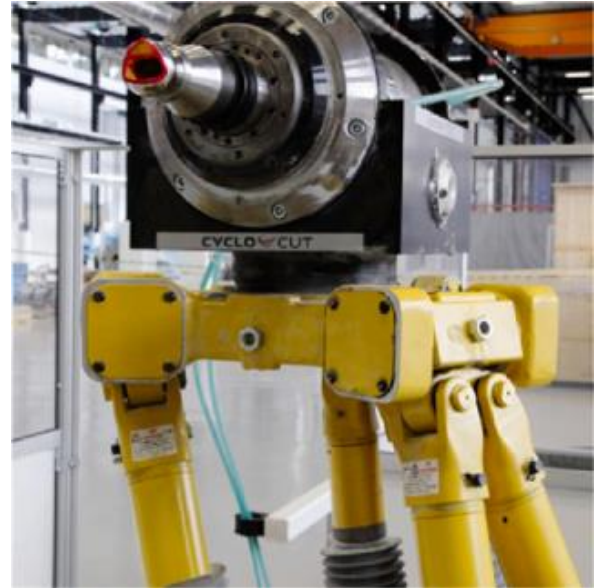


г

Рис. 1.3. Приклади 6-координатних повнопаралельних верстатів: а) вертикальний паралельний верстат Variax; б) горизонтальний обробний центр НОН-600; в) паралельний верстат 6Х; г) Hexaglide



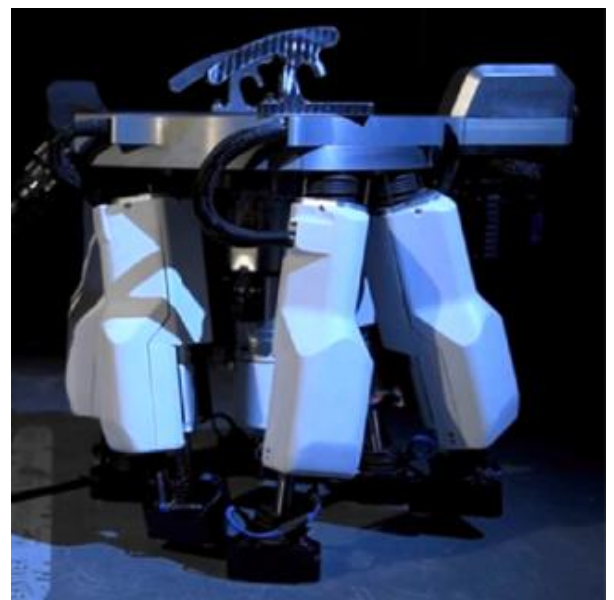
а



б



в



г

Рис. 1.4. Компоновки 6-координатного повнопаралельного технологічного обладнання: а) паралельний верстат VAMT1Y; б) верхня платформа гексапода Fanuc F200iB, пристосована для механічної обробки; в) гексапод FreeHex з можливістю реконфігурації; г) мобільний гексапод WalkingHex.

Подальші варіанти платформи Стюарта були розроблені в Університеті Ноттінгема шляхом розблокування обмежень кінематичних ланок, що

призвело до створення реконфігурованих, портативних і мобільних обробних роботів для ядерної та аерокосмічної промисловості (рис. 1.4, в і г) [9].

Загалом, висока жорсткість 6-координатних повнопаралельних верстатів обумовлюють їх успіх. Однак деякі характеристики їхньої архітектури обмежують їхнє застосування: їх робочий простір, як правило, невеликий порівняно із загальними розмірами верстата, зі значними обмеженнями; оскільки сферичні з'єднання важко спроектувати і виготовити з високою точністю і можливостями корисного навантаження, вони створюють вузьке місце при функціонуванні і перешкоджають високоточному керуванню. Нарешті, 6-координатні повнопаралельні верстати є надлишковими для багатьох задач обробки (оскільки вони вимагають максимум 5 ступенів вільності), збільшуючи складність моделювання, калібрування та контролю без очевидного виграшу.

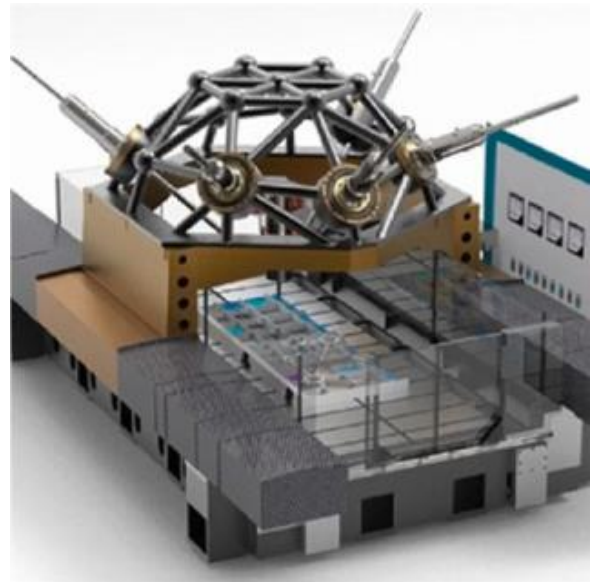
1.2.2. Пентаподи

Архітектури з низькою мобільністю характеризуються більш компактними конструкціями, ніж повнопаралельне 6-координатне технологічне обладнання, завдяки усуненню непотрібної надмірності в структурі. В той же час, вони зберігають потенціал високої динамічної реакції, модульності та мініатюризації повнопаралельних машин, на відміну від альтернативних гібридних рішень.

Характерним прикладом повнопаралельних 5-координатних механізмів є Metrom (рис. 1.5, а) [9]. Завдяки модульній конструкції цей фрезерний верстат може бути переналаштований для забезпечення різноманітних вимог до обробки. Така адаптивність зробила Metrom успішним при фрезеруванні великогабаритних складних конструкційних деталей.



а



б



в



г

Рис. 1.5. Приклади 5-координатних повнопаралельних верстатів: а) Metrom; б) 3D-модель DiaRoM; в) прототип DiaRoM; г) мобільна система CraftsRobot.

Університет Цінхуа розробив інший п'ятикоординатний повнопаралельний верстат, що отримав назву DiaRoM (рис. 1.5, б, в), який характеризується можливістю регулювання орієнтації муфти. Його рушійні

блоки розташовані в електричних кулькових гвинтах, встановлених між станиною і шпинделем, що зменшує інерційність рухомих компонентів і має легку та модульну конструкцію. З робочою зоною $600 \times 600 \times 400$ мм (і вагою близько 800 кг), кутом нахилу інструменту до 30° , кутом повороту навколо осі Х до 110° , точністю позиціонування 0,018 мм, цей верстат може виконувати більш широкий спектр операцій, ніж більшість інших повнопаралельних верстатів. DiaRoM використовується аерокосмічними компаніями для фрезерування ключових конструкційних деталей каркасного типу, таких як кришки, посилені рами та з'єднувальні пластини на заводі Chengdu Aircraft Industrial Corporation. Аналіз показав, що максимальна похибка фрезерування становить 0,068 мм, що значно перевищує вимоги до точності аерокосмічних компонентів.

З метою фрезерування великомасштабних деталей конструкція DiaRoM була інтегрована з автоматизованим керованим транспортним засобом і серійним маніпулятором з високою жорсткістю для отримання високопродуктивного гібридного робота, показаного на рис. 1.5, г. Цей мобільний фрезерний робот, названий CraftsRobot, може автономно переміщати свою основу; має вертикальний хід 1650 мм, робочий простір $300 \times 300 \times 200$ мм (для ваги близько 300 кг), а точність позиціонування до 0,015 мм. Цей верстат демонструє, як паралельна компоновка дозволяє розробляти високоточні системи обробки великогабаритних компонентів. CraftsRobot був успішно застосований у практичному виробництві на Beijing Spacecrafts, фрезерування зварювальної поверхні всієї кабіни великого космічного корабля з високою точністю ($< 0,1$ мм), з кваліфікованими результатами для всіх своїх виробів, включаючи 4 секції колон і 2 конусні секції. Це також дозволяє досягти вищу швидкість і кращу динаміку верстатів з паралельною кінематикою, які фрезерують колону і конусну секцію за 10 годин і 6 годин відповідно, порівняно з 24 годинами і 20 годинами на п'ятикоординатному традиційному верстаті (з послідовною компоновкою).

Цей останній приклад доводить потенціал повнопаралельних верстатів і показує, як паралельні технології поєднуються з послідовними механізмами для виконання завдань, які не під силу окремим структурам, як паралельним, так і послідовним. Навіть за межами екстремальних завдань, пов'язаних з обробкою великомасштабних космічних апаратів, гібридні послідовно-паралельні або паралельно-послідовні верстати можуть забезпечити високопродуктивну обробку, об'єднавши переваги та збалансувавши недоліки, притаманні негібридним аналогам.

1.2.3. Гібридні механізми з триподом і послідовним виконавчим органом

Завдяки поєднанню 4-координатних модулів паралельного позиціонування з 2-координатними послідовними, жорсткість паралельної підсистеми підвищується завдяки значному збільшенню робочого простору за рахунок послідовного механізму.

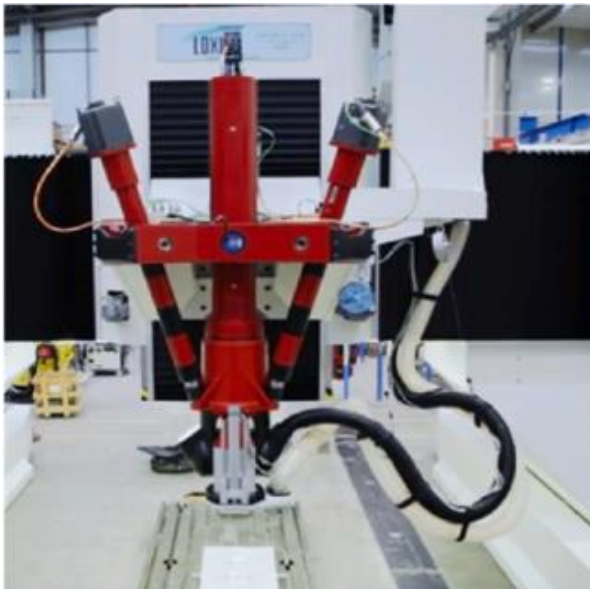
Верстат Tricept, розроблений компанією LOXIN, є одним з перших прикладів цього класу гібридних конструкцій. Як показано на рис. 1.6, а-в, Tricept - це гібридна 5-координатна машина, з 3-а координатами, що забезпечуються механізмом паралельної структури, і 2-а координатами виконавчого органу, виконаного у вигляді послідовного модуля. Як вже було зазначено, механізм паралельної структури Tricept має три активні кінематичні ланки змінної довжини, тоді як додаткова центральна кінематична ланка постійної довжини пасивно обмежує рухому платформу. Ця чотириланкова конструкція поєднує в собі високу жорсткість, завдяки пасивній ланці, і велике співвідношення робочого простору/площі, характерне для активних конструкцій триподів. Крім того, оскільки послідовний ланцюг безпосередньо з'єднаний з пасивною кінцівкою, точного зворотного зв'язку з позиціонування можна легко досягти, встановивши додаткові датчики (енкодери) на її пасивних шарнірах.



а



б



в



г

Рис. 1.6. Приклади гібридних механізмів з 3-координатним модулем позиціонування та 2-координатним послідовним виконавчим органом: а) Tricert; б) робот з Tricert на мобільній базі; в) фрезерний робот з Tricert на порталі; г) Trivariant.

Основне застосування Tricert - виробництво великогабаритних комплексних деталей. З цією метою LOXIN поєднав Tricert з мобільним розсувним модулем (рис. 1.6, б), який був застосований для свердління

панелей літака A350XWB. Завдання фрезерування також були вирішені, як показано на рис. 1.6, в, шляхом встановлення Tricert на серійному порталі з 3-ма опорами для обробки панелей кузова для залізничного транспорту.

Успішними виявилися кілька варіантів механізму Tricert. Варіант TriVariant, розроблений в Університеті Тяньцзіня, спрощує механічну структуру, видаляючи одну з кінематичних ланок змінної довжини (рис. 1.6, г). Таким чином, оригінальна рухливість Tricert зберігається при зменшенні кількості кінематичних ланок, а отже, вартості та складності. TriVariant успадковує переваги продуктивності Tricert, навіть якщо втрачається можливість отримання прямого вимірювання позиції з пасивних датчиків. Інший варіант Tricert, спрямований на зменшення кількості кінематичних ланок, був розроблений в LOXIN (тією ж командою, яка розробила оригінальний Tricert). Цей варіант, який називається Exechon і показаний на рис. 1.7, а, включає новий паралельний модуль і є першим верстатом з паралельною кінематикою з вуглецевого волокна. Встановлення на портативній платформі Xmini дозволяє легко переміщати в різні зони заводу за допомогою стандартного візка або навантажувача, як показано на рис. 1.7, б. Ця особливість дозволяє йому замінити спеціалізовані або великі верстати для виконання різних завдань обробки на різних виробничих ділянках. Однак надмірно напружені з'єднання вимагають суворих геометричних допусків, що суттєво впливає на вартість цього верстата.

З метою полегшення цих суворих вимог до виробництва і збірки, в наступних варіантах Exechon шарніри з низькою рухливістю замінюються на шарніри з високою рухливістю. TriMule, розроблений в Університеті Тяньцзіня (рис. 1.7, в), встановлений на автоматизований керований транспортний засіб (рис. 1.7, г), TriMule був успішно застосований для фрезерування поверхонь кріплення вантажу на великих супутникових конструкціях.



а



б



в



г

Рис. 1.7. Приклади гібридних механізмів: а) Exechon; б) платформа XMobile, виготовлена Exechon XMini на рухомій основі; в) TriMule; г) мобільний обробний робот з TriMule, встановлений на рухомій основі.

Ці приклади показують, як паралельно-послідовні верстати можуть досягти високої ефективності і точності за рахунок єднання окремих приводних блоків, особливо успішно при фрезерних операціях. Тим не менш,

послідовний компонент структури, значно збільшуючи робочий простір, також генерує сингулярні області в межах робочого простору, що знижує ефективність і потенційно залишає небажані сліди інструменту на оброблюваних поверхнях.

1.2.4. Гібридні механізми з лінійною направляючою та паралельним виконавчим органом

Щоб уникнути сингулярності орієнтації паралельно-послідовних, було запропоновано послідовно-паралельну компоновку з лінійною 2-координатною напрямною і паралельною 3-координатною інструментальною головкою. Додавання лінійної напрямної до паралельної інструментальної головки значно збільшує робочий простір системи, зберігаючи при цьому високу точність.

Перший приклад успішної послідовно-паралельної компоновки надала німецька компанія DS-Technologie, яка розробила інструментальну головку з паралельною кінематикою Sprint Z3 (рис. 1.8, а) [9]. Паралельний модуль забезпечує дві обертальні і одну поступальну координати. Комбінуючи цю головку з 2-координатною інструментальною головкою з розсувним порталом був отриманий 5-координатний гібридний обробний центр Ecospeed (рис. 1.8, б). Широко використовувані в авіабудуванні, верстати серії Ecospeed виявилися більш продуктивними, ніж традиційні серійні верстати. Завдяки конструкції на основі лінійних напрямних, послідовний кінематичний ланцюг не порушує високу жорсткість паралельного модуля.



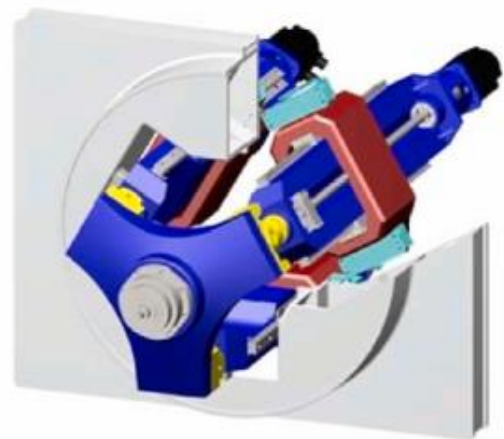
а



б



в



г

Рис. 1.8. Приклади гібридних механізмів з лінійною напрямною і 3-координатною паралельною інструментальною головою: а) паралельна інструментальна головка Sprint Z3; б) обробний центр Ecospeed; в) паралельна інструментальна головка Hermes на обробному центрі Space-5H; г) паралельна інструментальна головка A3

Відмінні результати, отримані паралельною інструментальною головою Sprint Z3, призвели до розробки подібних конструкцій. Іспанська

компанія Fatronik розробила 3-координатну паралельну головку Hermes, яка також призначалася для авіабудування. Потім був розроблений верстатний центр Space-5H шляхом встановлення Hermes на розсувному порталі висотою 2 м (рис. 1.8, в). Університет Тяньцзіня розробив паралельну інструментальну головку A3, засновану на конструкції Sprint (рис. 1.8, г).

Отже, гібридні верстати з лінійною 2-координатною прямою і паралельним 3-координатним виконавчим органом виявилися критично важливими для розвитку конструкцій верстатів з паралельною кінематикою. Усуваючи особливості орієнтації паралельно-послідовних верстатів, послідовно-паралельні механізми характеризуються здатністю працювати швидко і плавно, з високою ефективністю і точністю. Однак рух позиціонування цих верстатів забезпечується напрямними, які через свою конструкцію не можуть зменшити. Таким чином, послідовно-паралельні верстати є громіздкими і важкими, втрачаючи портативність і компактність своїх паралельно-послідовних аналогів. Хоча ці конструкції успішно застосовуються в реальних умовах, обмеження в розмірах роблять їх непридатними для виробництва великогабаритних складних деталей.

1.3. Використання обладнання з паралельною кінематикою

Традиційні послідовні верстати використовують багату літературу, методики та програмне забезпечення, розроблені протягом десятиліть. Оскільки їх кінематичні моделі є «модульними» і можуть бути автоматично згенеровані шляхом складання матриць трансформації для кожної ланки, ці конструкції легко адаптуються до будь-якого завдання з обмеженими технічними зусиллями; їх конструкції також легко масштабуються, незважаючи на низьку жорсткість внаслідок консольної компоновки кінематичних ланок. З іншого боку, паралельні верстати вимагають спеціальних, складних кінематичних моделей, які варіюються від конструкції

до конструкції. Таким чином, витрати на розробку паралельних верстатів зазвичай вищі, ніж у звичайних верстатів. Крім того, їх масштабованість обмежена малим співвідношенням робочого простору до об'єму верстата. Ці фактори не дозволяють паралельним верстатам виступати в ролі «універсальних» технологій, які можна легко адаптувати до широкого спектру застосувань. Дослідження паралельних верстатів лежать на перетині верстатобудування, робототехніки та теорії машин і механізмів. Таким чином, розвиток цих технологій ґрунтується на методах і моделях робототехніки, але вимагає глибокого розуміння верстатів для успішного перенесення у виробничий контекст.

В цілому, основні переваги паралельних можна окреслити наступним чином:

- **Жорсткість:** Замкнута архітектура паралельних верстатів робить їх жорсткішими, ніж їх послідовні аналоги. В послідовних маніпуляторах кожне з'єднання несе корисне навантаження на кінцевий виконавчий орган на додачу до ваги кожної наступної ланки, що посилюється дедалі більше, вимагає потужніших приводів і призводить до дедалі більших переміщень під навантаженням. Обладнання з паралельною кінематикою, натомість, розподіляє корисне навантаження між ланками: в гіршому випадку одна ланка повинна врівноважити все навантаження, поки інша не активна, тоді як в кращому випадку корисне навантаження розподіляється порівну між усіма кінематичними ланками. Така конфігурація призводить до значно менших зусиль і крутних моментів і малих або навіть незначних переміщень.

- **Динаміка:** Більшість верстатів з паралельною кінематикою характеризуються активною динамікою. Двигуни встановлюються або на нерухомій основі, або поблизу неї, що обмежує діапазон їх переміщення. Оскільки двигуни зазвичай становлять значну частину загальної маси маніпулятора, така конфігурація призводить до меншої рухомої маси і легкої платформи виконавчого органу. Такий розподіл маси забезпечує хороші інерційні характеристики, що дозволяє паралельним верстатам працювати на

високих швидкостях і зменшує енергоспоживання, вібрації та інші динамічні проблеми.

- **Кінематика:** Зворотна задача кінематики паралельного верстата може бути сформульована аналітично і розв'язана в замкненій формі (тоді як для прямої кінематики зазвичай потрібен чисельний розв'язок). Оскільки керування рухом і планування траєкторії покладаються на зворотну кінематику, це робить керування паралельними маніпуляторами в рази ефективнішим і швидшим, ніж керування послідовними маніпуляторами.

І навпаки, основними недоліками паралельних верстатів є:

- **Робочий простір:** Паралельні архітектури характеризуються робочим простором, який є перетином робочих просторів кожної їхньої ланки. У послідовних маніпуляторах кожна ланка підсилює робочу область попередньої. Таким чином, робочий простір паралельних структур значно менший, ніж у послідовних маніпуляторів. Сингулярні конфігурації (тобто ті точки, де рух маніпулятора неможливо повністю контролювати) зазвичай знаходяться на краю робочого простору послідовного маніпулятора, в той час як кілька сингулярних областей можна знайти в робочому просторі паралельних маніпуляторів, що ще більше ускладнює керування ними та зменшує їх робочий простір.

- **Проектування:** Паралельні архітектури вимагають не тільки певної кількості активних з'єднань, що мають рівні ступені свободи, але й велику кількість пасивних з'єднань, що призводить до структурних обмежень, які обмежують рухові можливості, а також до більш жорстких допусків, вищих витрат, складнішого монтажу та більших втрат на тертя.

- **Моделювання:** Кінематичні моделі для послідовних маніпуляторів можуть бути побудовані, визначаючи кожен нову ланку за допомогою матриці перетворення та множення цієї матриці на попередні. З іншого боку, кожен паралельний маніпулятор вимагає спеціальної кінематичної моделі, що призводить до більших зусиль при запуску, а також обмежених програмних бібліотек, доступних для кожної паралельної конструкції (тоді як різні

послідовні конструкції можуть легко скористатися програмним забезпеченням і алгоритмами одна одної). Це обмеження не поширюється на динамічні моделі та програмне чи апаратне забезпечення для керування: якщо відома кінематика системи, послідовні та паралельні маніпулятори мають багато методів, моделей і прийомів керування та планування траєкторії.

З описаних раніше прикладів видно, що роль паралельних маніпуляторів як верстатів зосереджена на високоточній 5-координатній обробці. Простіші завдання обробки (наприклад, по трьох координатах) вже можуть бути виконані дешевшими і простішими послідовними структурами з достатньою якістю. Однак продуктивність послідовної архітектури лінійно зменшується зі збільшенням кількості ступенів свободи, і 5-осьова обробка - це, мабуть, та сфера, де висока точність і продуктивність паралельних архітектур стає очевидною (і, потенційно, вартою додаткових витрат). На додаток до загальної 5-осьової обробки, паралельні верстати чудово зарекомендували себе в операціях на виробництві дорогих об'єктів, таких як космічні апарати, літаки та об'єкти критичної енергетичної інфраструктури, де є великогабаритні деталі, обробка яких вимагає мобільної бази, а не настільного або стаціонарного інструменту. У цих випадках обмежений робочий простір паралельного верстата долається за рахунок мобільності його основи без шкоди для жорсткості та динаміки.

Загалом, верстати з паралельною кінематикою будуть успішними в рішенні окремих нишевих задач, де можна скористатись їх перевагами (жорсткість, динаміка, повторюваність), обмежуючи їх недоліки (в основному, малий робочий простір) шляхом ретельного проектування операцій або за допомогою гібридних архітектур. Додаткова складність паралельної архітектури виправдовується їх вищою продуктивністю. Таким чином, паралельні верстати не слід розглядати як конкурентів традиційних послідовних верстатів, оскільки це різні технології з різними цілями: послідовні структури забезпечують адаптовану платформу з великим робочим простором за доступною ціною, таким чином, будучи кращою універсальною

технологією з двох; натомість, паралельні верстати слід визнати спеціалізованими інструментами, які забезпечують вищу продуктивність в складних виробничих задачах.

1.4. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є розширенні функціональних можливостей багатокоординатного столу з паралельною кінематикою.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- аналіз існуючих схем побудови обладнання з паралельною кінематикою та пошук шляхів збільшення коефіцієнта використання робочого простору;
- постановка і розв'язок зворотної задач кінематики для запропонованої компоновки столу і визначення кінематичних залежностей;
- виконання моделювання робочого простору столу з круговою напрямною.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

2.1. Конструкція та принцип дії компоновки столу з круговою напрямною

Однією з особливостей технологічного обладнання з паралельною кінематикою є невеликий робочий простір. Його форма і розміри можуть змінюватись при зміні положення виконавчого органу. Приклад формування робочого простору гексапода наведено на рис. 2.1, 2.2.

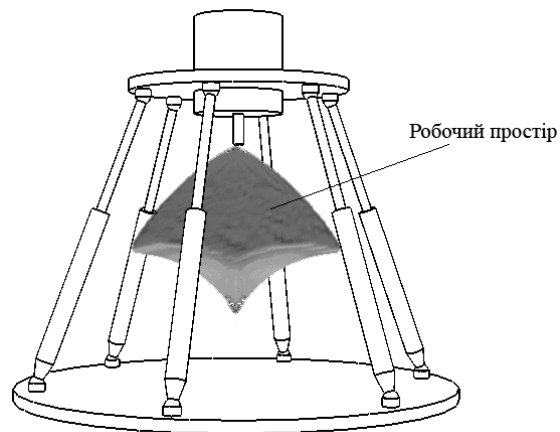


Рис. 2.1. Робочий простір гексапода

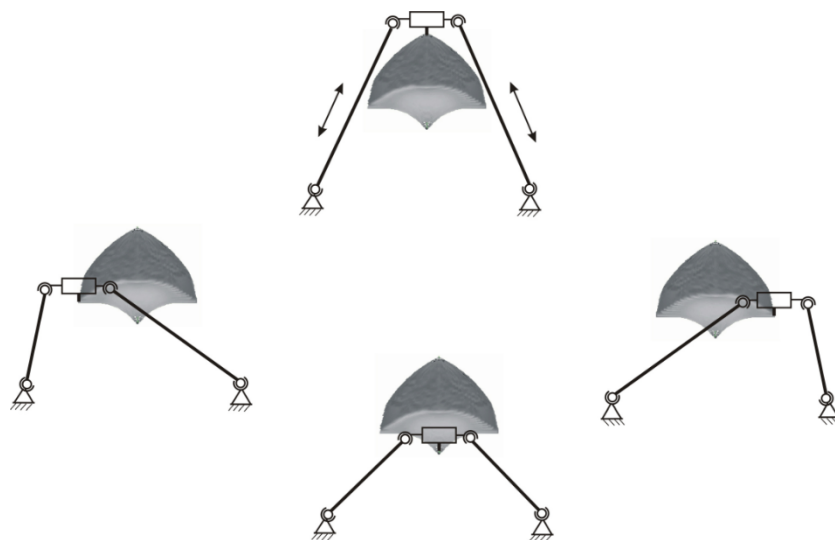


Рис. 2.2. Формування робочого простору гексапода

Зміна кута нахилу робочого органу також впливає на форму, розміри і положення робочого простору (рис. 2.3).

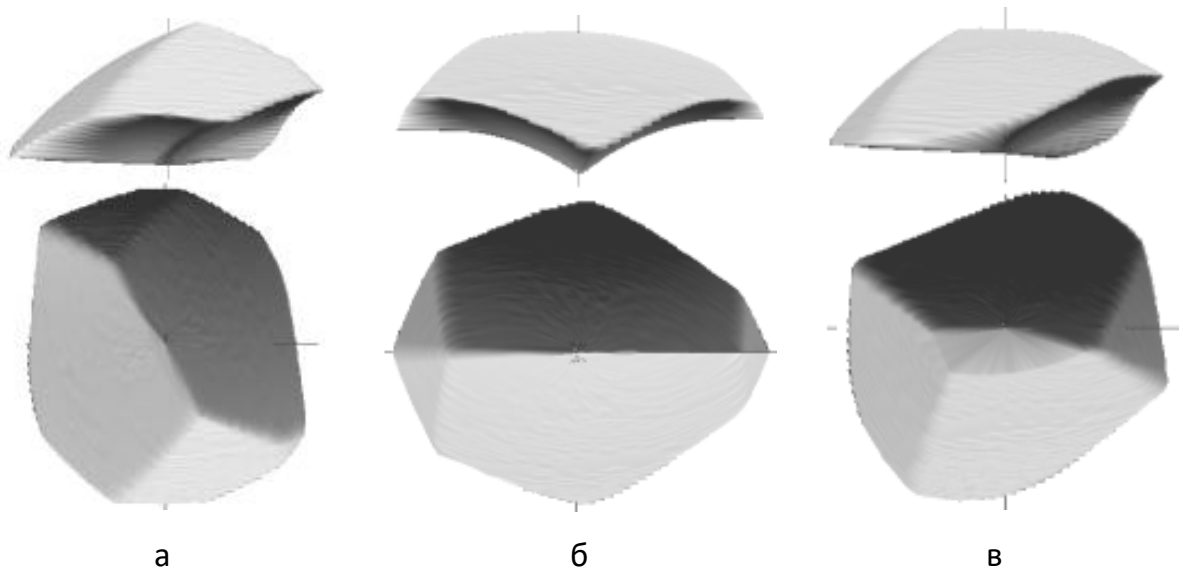


Рис. 2.3. Робочий простір гексапода:

а) при $\theta=20^\circ$; б) при $\varphi=20^\circ$; в) при $\theta=20^\circ$ та $\varphi=20^\circ$

Також в межах робочого простору існують так звані «особливі» положення (або їх ще називають «точки сингулярності») [8, 9], тобто положення, в яких механізм втрачає свої ступені вільності і стає некерованим. Для виведення механізму з «особливого» положення треба застосовувати додаткові кінематичні ланки (якщо вони передбачені конструкцією механізму).

Одним з варіантів покращення функціональних можливостей обладнання з паралельною кінематикою може бути застосування кругових напрямних для забезпечення повного оберту виконавчого органу відносно вертикальної осі. Звичайні компоновки гексаподів не забезпечують таку можливість внаслідок конструктивних обмежень кінематичних ланок і необхідності уникнень «особливих» положень робочого органу.

Запропонований механізм паралельної структури (рис. 2.4) складається з рухомої платформи 1 (з встановленим на ній виконавчим органом) та нерухомої стаціонарної основи 2, на якій розміщені кругові напрямні 5. Рухома платформа зв'язана з нерухомою за допомогою шести кінематичних

ланок змінної довжини 3. Один кінець кожної кінематичної ланки шарнірно з'єднаний з рухомою платформою. А інший кінець шарнірно пов'язаний з повзуном 4, який може рухатись вздовж кругової напрямної 5.

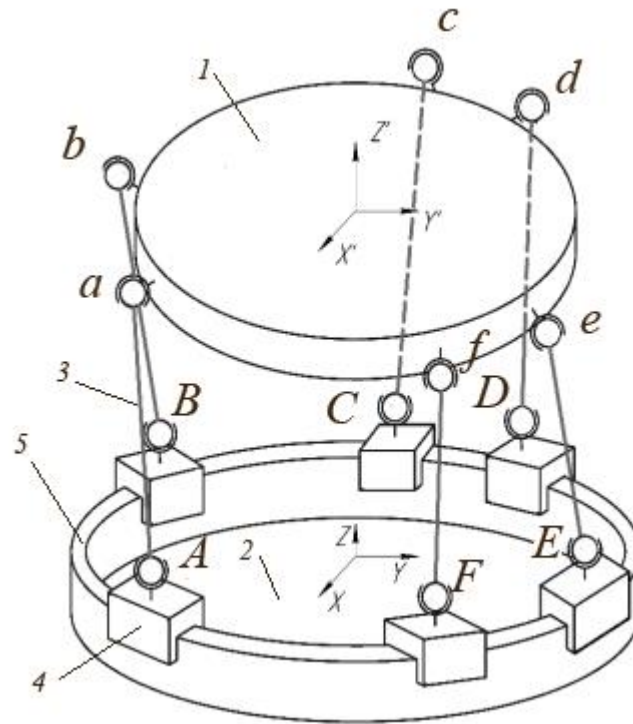


Рис. 2.4. Компоновка столу з додатковими напрямними

Рух виконавчого органу відбувається при одночасному узгодженому переміщенні повзунів 4 вздовж напрямної 5 та зміні довжин кінематичних ланок.

2.2. Просторові функціональні залежності компоновки столу

Для вирішення задачі керування столом з паралельною кінематикою необхідно вирішити зворотну задачу кінематики шестикоординатних просторових механізмів [3, 5, 9], яка полягає у визначенні залежності між заданими координатами точки інструмента і положенням повзунів кінематичних ланок на круговій напрямній.

Введемо позначення (рис. 2.5):

$(x, y, z)_H$ – нерухома система координат, яка пов'язана з круговою напрямною;

$A(x_{A(H)}, y_{A(H)}, z_{A(H)}), B(x_{B(H)}, y_{B(H)}, z_{B(H)}), \dots, F(x_{F(H)}, y_{F(H)}, z_{F(H)})$ – координати повзунів на круговій напрямній, які задані у нерухомій системі координат $(x, y, z)_H$;

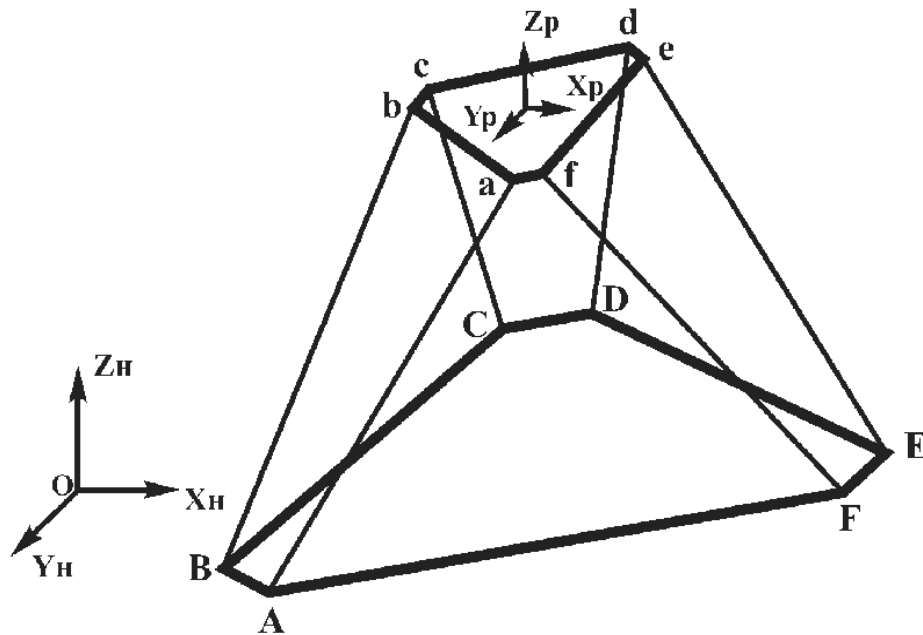


Рис. 2.5. Схема гексапода

$(x, y, z)_P$ – рухома система координат, яка пов'язана з рухомою платформою (виконавчим органом);

$a(x_{a(P)}, y_{a(P)}, z_{a(P)}), b(x_{b(P)}, y_{b(P)}, z_{b(P)}), \dots, f(x_{f(P)}, y_{f(P)}, z_{f(P)})$ – координати точок з'єднань кінематичних ланок постійної довжини з рухомою платформою, у рухомій системі координат $(x, y, z)_P$.

Для визначення координат повзунів запишемо систему рівнянь, яка визначає точку перетину кругової напрямної з кінематичною ланкою (рис. 2.6):

$$\begin{cases} (x_H - x_{A(H)})^2 + (y_H - y_{A(H)})^2 = R^2 \\ (x_{a(H)} - x_{A(H)})^2 + (y_{a(H)} - y_{A(H)})^2 + (z_{a(H)} - z_H)^2 = l_{Aa}^2 \end{cases} \quad (2.1)$$

Прийmemo, що центр кругової напрямної буде співпадати з початком координат нерухомої системи, тобто $x_H=0$, $y_H=0$ і $z_H=0$, то рівняння можна ще спростити:

$$\begin{cases} x_{A(H)}^2 + y_{A(H)}^2 = R^2 \\ (x_{a(H)} - x_{A(H)})^2 + (y_{a(H)} - y_{A(H)})^2 + z_{a(H)}^2 = l_{Aa}^2 \end{cases} \quad (2.2)$$

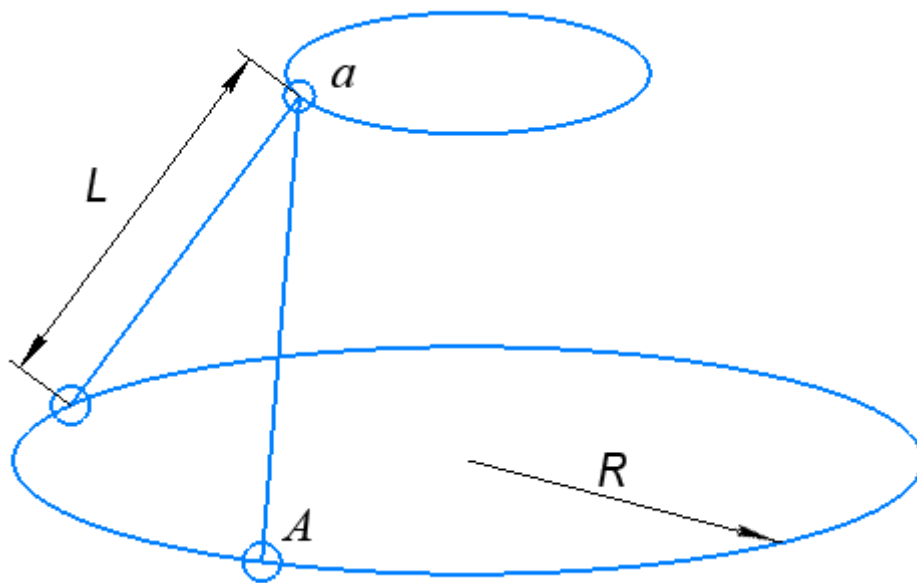


Рис. 2.6. Розрахункова схема для визначення положення повзуна на круговій напрямній

Віднімемо перше рівняння з другого

$$(x_{a(H)} - x_{A(H)})^2 + (y_{a(H)} - y_{A(H)})^2 + z_{a(H)}^2 - x_{A(H)}^2 - y_{A(H)}^2 = l_{Aa}^2 - R^2$$

і розкриємо скобки

$$x_{a(H)}^2 - 2x_{a(H)}x_{A(H)} + x_{A(H)}^2 + y_{a(H)}^2 - 2y_{a(H)}y_{A(H)} + y_{A(H)}^2 + z_{a(H)}^2 - x_{A(H)}^2 - y_{A(H)}^2 = l_{Aa}^2 - R^2$$

$$x_{a(H)}^2 - 2x_{a(H)}x_{A(H)} + y_{a(H)}^2 - 2y_{a(H)}y_{A(H)} + z_{a(H)}^2 = l_{Aa}^2 - R^2$$

Визначимо $x_{A(H)}$:

$$x_{A(H)} = \frac{x_{a(H)}^2 + y_{a(H)}^2 + z_{a(H)}^2 - l_{Aa}^2 + R^2}{2x_{a(H)}} - \frac{2y_{a(H)}y_{A(H)}}{2x_{a(H)}}$$

або

$$x_{A(H)} = m - ny_{A(H)}$$

де:

$$m = \frac{x_{a(H)}^2 + y_{a(H)}^2 + z_{a(H)}^2 - l_{Aa}^2 + R^2}{2x_{a(H)}}$$

$$n = \frac{y_{a(H)}}{x_{a(H)}}$$

Підставивши $x_{A(H)}$ в перше рівняння системи (2.2), отримаємо:

$$(m - ny_{A(H)})^2 + y_{A(H)}^2 = R^2$$

Після спрощення рівняння і групування складових отримаємо квадратне рівняння вигляду

$$(n^2 + 1)y_{A(H)}^2 - 2ny_{A(H)} - R^2 + m^2 = 0$$

Визначимо корені рівняння:

$$y_{A(H)1} = \frac{2n + \sqrt{4n^2 - 4(m^2 - R^2)}}{2(n^2 + 1)} = \frac{n + \sqrt{n^2 - m^2 + R^2}}{n^2 + 1}$$

$$y_{A(n)2} = \frac{n - \sqrt{n^2 - m^2 + R^2}}{n^2 + 1}$$

Для визначення координат точок $a_{(p)}-f_{(p)}$ рухомої платформи в нерухомій системі координат ($a_{(n)}-f_{(n)}$) запишемо рівняння переводу координат з однієї системи в іншу. За початок рухомої системи координат приймаємо точку інструменту, рух якої задається (рис. 2.7).

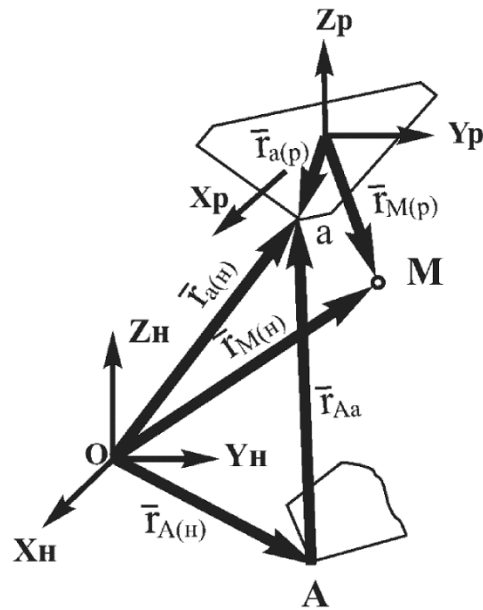


Рис. 2.7. Розрахункова схема

Перехід з однієї просторової системи в іншу запишемо у векторній формі у розгорнутому вигляді:

$$\vec{r}_n = M_x M_y M_z \vec{r}_p + \vec{r}_p'', \quad (2.3)$$

де $\vec{r}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}$ – радіус-вектор, що визначає положення точки в нерухомій

системі координат;

$\vec{r}_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix}$ – радіус-вектор, що визначає положення цієї точки в рухомій

системі координат;

$$\vec{r}_p^H = \begin{bmatrix} x_p^H \\ y_p^H \\ z_p^H \end{bmatrix} - \text{радіус-вектор, що визначає положення початку координат}$$

рухомої системи у нерухомій;

M_x, M_y, M_z – матриці послідовних поворотів навколо осей x, y та z відповідно на кути Ейлера $\theta_p^H, \varphi_p^H, \psi_p^H$.

$$M_x = \begin{bmatrix} \cos \varphi_p^H & -\sin \varphi_p^H & 0 \\ \sin \varphi_p^H & \cos \varphi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p^H & -\sin \theta_p^H \\ 0 & \sin \theta_p^H & \cos \theta_p^H \end{bmatrix},$$

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos \psi_p^H & -\sin \psi_p^H & 0 \\ \sin \psi_p^H & \cos \psi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Загальна матриця поворотів буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} M_x M_y M_z &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_p^H & -\sin \varphi_p^H & 0 \\ \sin \varphi_p^H & \cos \varphi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p^H & -\sin \theta_p^H \\ 0 & \sin \theta_p^H & \cos \theta_p^H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi_p^H & -\sin \psi_p^H & 0 \\ \sin \psi_p^H & \cos \psi_p^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \sin \varphi_p^H \\ \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H + & \cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - & -\sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \\ + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & -\sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \\ \sin \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H - & \sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - & \cos \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \\ -\cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & -\cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Так як координати (x_p^H, y_p^H, z_p^H) центру рухомої системи в нерухомій співпадають з координатами точки M , заданої у нерухомій системі координат ($\bar{r}_p^H = \bar{r}_{M(H)}$), то формула переходу з рухомої системи координат у нерухому можемо записати у вигляді

$$\bar{r}_H = M\bar{r}_p + \bar{r}_{M(H)}$$

Запишемо рівняння для визначення координати точки a в нерухомій системі координат:

$$\bar{r}_{a(H)} = M \cdot \bar{r}_{a(p)} + \bar{r}_{M(H)}$$

Підставивши координати векторів у рівняння (2.4), отримаємо

$$\bar{r}_{a(H)} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \sin \varphi_p^H \\ \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H + & \cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - & -\sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \\ + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & -\sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \\ \sin \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H - & \sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - & \\ -\cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H & -\cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H & \cos \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{a(p)} \\ y_{a(p)} \\ z_{a(p)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{M(H)} \\ y_{M(H)} \\ z_{M(H)} \end{bmatrix}$$

Таким чином, координати шарнірів кінематичних ланок, що знаходяться на рухомій платформі, в нерухомій системі координат можна розрахувати за формулами:

Точка a

$$x_{a(H)} = x_{a(p)} \cdot \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H + y_{a(p)} \cdot \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H + z_{a(p)} \cdot \sin \varphi_p^H + x_{M(H)};$$

$$y_{a(H)} = x_{a(p)} \cdot (\cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) + \\ + y_{a(p)} \cdot (\cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) - z_{a(p)} \cdot \sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H + y_{M(H)};$$

$$z_{a(h)} = x_{a(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{a(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) + z_{a(p)} \cdot \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + z_{M(h)}.$$

Точка b

$$x_{b(h)} = x_{b(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h + y_{b(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + z_{b(p)} \cdot \sin \varphi_p^h + x_{M(h)};$$

$$y_{b(h)} = x_{b(p)} \cdot (\cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{b(p)} \cdot (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) - z_{b(p)} \cdot \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + y_{M(h)};$$

$$z_{b(h)} = x_{b(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{b(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) + z_{b(p)} \cdot \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + z_{M(h)}.$$

Точка c

$$x_{c(h)} = x_{c(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h + y_{c(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + z_{c(p)} \cdot \sin \varphi_p^h + x_{M(h)};$$

$$y_{c(h)} = x_{c(p)} \cdot (\cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{c(p)} \cdot (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) - z_{c(p)} \cdot \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + y_{M(h)};$$

$$z_{c(h)} = x_{c(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{c(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) + z_{c(p)} \cdot \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + z_{M(h)}.$$

Точка d

$$x_{d(h)} = x_{d(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h + y_{d(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + z_{d(p)} \cdot \sin \varphi_p^h + x_{M(h)};$$

$$y_{d(h)} = x_{d(p)} \cdot (\cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{d(p)} \cdot (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) - z_{d(p)} \cdot \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + y_{M(h)};$$

$$z_{d(h)} = x_{d(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{d(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) + z_{d(p)} \cdot \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + z_{M(h)}.$$

Точка *e*

$$x_{e(h)} = x_{e(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h + y_{e(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + z_{e(p)} \cdot \sin \varphi_p^h + x_{M(h)};$$

$$y_{e(h)} = x_{e(p)} \cdot (\cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{e(p)} \cdot (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) - z_{e(p)} \cdot \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + y_{M(h)};$$

$$z_{e(h)} = x_{e(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{e(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) + z_{e(p)} \cdot \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + z_{M(h)}.$$

Точка *f*

$$x_{f(h)} = x_{f(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h + y_{f(p)} \cdot \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + z_{f(p)} \cdot \sin \varphi_p^h + x_{M(h)};$$

$$y_{f(h)} = x_{f(p)} \cdot (\cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{f(p)} \cdot (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) - z_{f(p)} \cdot \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + y_{M(h)};$$

$$z_{f(h)} = x_{f(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) + \\ + y_{f(p)} \cdot (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) + z_{f(p)} \cdot \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h + z_{M(h)}.$$

Кожне положення повзуна на круговій напрямній можна задати кутом φ (рис. 2.8). Знаючи координати положення повзуна, можна записати

$$\varphi_A = \arccos \frac{x_{A(h)}}{R} = \arcsin \frac{y_{A(h)}}{R}$$

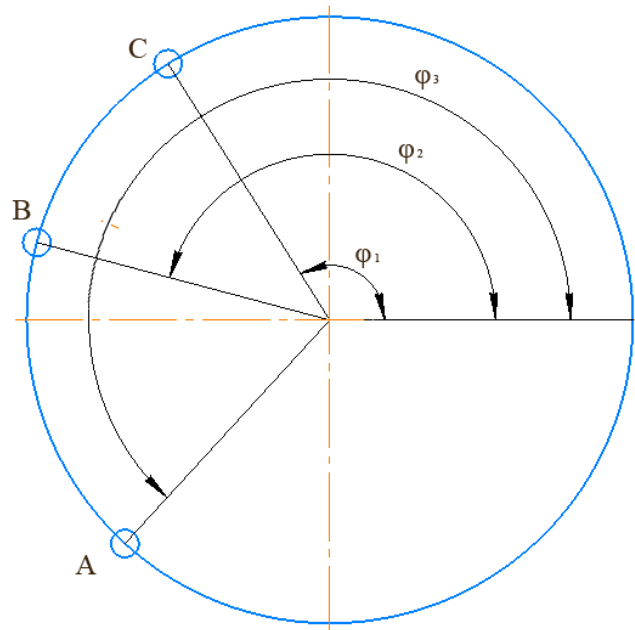
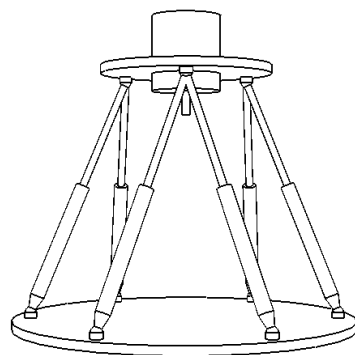
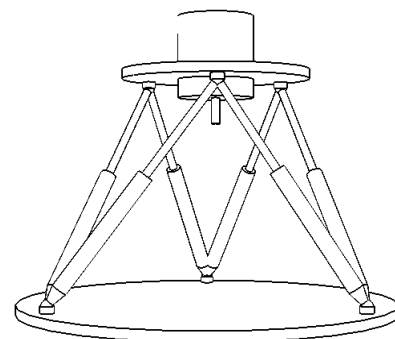


Рис. 2.8. Положення повзунів на круговій напрямній

Для забезпечення руху виконавчого органу по заданій траєкторії необхідно забезпечити, щоб повзуни при переміщенні не перетинались між собою. Також повзуни не повинні «скупчуватись» в одному місці, що може призвести до виникнення «особливого» положення, коли механізм буде некерованим. Найпростіший спосіб забезпечення цих умов – основні рухи виконавчого органу здійснювати за допомогою зміни довжини кінематичних ланок. А рух повзунів вздовж напрямної використовувати для оперативної зміни загальної компоновки гексапода (рис. 2.9).



$$N \times S = 6 \times 3$$



$$N \times S = 3 \times 3$$

Рис. 2.9. Компоновочні схеми гексаподів

Таким чином, для забезпечення руху заданої точки виконавчого органу треба визначити довжини кінематичних ланок для кожної точки заданої траєкторії. Так, довжина ланки Аа – це відстань між точками $A_{(H)}$ і $a_{(H)}$. Можемо записати:

$$l_{Aa} = \sqrt{x_{Aa}^2 + y_{Aa}^2 + z_{Aa}^2},$$

де:

$$x_{Aa} = x_{A(H)} - x_{M(H)} - \cos\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) + \\ + \cos\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) - \sin\phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)});$$

$$y_{Aa} = y_{A(H)} - y_{M(H)} - (\cos\theta_p^H \cdot \sin\psi_p^H + \sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H) \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\cos\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - \sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H) \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) + \sin\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)});$$

$$z_{Aa} = z_{A(H)} - z_{M(H)} - (\sin\theta_p^H \cdot \sin\psi_p^H + \cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H) \cdot (x_{a(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - \cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H) \cdot (y_{a(p)} - y_{M(p)}) + \cos\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \cdot (z_{a(p)} - z_{M(p)}).$$

Довжини інших кінематичних ланок визначаються аналогічно.

Довжина кінематичної ланки Bb

$$l_{Bb} = \sqrt{x_{Bb}^2 + y_{Bb}^2 + z_{Bb}^2},$$

$$\text{де } x_{Bb} = x_{B(H)} - x_{M(H)} - \cos\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H \cdot (x_{b(p)} - x_{M(p)}) +$$

$$+ \cos\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H \cdot (y_{b(p)} - y_{M(p)}) - \sin\phi_p^H \cdot (z_{b(p)} - z_{M(p)});$$

$$y_{Bb} = y_{B(H)} - y_{M(H)} - (\cos\theta_p^H \cdot \sin\psi_p^H + \sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H) \cdot (x_{b(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\cos\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - \sin\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H) \cdot (y_{b(p)} - y_{M(p)}) + \sin\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \cdot (z_{b(p)} - z_{M(p)});$$

$$z_{Bb} = z_{B(H)} - z_{M(H)} - (\sin\theta_p^H \cdot \sin\psi_p^H + \cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \cos\psi_p^H) \cdot (x_{b(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin\theta_p^H \cdot \cos\psi_p^H - \cos\theta_p^H \cdot \sin\phi_p^H \cdot \sin\psi_p^H) \cdot (y_{b(p)} - y_{M(p)}) + \cos\theta_p^H \cdot \cos\phi_p^H \cdot (z_{b(p)} - z_{M(p)}).$$

Довжина кінематичної ланки Cc

$$l_{Cc} = \sqrt{x_{Cc}^2 + y_{Cc}^2 + z_{Cc}^2},$$

$$\begin{aligned} \text{де } x_{Cc} &= x_{C(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H \cdot (x_{c(p)} - x_{M(p)}) + \\ &+ \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H \cdot (y_{c(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^H \cdot (z_{c(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{Cc} &= y_{C(n)} - y_{M(n)} - (\cos \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) \cdot (x_{c(p)} - x_{M(p)}) - \\ &- (\cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) \cdot (y_{c(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \cdot (z_{c(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{Cc} &= z_{C(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) \cdot (x_{c(p)} - x_{M(p)}) - \\ &- (\sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) \cdot (y_{c(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \cdot (z_{c(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

Довжина кінематичної ланки Dd

$$l_{Dd} = \sqrt{x_{Dd}^2 + y_{Dd}^2 + z_{Dd}^2},$$

$$\begin{aligned} \text{де } x_{Dd} &= x_{D(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H \cdot (x_{d(p)} - x_{M(p)}) + \\ &+ \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H \cdot (y_{d(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^H \cdot (z_{d(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{Dd} &= y_{D(n)} - y_{M(n)} - (\cos \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) \cdot (x_{d(p)} - x_{M(p)}) - \\ &- (\cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) \cdot (y_{d(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \cdot (z_{d(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{Dd} &= z_{D(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) \cdot (x_{d(p)} - x_{M(p)}) - \\ &- (\sin \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \cos \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) \cdot (y_{d(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \cdot (z_{d(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

Довжина кінематичної ланки Ee

$$l_{Ee} = \sqrt{x_{Ee}^2 + y_{Ee}^2 + z_{Ee}^2},$$

$$\begin{aligned} \text{де } x_{Ee} &= x_{E(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H \cdot (x_{e(p)} - x_{M(p)}) + \\ &+ \cos \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H \cdot (y_{e(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^H \cdot (z_{e(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{Ee} &= y_{E(n)} - y_{M(n)} - (\cos \theta_p^H \cdot \sin \psi_p^H + \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \cos \psi_p^H) \cdot (x_{e(p)} - x_{M(p)}) - \\ &- (\cos \theta_p^H \cdot \cos \psi_p^H - \sin \theta_p^H \cdot \sin \varphi_p^H \cdot \sin \psi_p^H) \cdot (y_{e(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p^H \cdot \cos \varphi_p^H \cdot (z_{e(p)} - z_{M(p)}); \end{aligned}$$

$$z_{Ee} = z_{E(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{e(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{e(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{e(p)} - z_{M(p)}).$$

Довжина кінематичної ланки Ff

$$l_{Ff} = \sqrt{x_{Ff}^2 + y_{Ff}^2 + z_{Ff}^2},$$

$$\text{де } x_{Ff} = x_{F(n)} - x_{M(n)} - \cos \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h \cdot (x_{f(p)} - x_{M(p)}) + \\ + \cos \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h \cdot (y_{f(p)} - y_{M(p)}) - \sin \varphi_p^h \cdot (z_{f(p)} - z_{M(p)});$$

$$y_{Ff} = y_{F(n)} - y_{M(n)} - (\cos \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{f(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\cos \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \sin \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{f(p)} - y_{M(p)}) + \sin \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{f(p)} - z_{M(p)});$$

$$z_{Ff} = z_{F(n)} - z_{M(n)} - (\sin \theta_p^h \cdot \sin \psi_p^h + \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \cos \psi_p^h) \cdot (x_{f(p)} - x_{M(p)}) - \\ - (\sin \theta_p^h \cdot \cos \psi_p^h - \cos \theta_p^h \cdot \sin \varphi_p^h \cdot \sin \psi_p^h) \cdot (y_{f(p)} - y_{M(p)}) + \cos \theta_p^h \cdot \cos \varphi_p^h \cdot (z_{f(p)} - z_{M(p)}).$$

Отримані залежності можуть бути використані при проектуванні системи керування обладнанням з паралельною кінематикою.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ

БАГАТОКООРДИНАТНОГО СТОЛУ

3.1. Вплив компоновочної схеми на робочий простір

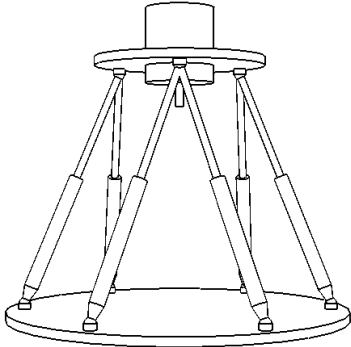
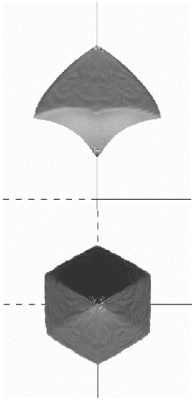
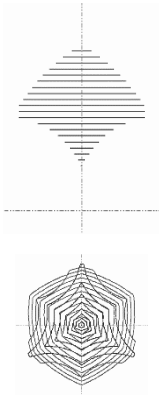
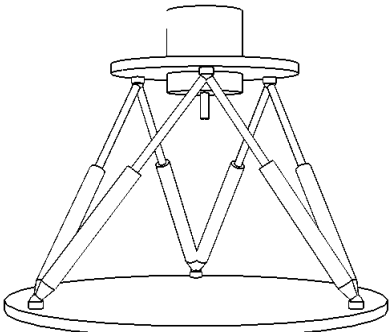
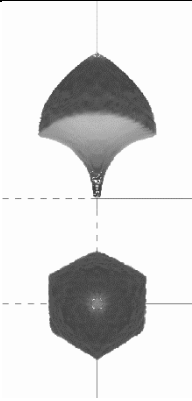
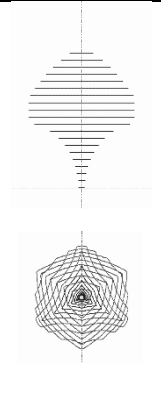
Компоновочна схема багатокоординатного столу визначається кількістю шарнірів кінематичних ланок, змонтованих на повзунах та виконавчому органі, що визначається структурою компоновки $N \times S$ (табл. 3.1). Завдяки круговій напрямній повзуни можуть змінювати своє положення, таким чином змінюючи структуру компоновки навіть під час обробки деталі, встановленій на столі. Розглянемо компоновки 6×3 (6 шарнірів на повзунах, які рівномірно розміщені на круговій напрямній та 3 шарніри на виконавчому органі) та 3×3 . При цьому слід зауважити, що коли 2 шарніри дуже близько розміщені один біля одного, що можна умовно вважати, що вони знаходяться в одній точці. Тому, наприклад, компоновка 6×3 означає, що шарніри на кінцях кінематичних ланок розміщені наступним чином: 6 шарнірів на повзунах розміщені на круговій напрямній рівномірно, а інші 6 шарнірів, розміщені на виконавчому органі згруповані по 2 і отримані 3 групи по 2 шарніри також розміщені рівномірно по виконавчому органу.

Як можна побачити, кожна компоновочна схема утворює відповідну форму робочого простору з різними параметрами (рис. 3.1).

Компоновка 6×3 має робочий простір більшого діаметру, але меншої висоти, ніж компоновка 3×3 . Об'єми робочого простору компоновок також відрізняються. З діаграми об'ємів робочого простору (рис. 3.2) можна побачити, що зменшення кількості груп шарнірів, розташованих на повзунах, зменшується його об'єм.

Таблиця 3.1

Залежність форми робочого простору від компоновочної схеми

Компоновочна схема верстата-гексапода	Об'ємна форма робочого простору	Робочий простір у вигляді ліній рівня
 $N \times S = 6 \times 3$		
 $N \times S = 3 \times 3$		

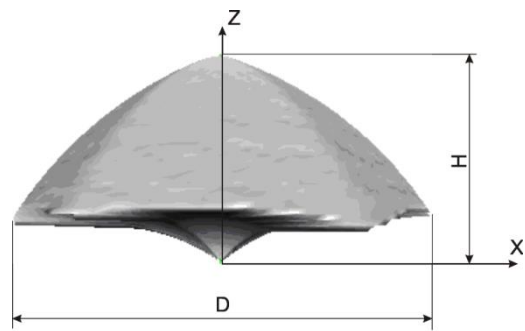


Рис. 3.1. Параметри робочого простору

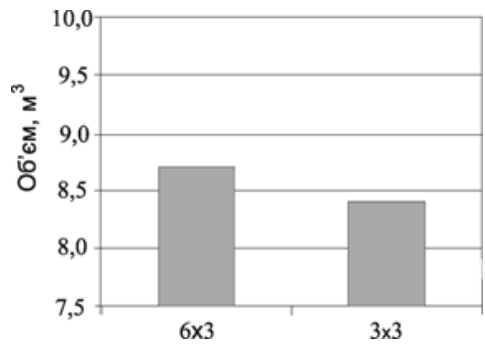


Рис. 3.2. Залежність об'єму робочого простору від компоновочної схеми

Отже, для обробки високих деталей ($H > D$) краще застосовувати компоновку 3×3 , а для обробки деталей типу дисків ($H < D$) – компоновку 6×3 .

Крім того, компоновка 3×3 має найбільшу жорсткість.

Таким чином, змінюючи компоновку столу завдяки круговій напрямній можна в режимі реального часу формувати необхідну форму робочого простору і керувати жорсткістю багатокоординатного столу.

3.2. Узгодженість рухів кінематичних ланок при реалізації типових рухів

Дослідження узгодженості зміни довжини кінематичних ланок виконувалися для обладнання різних структур $N \times S$ (рис. 2.9).

Під час моделювання стіл отримував прямолінійний рух вздовж осей X , Y і Z та рухи по колу навколо осей Z і Y . Зміна довжини кінематичних ланок при вертикальному переміщенні столу наведена на рис. 3.3.

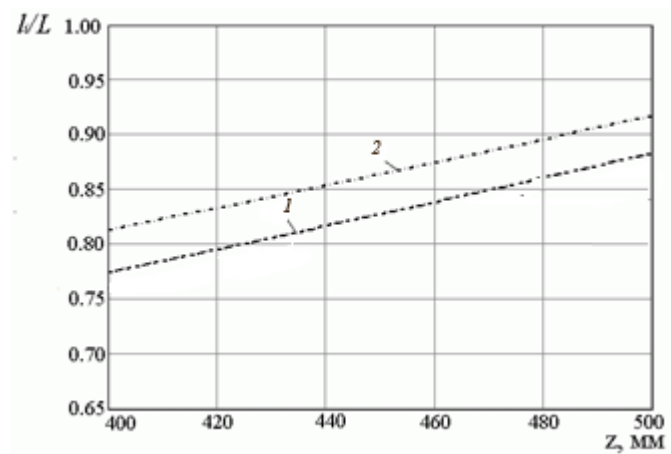
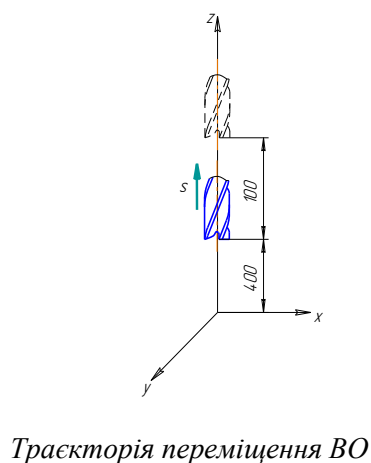
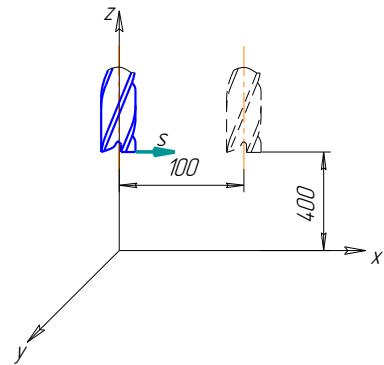


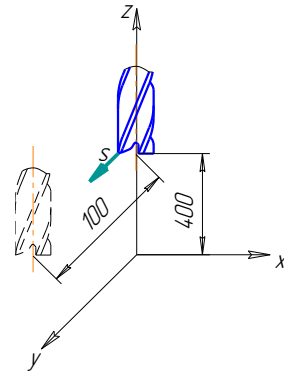
Рис. 3.3. Зміна довжини кінематичних ланок при вертикальному переміщенні столу для компоновок: 1) 6×3 ; 2) 3×3

Як видно з рисунку при такому русі довжина усіх кінематичних ланок змінюється аналогічно для обох компоновок.

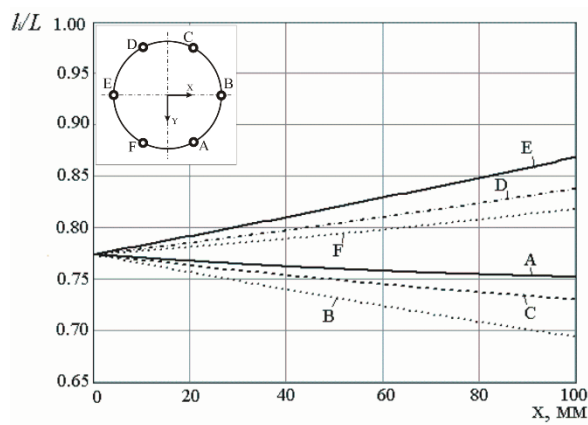
При переміщенні виконавчого органу вздовж осей X та Y на отримаємо графіки зміни довжини кінематичних ланок, наведені на рис. 3.4.



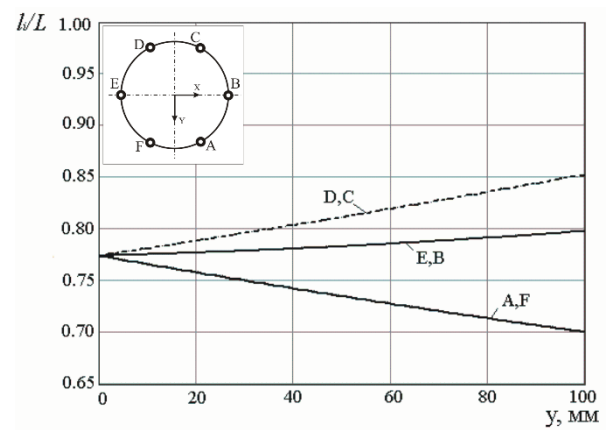
Траєкторія переміщення ВО



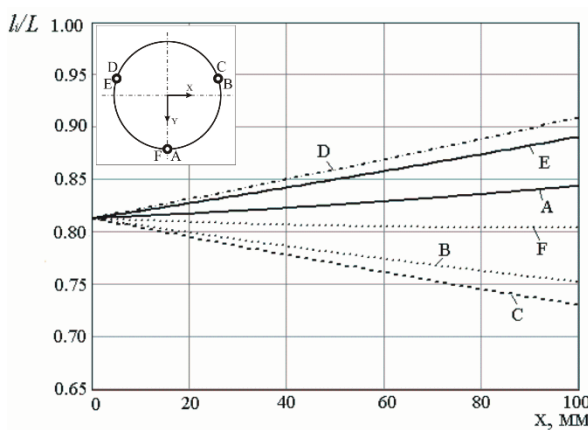
Траєкторія переміщення ВО



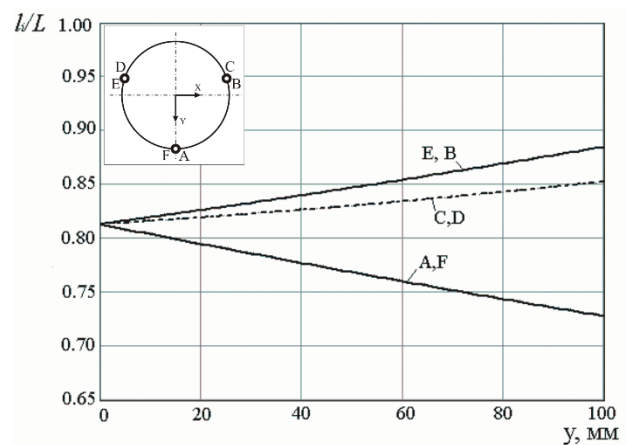
Структура 6×3



Структура 6×3



Структура 3×3



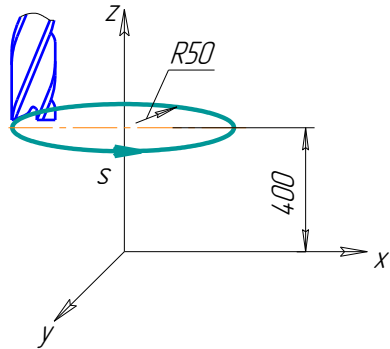
Структура 3×3

а

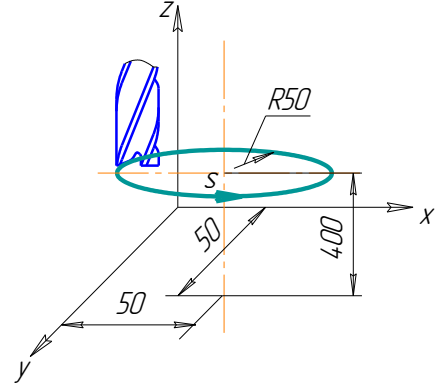
б

Рис. 3.4. Графіки зміни довжин кінематичних ланок при переміщенні виконавчого органу вздовж осі X (а) та осі Y (б)

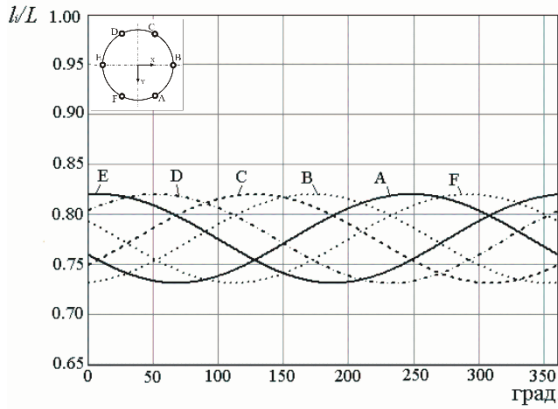
Зміна довжини кінематичних ланок обладнання з паралельною кінематикою при переміщенні виконавчого органу по колу наведена на рис. 3.5.



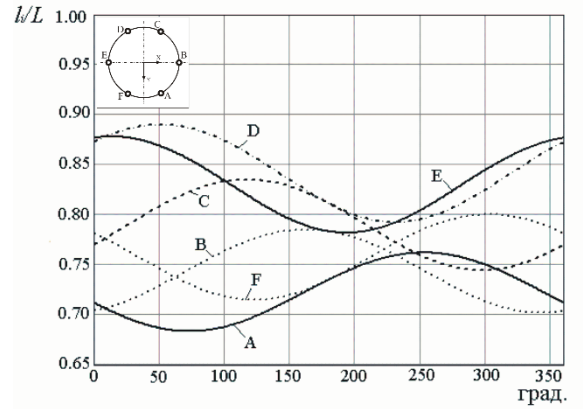
Траєкторія переміщення ВО



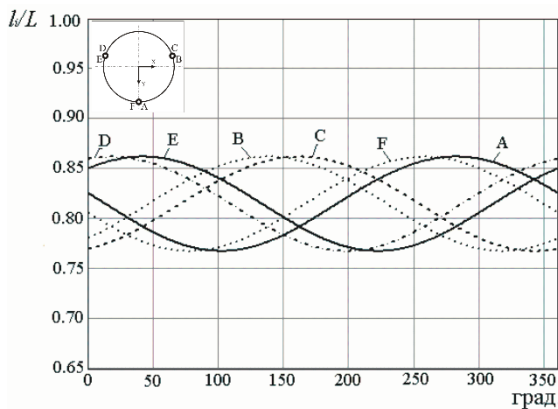
Траєкторія переміщення ВО



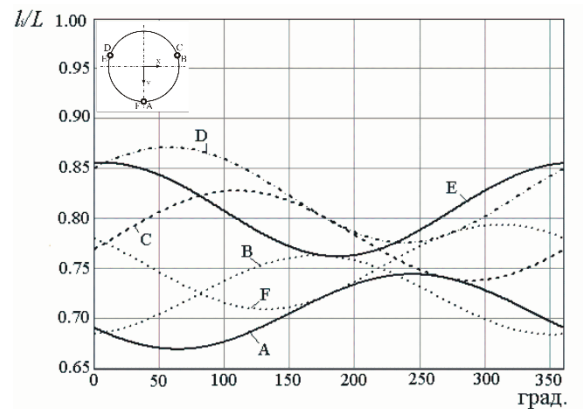
Структура 6×3



Структура 6×3



Структура 3×3



Структура 3×3

а

б

Рис. 3.5. Зміна довжини кінематичних ланок при переміщенні виконавчого органу по колу: а) навколо осі Z; б) в просторі

Графіки на рис. 3.5, *а* побудовані для випадку переміщення виконавчого органу навколо вертикальної осі Z по колу радіуса $R = 50$ мм на висоті $z = 400$ мм, а на рис. 3.5, *б* – для випадку, коли вісь колової траєкторії переміщення виконавчого органу зміщена на величину 50 мм відносно осей X та Y .

Отже, кожному фіксованому положенню виконавчого органу відповідає конкретна довжина кінематичної ланки, а значить, змінюючи довжини кінематичних ланок одночасно і узгоджено, можна перемістити виконавчий орган у задану точку траєкторії руху виконавчого органу.

3.3. Вплив діапазону довжин кінематичних ланок і кутів нахилу виконавчого органу

Рух виконавчого органу відбувається при одночасній узгодженій зміні довжин кінематичних ланок, тому доцільно дослідити вплив діапазону зміни довжини на геометричні параметри робочого простору.

Очевидно, що збільшення діапазону зміни довжини кінематичних ланок впливає на конфігурацію робочого простору, його розміри (діаметр (D) і висоту (H)) та збільшує його об'єм (рис. 3.6-3.8). Графік побудований при зміні довжини кінематичних ланок від $l_{\min} = 0,4$ м до $l_{\max} = 0,72$ м.

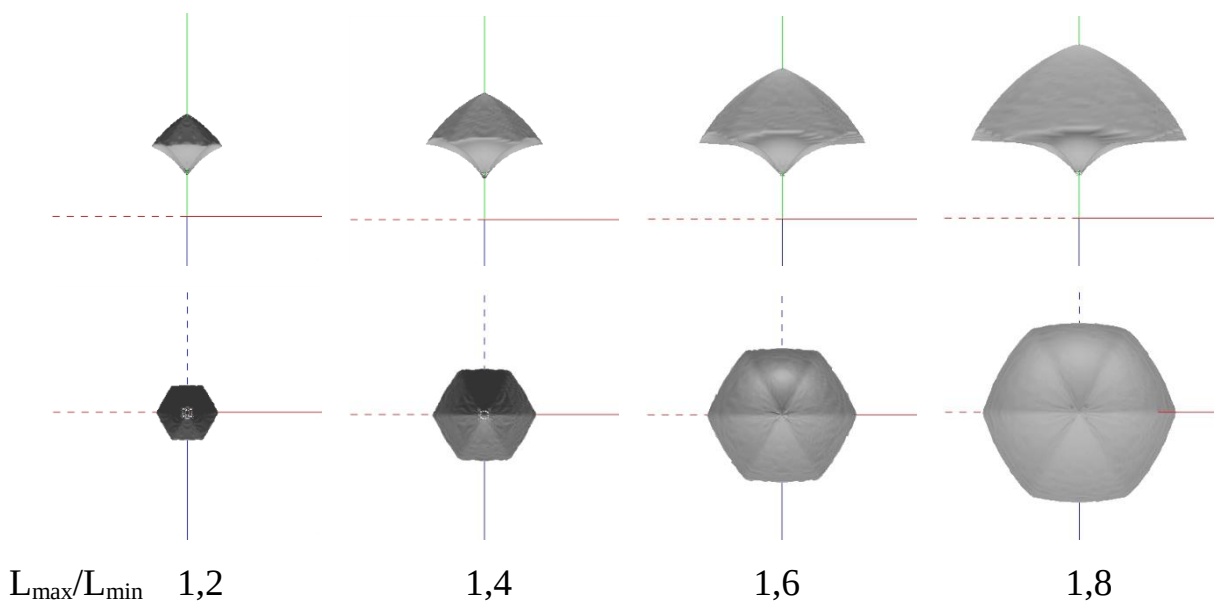
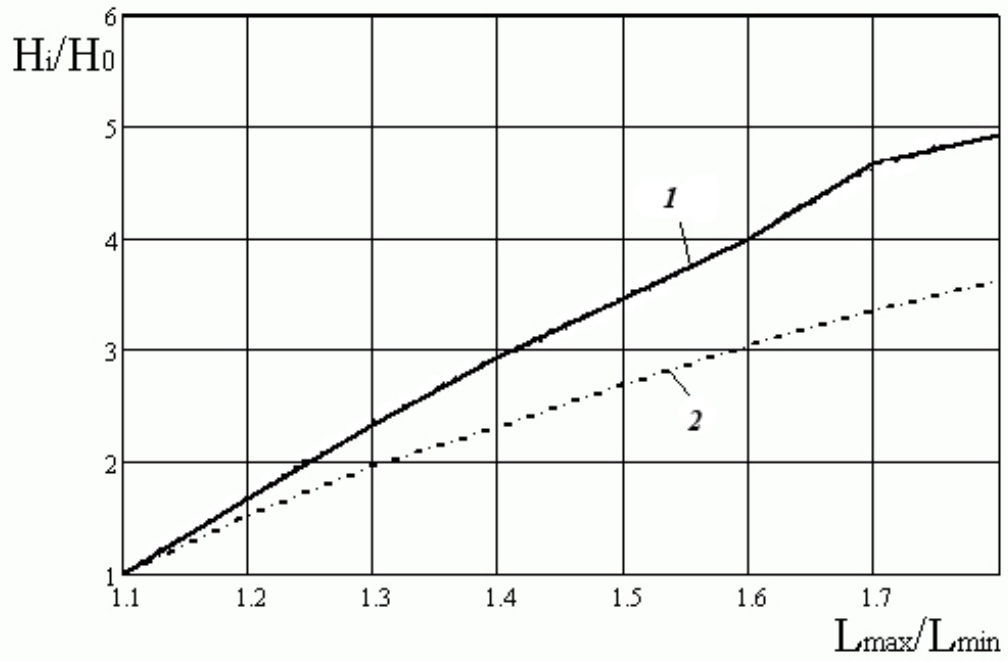
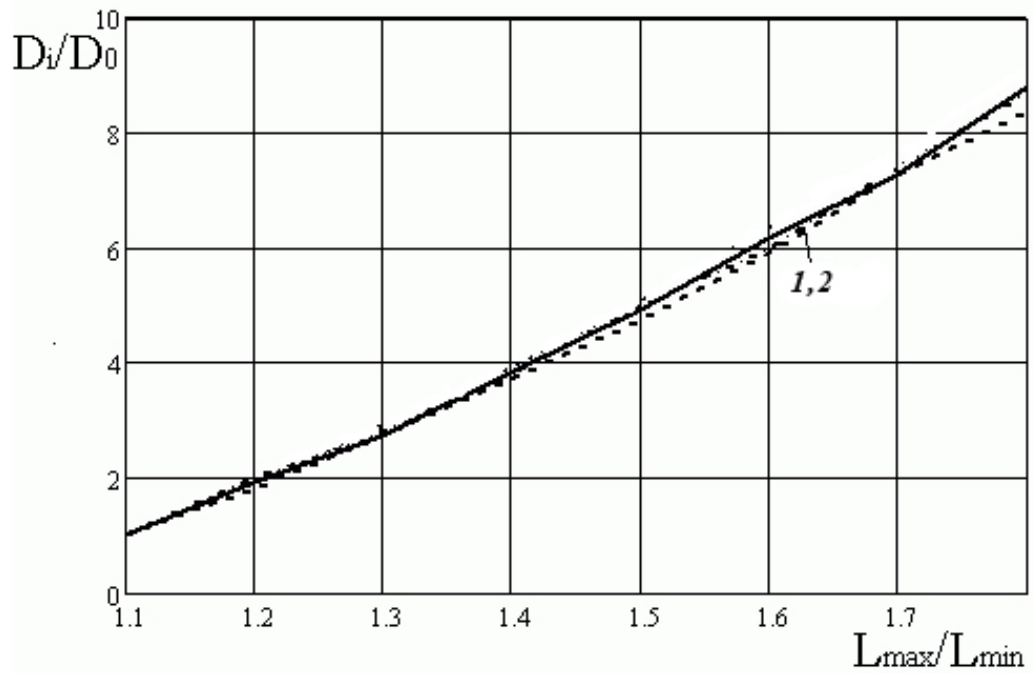


Рис. 3.6. Залежність форми робочого простору від діапазону зміни довжин кінематичних ланок ($L_{\max}/L_{\min}$)



a



б

Рис. 3.7. Залежність висоти (а) та діаметру (б) робочого простору від діапазону довжин кінематичних ланок ($L_{\max}/L_{\min}$)

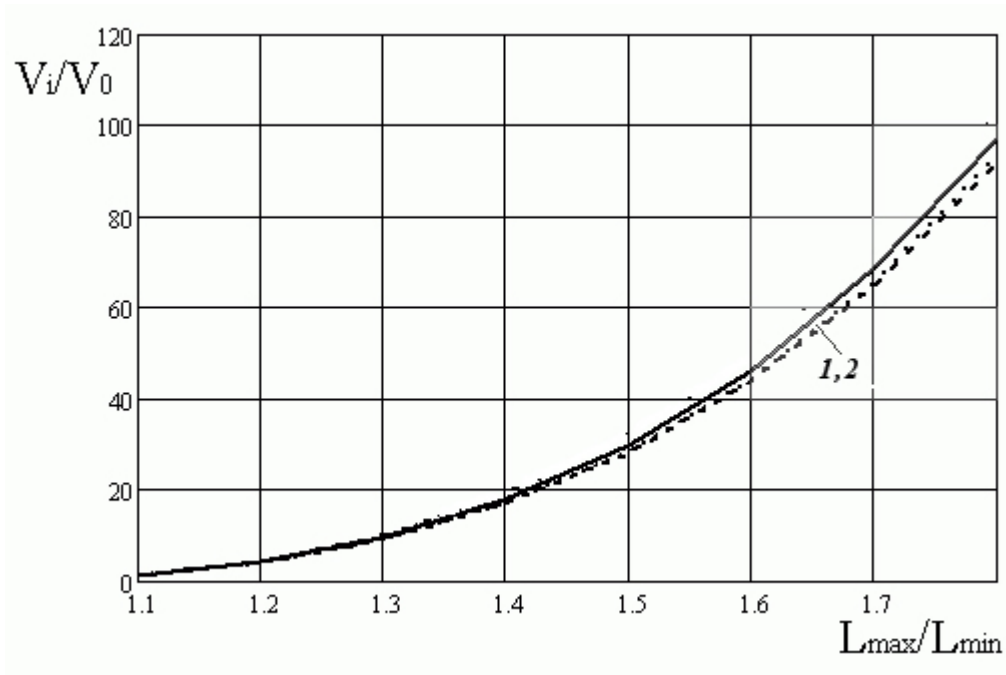


Рис. 3.8. Залежність об'єму робочого простору від діапазону довжини кінематичних ланок ($L_{\max}/L_{\min}$)

Позначення на графіках: 1 – залежність для верстата структури 6×3 ; 2 – структури 3×3 .

При збільшенні довжини кінематичних ланок у 1,8 рази, діаметр D робочого простору зростає у 9,6 разів, а висота – у 5 разів для компоновок структури 6×3 , і тільки у 3,5 рази для компоновки структури 3×3 . Інтенсивність зростання об'єм робочого простору для обох структур майже однакова.

Зміна кута нахилу виконавчого органу також впливає на розміри, форму і об'єм робочого простору (рис. 3.9), оскільки для забезпечення необхідних кутів повороту робочого органу довжина кінематичних ланок буде різною з самого початку. Отже, при горизонтальних і вертикальних рухах кутового положення виконавчого органу діапазон зміни довжин кінематичних ланок буде меншим.

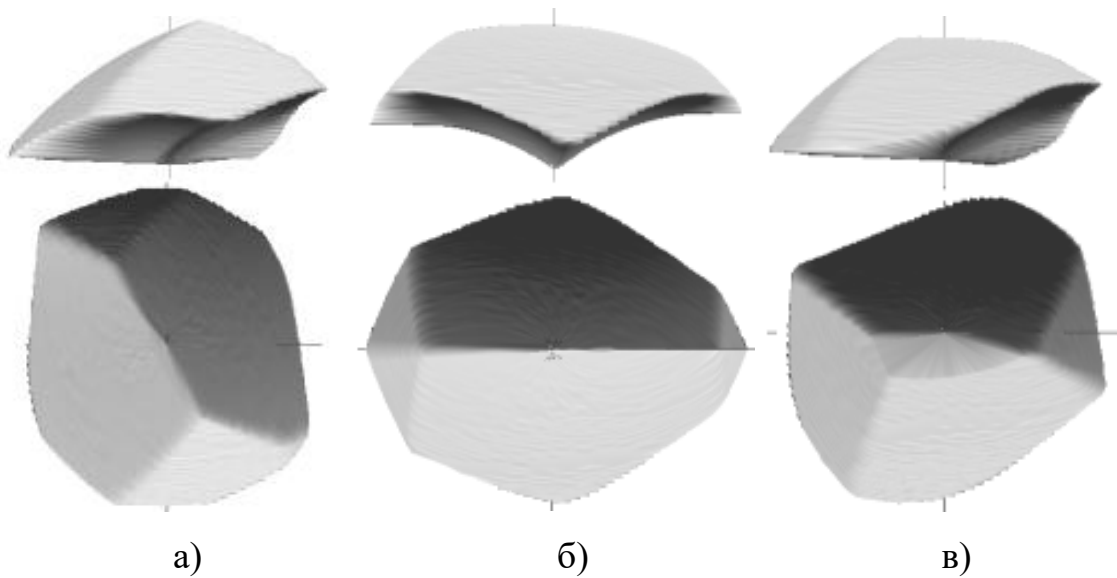


Рис. 3.9. Форма робочого простору гексапода: а) при $\theta=20^\circ$; б) при $\varphi=20^\circ$; в) при $\theta=20^\circ$ та $\varphi=20^\circ$

Вплив зміни кута нахилу виконавчого органу на параметри та об'єм робочого простору наведений на рис. 3.10-3.12.

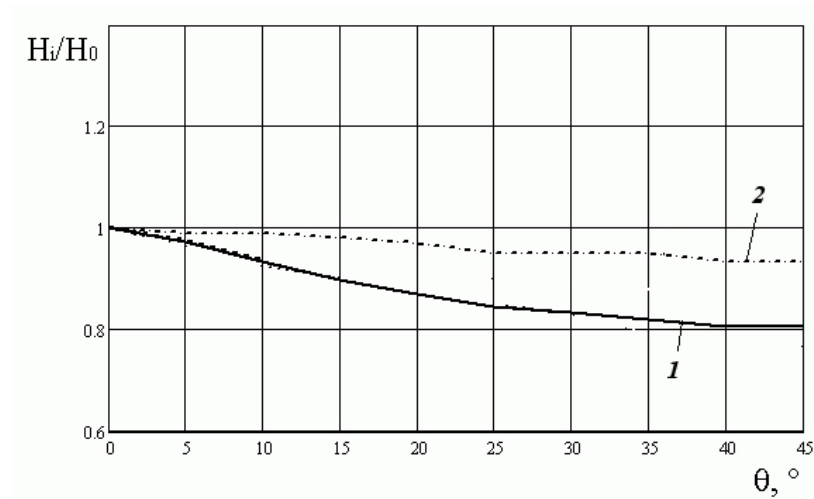


Рис. 3.10. Залежність висоти робочого простору від кута θ нахилу виконавчого органу

Збільшення кута нахилу виконавчого органу навколо осі Х до 45° майже не впливає на діаметр розглянутих компоновок, але для структури 6×3 висота зменшується приблизно у 0,8 разів, а для структури 3×3 – у 0,9 разів.

Зменшення розмірів робочого простору провокує і зменшення його об'єму (рис. 3.12).

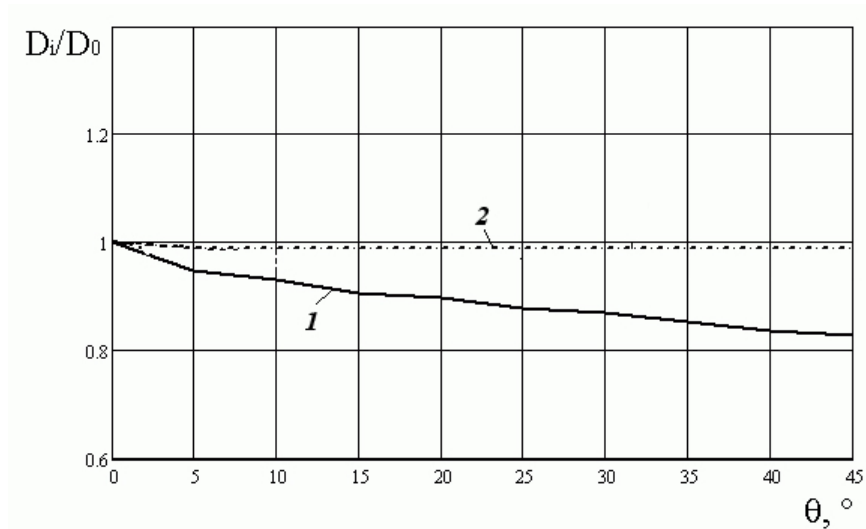


Рис. 3.11. Залежність діаметра робочого простору від кута θ нахилу ВО відносно осі X

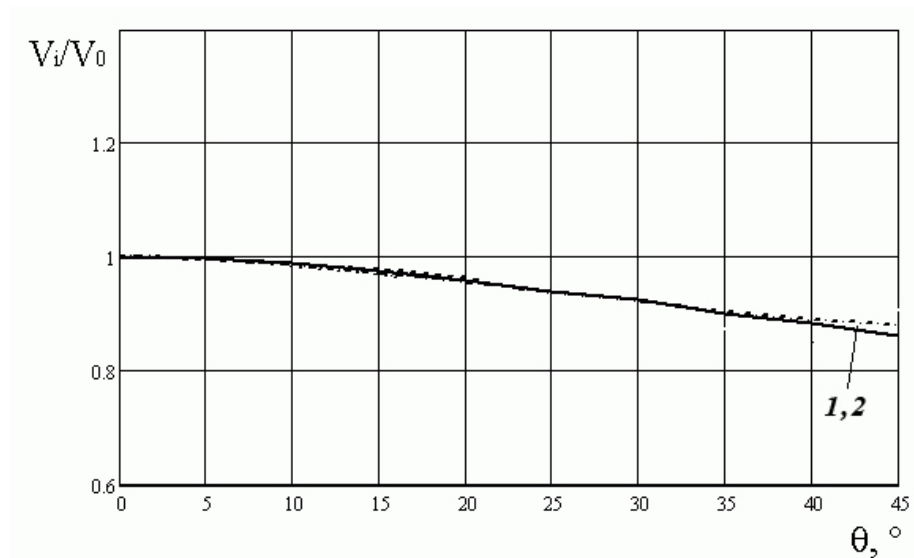


Рис. 3.12. Залежність об'єму робочого простору від кута θ нахилу ВО відносно осі X

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найбільш інтенсивно впливає на об'єм робочого простору збільшення довжини кінематичних ланок (майже у 100 разів), а вплив компоновочної схеми та кута нахилу виконавчого органу можна оцінювати як незначні.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Загальні вихідні дані

Метою даної випускної кваліфікаційної роботи є вдосконалення механізму багатокоординатного столу з паралельною кінематикою для підвищення його рухомості й коефіцієнту використання робочого простору. Рух столу здійснюється за допомогою кругових напрямних, що розширює його можливості та загальну продуктивність. Завдяки круговим напрямним з'являється можливість обробити заготовку з різних боків без необхідності переносити її на інші верстати, що збільшує як продуктивність так і якість обробки. Так наприклад, за рахунок більшої рухомості вихідного органу, заготовка складної форми може бути оброблена за меншу кількість перевстановлень, що сприяє суттєвому зменшенню штучного часу. Для отримання економічного ефекту приймаємо базу для порівняння – трьох координатний фрезерний верстат мод. 6Б75ВФ1. На відміну від базового, проектний має менші розміри, та більшу продуктивність.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та нового верстатів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1	2	3	4	5
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	10000	10000
2.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,0	1,2
3.	Площа, яку займає верстат	м ²	7,03	5,0

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5
4.	Встановлена потужність електродвигунів верстата	кВт	1,5	1,2
6.	Категорія ремонтної складності: механічної/електричної частин	УРО	13/7	3/12
7.	Розряд роботи: - верстатника - наладчика	розряд розряд	4 5	4 6
8.	Оптова ціна верстата, який модернізується	грн.	137000	
9.	Балансова вартість верстата 6Б75ВФ1	грн.	174100	-

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

4.2.1 Витрати на конструкторську підготовку модернізації верстата з паралельною кінематикою визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сз}^к \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (4.1)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції модернізованих частин верстата (кільце для кругових напрямних, станина, повзуни), шт.; $H_{ор}=5$

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сз}^к$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

κ_{∂} – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування на соціальні заходи від заробітної плати конструкторів, %;

H_{ϵ} – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{nk} = 5 \cdot 19 \cdot 102,27 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 5 \cdot 19 \cdot 102,27 \cdot \frac{45}{100} = 17410,0 \text{ грн.}$$

4.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot 3_{cz}^m \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_e, \quad (4.2)$$

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

3_{cz}^m – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_m = 5 \cdot 21 \cdot 98,55 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 5 \cdot 21 \cdot 98,55 \cdot \frac{55}{100} = 19583,0 \text{ грн.}$$

4.3. Визначення витрат на проведення модернізації верстата

Після визначення трудомісткості модернізації розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$3_{op} = \sum_{i=1}^n C_{ri} \cdot T_i, \quad (4.3)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

C_{ri} – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i -й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$3_{op} = 11,6 \cdot 92,02 = 1067,37 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n 3_{opi} \cdot \frac{\Pi_{ppi}}{100}, \quad (4.4)$$

де Π_{pp_i} – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на механічних роботах:

$$B_o = 1067,37 \cdot \frac{320}{100} = 3415,60 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n Z_{\text{op}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{цп}_i}}{100}, \quad (4.5)$$

,

де $\Pi_{\text{цп}}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$K_{\text{цех}} = 1067,37 \cdot \frac{240}{100} = 2561,70 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 4.2.

Виробничу собівартість модернізації розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{\text{вир}} = M_o + M_d + \Pi_n + T_v - B_{\text{зв}} + E_{\text{тех}} + \Pi_{\text{тех}} + \\ + Z_{\text{op}} + Z_{\text{др}} + B_c + Z_{\text{цп}} + B_o + K_{\text{цех}} + K_{\text{зав}} + B_{\text{ін}}, \quad (4.6)$$

де M_o, M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

Π_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги сторонніх підприємств, грн.;

Таблиця 4.2

Трудовіткість виготовлення та окремі види витрат, які включені до собівартості модернізації верстата

Види робіт	Трудовіткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $Z_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загальноцехові витрати $K_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	10,2	3	102,72	1047,74	350	3667,10	242	2535,54
Механічні	11,6	4	92,02	1067,37	320	3415,60	240	2561,70
Слюсарсько- складальні	5,3	4	92,02	487,71	210	1024,18	220	1072,95
Всього	27,1	-	-	2602,82	-	8106,88	-	6170,19

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні напівфабрикати зведено до табл. 4.3.

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$B_{зв}$ – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

$E_{тех}$, $P_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$Z_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

B_c – відрахування у соціальні фонди (єдиний соціальний внесок), грн.;

$Z_{цп}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$K_{зав}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{ін}$ – інші виробничі витрати, грн.

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на модернізацію верстата

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Чавун СЧ15	кг	80,0	75,00	6000,00
2.	Сталь 45	кг	36,0	43,50	1530,00
	Всього основних матеріалів				7530,00
Покупні комплектуючі вироби					
1.	Повзуни	шт.	6	1500,0	9000,00
2.	Метизи	кг	1,2	124	148,80
3.	Кругові напрямні	шт.	1	7000,0	7000,00
	Всього покупних комплектуючих				16148,80

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.4.

Балансову вартість модернізованого верстата визначаємо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал.пр}} = \Phi_{\text{бал.б}} - \sum_1^m B_{\text{ан}} + C_{\text{вир.мод}}, \quad (4.7)$$

де $\Phi_{\text{бал.б}}$ – балансова вартість базового верстата з паралельною кінематикою, який модернізується, грн.:

$$\Phi_{\text{бал.б}} = \Pi_{\text{опт.б}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (4.8)$$

де $\Pi_{\text{опт.б}}$ – оптова ціна базового верстата, який модернізується, грн.;

$K_{\text{тр}}$, $K_{\text{м}}$, $K_{\text{ф}}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$\Phi_{\text{бал.б}} = 137000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 163030 \text{ грн.}$$

m – кількість анульованих у процесі модернізації деталей та вузлів;

$B_{\text{ан}}$ - вартість анульованих деталей ($B_{\text{ан}} = 0$ грн.);

$C_{\text{вир.мод}}$ – виробнича собівартість модернізації верстата, грн.

$$\Phi_{\text{бал.пр}} = 163030 - 0 + 48890 = 211920 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.4

Виробнича собівартість модернізації

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.3	7530,00
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	451,80
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги підприємств	P_n	табл. 4.3	16148,80
4.	Зворотні відходи	$-B_{zv}$	5% від M_o	1129,50
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	6% від $(M_o + M_d)$	965,22
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$P_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	78,8% від $З_{\text{ор}}$	2051,03
7.	Всього матеріальні витрати			26017,35
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{ор}}$	табл. 4.2	2602,82
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{др}}$	10% від $З_{\text{ор}}$	260,28
10.	Відрахування на соціальні заходи	$B_{\text{сс}}$	22% від $(З_{\text{ор}} + З_{\text{др}})$	629,88
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{\text{уп}}$	8,5% від $З_{\text{ор}}$	221,24
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	8106,88
13.	Цехові витрати	$K_{\text{цех}}$	табл. 4.2	6170,19
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{\text{зав}}$	185% від $З_{\text{ор}}$	4815,22
15.	Інші виробничі витрати	$B_{\text{ін}}$	2,5% від $З_{\text{ор}}$	65,07
16.	Виробнича собівартість	$C_{\text{вир}}$	$\Sigma(7 \div 15)$	48890,0

4.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (4.9)$$

де B_m – витрати на основні матеріали, грн. (не розраховуються, оскільки співпадають у базовому та проектному варіантах);

B_z – витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні заходи основних робітників, грн.;

B_e – витрати на силову електроенергію, грн.;

B_{md} – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні заходи оператора:

$$B_z = C_r \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.10)$$

де $T_{\text{нор}}$ – час обробки деталі, хв.;

K_d, K_c – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

В базовому варіанті:

$$B_{zб} = 92,02 \cdot \frac{2,0}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 4,116 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$B_{zn} = 92,02 \cdot \frac{1,2}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 2,470 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_c = \frac{N_b \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (4.11)$$

де N_b – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($K_o=0,65\dots0,8$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів $K_N=0,5\dots0,6$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом ($K_d=0,3\dots0,5$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c=0,86\dots0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m=0,92\dots0,96$);

$C_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн.

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,3}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{2,0}{60} \cdot 8,235 = 0,063 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{1,2 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,4}{0,87 \cdot 0,95} \cdot \frac{1,2}{60} \cdot 8,235 = 0,048 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{нор}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.12)$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_{\text{п}} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{79,5 \cdot 13,0 \cdot 2,0}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,345 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{79,5 \cdot 3,0 \cdot 1,2}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,047 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot \Gamma_{\text{вс}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.13)$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{вс}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин верстата, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3950 год.).

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{13 \cdot 980 + 7 \cdot 810}{3950} \cdot \frac{2,0}{60} = 0,156 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{3 \cdot 990 + 12 \cdot 810}{3950} \cdot \frac{1,2}{60} = 0,065 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.14)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення);

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м² виробничого приміщення, грн/м².

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{7,03 \cdot 2,5 \cdot 2,0}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,062 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{5,0 \cdot 3,0 \cdot 1,2}{3950 \cdot 60} \cdot 780 = 0,031 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.15)$$

де H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{\text{бал}}$ – балансова вартість верстата, грн.

$$B_a^{\text{б}} = \frac{174100 \cdot 20 \cdot 2,0}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,294 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{пр}} = \frac{211920 \cdot 20 \cdot 1,2}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 0,215 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження верстата:

$$B_n = C_{\text{гн}} \cdot (1 + K_{\text{д}}) \cdot (1 + K_{\text{с}}) \cdot \frac{T_{\text{нал}} \cdot A}{60 \cdot N_{\text{д}}}, \quad (4.16)$$

де $C_{\text{гн}}$ – годинна тарифна ставка наладчика, грн/год;

A – кількість налагоджень за рік;

$T_{\text{нал}}$ – час налагодження, хв;

$N_{\text{д}}$ – річна програма випуску деталей, шт./рік.

$$B_n^{\text{баз}} = 104,288 \cdot (1 + 0,10) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{30 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,084 \text{ грн.}$$

$$B_n^{\text{пр}} = 122,693 \cdot (1 + 0,10) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{35 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,116 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне познач.	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1	2	3	4	5
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні заходи	B_z	4,116	2,470
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	0,063	0,048
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,345	0,047
4.	Ремонт обладнання	B_p	0,156	0,065
5.	Утримання приміщення	$B_{ун}$	0,062	0,031
6.	Амортизація обладнання	B_a	0,294	0,215
7.	Налагодження обладнання	B_n	0,084	0,116
Загальна сума		B_e	5,120	2,992

4.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від проведеної модернізації розрахуємо за формулою:

$$E_p = (B_e^{\text{баз}} - B_e^{\text{пр}}) \cdot N_d - E_n \cdot K_d, \quad (4.17)$$

де N_d – річна програма випуску деталі на модернізованому верстаті, шт.;
 K_d – додаткові капітальні витрати, грн.

$$K_d = B_{нк} + B_m + \Phi_{\text{бал.пр}} \cdot Q_{\text{пр}} - \Phi_{\text{бал.б}} \cdot Q_b, \quad (4.18)$$

де $B_{нк}, B_m$ – відповідно вартість конструкторської та технологічної підготовки модернізації, грн.

$\Phi_{\text{бал.пр}}, \Phi_{\text{бал.б}}$ – відповідно балансова вартість верстатів у проектному та базовому варіантах, грн.;

Q_{np} , Q_{δ} – потреба у верстатах відповідно в проектному і базовому варіантах.

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_{\delta} \cdot T_{нор}}{F_{\partial pm} \cdot 60 \cdot \kappa_{\epsilon}}, \quad (4.19)$$

де κ_{ϵ} – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Так потреба в проектному варіанті:

$$Q_{p. np} = \frac{10000 \cdot 1,44}{3950 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,06;$$

$$K_d = 17410 + 19583 + 211920 \cdot 1 - 174100 \cdot 1 = 74813 \text{ грн.}$$

$$E_p = (5,120 - 2,992) \cdot 10000 - 0,16 \cdot 74813 = 9310 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_{\delta}}{(B_{\epsilon}^{баз} - B_{\epsilon}^{пр}) \cdot N_d}, \quad (4.20)$$

$$T_{ок} = \frac{74813}{(5,120 - 2,992) \cdot 10000} = 3,5 \text{ років}$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Оди- ниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Потреба у верстатах	шт./рік	1	1	—
2.	Програма виробництва деталей	шт./рік	10000	10000	—
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	2,0	1,2	—40,0
4.	Оптова ціна верстата, який модернізується	грн.	137000	—	—
5.	Виробнича собівартість модернізації	грн.	—	48890	—
7.	Балансова вартість порівнюваних верстатів	грн.	174100	211920	+21,7
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	5,120	2,992	—41,6
9.	Додаткові капітальні витрати у тому числі на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	74813	—
		грн.	—	36993	—
10.	Строк окупності додаткових капітальних витрат	років	—	3,5	—
11.	Річний економічний ефект	грн.	—	9310	—

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі для освітнього ступеня «магістр» визначено конструктивні залежності багатокоординатного столу на основі механізму паралельної структури з круговою напрямною.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- проаналізовано існуючі схеми побудови технологічного обладнання з паралельною кінематикою та їх технічні характеристики;
- поставлено і розв'язано зворотну задачу кінематики для технологічного обладнання типу гексапод;
- запропоновано нову компоновку гексапода з додатковою круговою напрямною;
- проведено теоретичні дослідження впливу компоновки, діапазону зміни довжини кінематичних ланок, кута нахилу робочого органу на геометричні характеристики робочого простору.

Результати моделювання свідчать, що завдяки переміщенню опорних шарнірів вздовж кругової напрямної можна швидко змінювати структуру компоновки (наприклад, 3x3 або 6x3), висоту, діаметр, об'єм, конфігурацію та розташування робочого простору. Кругові напрямні також спрощують форму робочого простору та дозволяють виводити гексапод з «особливих» положень.

В роботі проведено економічне обґрунтування впровадження результатів досліджень при експлуатації гексаподів. Використання запропонованого столу-гексаподу дозволить отримати у користувача річний економічний ефект у розмірі 9310 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. / [Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Кириченко А. М. та ін.]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2003 –

Ч. 1: Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання – 2003. – 422 с.

2. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. / [Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Кириченко А. М. та ін.]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2003 –

Ч. 2: Проектування та дослідження вузлів агрегатно-модульного технологічного обладнання – 2003. – 286 с.

3. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. / [Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Кириченко А. М. та ін.]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2003 –

Ч. 3: Агрегатно-модульне технологічне обладнання нового покоління, його оснащення та інструментальне забезпечення – 2003. – 507 с.

4. Валявський І.А. Комп'ютерне моделювання робочого простору верстата-гексапода / І. А. Валявський // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя, ЗНТУ, 2003. – №2. – С. 109-114

5. Валявський І. А. Математичне моделювання положення вихідного органу *l*-координатного механізму / І. А. Валявський, В. А. Крижанівський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірник наук. праць. – Кіровоград : КДТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 223–229.

6. Валявський І. А. Графічне моделювання робочого простору верстата-гексапода / І. А. Валявський, В. А. Крижанівський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірник наук. праць. – Кіровоград : КДТУ, 2003. – Вип. 13.

7. Валявський І. А. Особливості проектування верстатів-гексаподів // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірник наук. праць. – Кіровоград : КНТУ, 2007. – Вип. 18. – С. 82–85.

8. Валявський І. А. Теоретичне дослідження особливих положень верстатів-гексаподів / І. А. Валявський, І. І. Павленко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград : КНТУ, 2008. – Вип. 38. – С. 238–243.

9. Валявський, І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посіб. / І. А. Валявський, О. В. Лисенко, І. А. Лисенко ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 281 с.

10. Костюк В. І. Робототехніка / В. І. Костюк, Г. О. Спину, Л. С. Ямпольський. – К. : Вища школа, 1994. – 446 с.

11. Кириченко А. М. Вибір компоновки багатокоординатного верстата паралельної структури з ланками змінної довжини / А. М. Кириченко, О. В. Шелепко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2015. – Вип. 28. – С. 3-8

12. Кириченко А. М. Вплив діапазону кутів повороту шарнірних опор на об'єм робочого простору верстата-гексапода / А. М. Кириченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – Чернігів : ЧДТУ, 2011. – № 65. – С. 56-63.

13. Кириченко А. М. Геометрична побудова робочого простору обладнання з механізмами паралельної структури / А. М. Кириченко, В. Б. Струтинський // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ, 2011. – Вип. 24. – С. 216-222

14. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навчальний посібник для ВНЗ / [В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнєцов, І. А. Валявський, Р. А. Склєров]; під ред. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.

15. Кропівний О. О., Гречка А. І., Кириченко А. М., Щербина К. К. Кінематичні залежності двокоординатного механізму паралельної структури з поворотним кріпленням шарнірів штанг змінної довжини. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 5(2). С. 22-30

16. Кузнєцов Ю. М. Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою / Ю. М. Кузнєцов, В. А. Крижанівський, Р. А. Склєров // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : (зб. наукових праць). – ЖДТУ, 2005. – Вип. 1. – С. 320–333.

17. Кузнєцов Ю. М. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компоновок / Ю. М. Кузнєцов, Д. О. Дмитрієв // Вісник ТДТУ. – 2008. – № 1.

18. Кузнєцов Ю. М. Моделювання технологічних рухів в верстатах паралельної структури при обробці складнопрофільних поверхонь / Ю. М. Кузнєцов, Д. О. Дмитрієв // Современные технологии в машиностроении : (зб. наукових праць НТУ «ХП»). – 2008. – Вип. 1.

19. Кузнєцов Ю. М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні / Ю. М. Кузнєцов // Зб. наук. праць за матеріалами науково-методичної конф. «Вища освіта – 2006». – 2007. – С. 45–55.

20. Павленко І. І. Рухові характеристики верстатів з паралельною кінематикою / І. І. Павленко, І. А. Валявський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 128–134. – (Збірник наук. праць).

21. Павленко І.І. Дослідження впливу конструктивних параметрів механізму паралельної структури на функціональні можливості верстата з паралельною кінематикою. / І. І. Павленко, І. А. Валявський // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград, 2008. – Вип. 38. – С. 284-288.

22. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів // Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 40 с.

23. Ткачук К.Н., Зацарний В.В. Сабарно Р.В. та ін. Охорона праці та промислова безпека : Навч. посіб. – К.: Лібра, 2010. – 268 с.

24. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: Афіша. 2004 – 230 с.

25. Gough V. E., Witehall S. G. Universal Tire Test Machine, Proceedings of the 9th International Automobile Technical Congress FISITA, London (UK), ImechE (pp. 117 – 137), 1962.

26. Lilla A. Quicker Success with Hybrid Kinematics «ECOSPEED», The 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2002, Chemnitz, Germany, pp.775-784

27. Merlet J. P. Parallel robots, Kluwer, 2000

28. Merlet J. P. An initiative for the kinematics study of parallel manipulators, Proceedings of the WORKSHOP on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada, pp.1-9

29. Neumann K. E. Tricept Applications, The 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2002, Chemnitz, Germany, pp.547-551

30. Neumann K. E. Next Generation Tricept – A True Revolution in Parallel Kinematics, The 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2004, Chemnitz, Germany, pp.591-594

31. Rehsteiner F. Putting parallel kinematics machines (PKM) to productive work / Rehsteiner F., Neugebauer R., Spiewak S., Wieland F. // Annals of CIRP, 48/1/1999, p. 345-350.
32. Schoppe E. Tripod Machine SKM 400 Design, Calibration and Practical Application / Schoppe E.; Pönisch A.; Maier V.; Puchtler T.; Ihlenfeldt S. // The 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2002, Chemnitz, Germany, pp.579-594
33. Stewart, D. A Platform with Six Degrees of Freedom, Proc. Inst. Mech. Eng. London, Vol 180, 1965, pp. 371-386.
34. Tlusty J. Fundamental comparison of the use of serial and parallel kinematics for machine tools / Tlusty J., Ziegert J., Ridgeway S. // Annals of CIRP, 48/1/1999, pp. 351-356
35. Treib T. Parallel Kinematic Machines in Practice, The 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar PKS 2002, Chemnitz, Germany, pp.63-66
36. Weck M., Staimer D. Parallel Kinematic Machines Tools - Current State and Future Potentials, Annals of CIRP, 51/2/2002, p.671-683