

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:
«Підвищення ефективності багатокоординатного верстата комбінованої
структури»
«Improving the efficiency of a multi-coordinate machine of combined
structure»

Виконавець: ст. гр. МВ-20М1,9

_____ Віктор ПАЛЄЙКІН

Керівник: к.т.н., доц.

_____ Михайло ПІДГАСЦЬКИЙ

Рецензент:

Зав. каф. ММР

_____ 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

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ПАЛЄЙКІНА Віктора

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності багатокоординатного верстата комбінованої структури

2. Керівник роботи: _____ к.т.н., доц., Михайло ПІДГАЄЦЬКИЙ

3. Строк подання роботи до захисту _____ травня 2022 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є підвищення ефективності багатокоординатного верстата комбінованої структури шляхом вибору раціональної компоновки на основі показників об'єму робочого простору.

Завдання:

- розробити компоновку та кінематичну схему багатокоординатного верстата комбінованої структури;
- проаналізувати зворотні кінематичні залежності механізму комбінованої структури;
- дослідити вплив розташування карданних шарнірів на величину робочого простору;
- проаналізувати роботу приводів при різних траєкторіях руху робочого органу;
- провести техніко-економічне обґрунтування доцільності використання вдосконаленого інструменту;
- розрахувати економічну ефективність від впровадження результатів проведених досліджень.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Науково-дослідний	Михайло ПІДГАСЦЬКИЙ		
Організаційно-економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	Лютий 2022	вик.
2.	Аналіз конструкцій та наукових досліджень верстатів з паралельною кінематикою	Лютий 2022	вик.
3.	Конструкція і кінематичні залежності комбінованого механізму паралельної структури	Березень -квітень 2022	вик.
4	Аналіз кінематичних залежностей	Квітень 2022	вик.
5	Економічне обґрунтування проекту верстата	Квітень-травень 2022	вик.
6.	Висновки	Травень 2022	вик.
7.	Оформлення роботи	Травень 2022	вик.

Дата видачі завдання «_____» _____ 2022 р.

Керівник роботи _____ Михайло ПІДГАСЦЬКИЙ
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «_____» _____ 2022 р.

Студент _____ Віктор ПАЛЄЙКІН
(підпис)

Анотація

ПАЛЄЙКІН Віктор. Підвищення ефективності багатокоординатного верстата комбінованої структури. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2022. – 85 с. Матеріали презентації 9 іл.

Метою даної роботи є підвищення ефективності багатокоординатного верстата комбінованої структури шляхом вибору раціональної компоновки на основі показників об'єму робочого простору.

Розроблено компоновку та кінематичну схему багатокоординатного верстата комбінованої структури. Проаналізовано зворотні кінематичні залежності механізму комбінованої структури. Досліджено вплив розташування карданних шарнірів на величину робочого простору. Проаналізовано роботу приводів при різних траєкторіях руху робочого органу.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів досліджень становить 416900 грн. у споживача, що досягається за рахунок зниження вартості та підвищення продуктивності обробки.

Актуальність: широкого розповсюдження набули верстати з комбінованою кінематичною структурою, в яких механізм паралельної структури поєднується з одною або кількома звичайними осями координат, що дозволяє об'єднати переваги та компенсувати недоліки верстатів з традиційною й паралельною кінематикою.

Практичне значення: проаналізовано роботу приводів при різних траєкторіях руху робочого органу; встановлено вплив конструктивних параметрів верстата комбінованої структури на величину робочого простору

Ключові слова: комбінована кінематична структура, робочий простір, траєкторія.

Summary

PALEYKIN Viktor. Improving the efficiency of a multi-coordinate machine of combined structure. Graduation thesis for a master's degree: CUNTU, 2022.– 85 p. Presentation materials 9 il.

The aim of this work is to increase the efficiency of the multi-coordinate machine of the combined structure by choosing a rational layout based on the volume of the working space.

The layout and kinematic scheme of the multi-coordinate machine of the combined structure are developed. The inverse kinematic dependences of the mechanism of the combined structure are analyzed. The influence of the location of the universal joints on the size of the working space is investigated. The operation of drives at different trajectories of the working body is analyzed.

Expected economic effect from the implementation of research results is 416900 UAH. at the consumer, which is achieved by reducing the cost and increasing the productivity of processing.

Keywords: combined kinematic structure, working space, trajectory.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	10
1.1. Передумови створення та функціональні можливості верстатів з паралельною кінематикою	10
1.2. Історія розвитку верстатів з паралельною кінематикою.....	12
1.3. Механізми паралельної структури	19
1.4. Конструкції багатокоординатного обладнання з паралельною кінематикою.....	23
1.5. Мета і задачі роботи.....	29
2. КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ КОМБІНОВАНОГО МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ	30
2.1. Конструкція верстата з комбінованим механізмом паралельної структури	30
2.2. Кінематичні залежності механізму.....	32
3. АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ	39
3.1. Основні положення	39
3.2. Зворотні кінематичні залежності.....	40
3.3. Аналіз робочого простору багатокоординатних верстатів комбінованої структури.....	42
3.4. Моделювання роботи верстата	47
3.5. Висновки	51
4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА	52
4.1. Загальні вихідні дані	52
4.2. Конструкторська підготовка виробництва	53
4.3. Технологічна підготовка виробництва.....	56
4.4. Визначення повної собівартості та оптової ціни верстата.....	59

4.5. Визначення експлуатаційних витрат, які припадають на одиницю продукції	63
4.6. Розрахунок показників економічної ефективності	68
4.7. Організаційно-планові розрахунки	70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84

ВСТУП

Актуальність роботи. В сучасному високорозвиненому індустріальному суспільстві відбувається постійна інтеграція нових технологій, що обумовлюється ринковими відносинами та підвищенням конкурентоспроможності продукції. Таким чином, конкурентна боротьба за ринки збуту верстатобудівної продукції вимагає постійного удосконалення технологічного обладнання.

Основним напрямком автоматизації багатомономенклатурного серійного виробництва є створення швидкопереналагоджуваного технологічного обладнання з ЧПУ на основі механізмів паралельної структури, яке слід розглядати не як удосконалення існуючого технологічного обладнання, а як створення принципово нового обладнання для виконання майже усіх технологічних операцій (обробки, складання, випробування та вимірювання виробів), а також нових принципів конструювання сучасних верстатних систем.

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою внаслідок своїх специфічних властивостей спроможне вирішити більшість технологічних задач, які ставляться сучасним багатомономенклатурним серійним виробництвом:

- високий рівень гнучкості виробництва та переналагоджування технологічного обладнання при переході на іншу номенклатуру виробів;
- реалізація надвисоких швидкостей робочих, допоміжних та установчих переміщень рухомих виконавчих органів;
- модульна конструкція технологічного обладнання;
- геометрична симетрія побудови технологічного обладнання;
- замкненість кінематичних ланцюгів, які створюють жорстку конструкцію;
- висока точність позиціонування та динамічні характеристики.

Разом з тим, широкого розповсюдження набули верстати з комбінованою кінематичною структурою, в яких механізм паралельної структури поєднується з одною або кількома звичайними осями координат, що дозволяє об'єднати

переваги та компенсувати недоліки верстатів з традиційною й паралельною кінематикою.

Отже створення та дослідження верстатів з комбінованою кінематичною структурою є актуальною науковою задачею.

Метою даної роботи є підвищення ефективності багатокоординатного верстата комбінованої структури шляхом вибору раціональної компоновки на основі показників об'єму робочого простору.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні **задачі**:

1. розробка компоновки та кінематичної схеми багатокоординатного верстата комбінованої структури;
2. аналіз зворотних кінематичних залежностей механізму комбінованої структури;
3. дослідження впливу розташування карданних шарнірів на величину робочого простору;
4. аналіз роботи приводів при різних траєкторіях руху робочого органу.

Практична цінність роботи:

- проаналізовано роботу приводів при різних траєкторіях руху робочого органу;
- встановлено вплив конструктивних параметрів верстата комбінованої структури на величину робочого простору

Об'єкт дослідження: багатокоординатний верстат комбінованої структури

Предмет дослідження: зворотні кінематичні залежності та робочий простір багатокоординатного верстата комбінованої структури

1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

1.1. Передумови створення та функціональні можливості верстатів з паралельною кінематикою

Концепція розвитку багатомоделного серійного виробництва конкурентоспроможної машинобудівної продукції в умовах жорсткої боротьби за ринки збуту вимагає широкого використання нових високоефективних інформаційних технологій та створення для їх реалізації гнучких автоматизованих верстатних систем, властивості яких адекватні поточним умовам конкретного підприємства.

Основним напрямком автоматизації процесів гнучкого серійного виробництва є підвищення ефективності та удосконалення структури парку технологічного обладнання на основі визначення і аналізу його недоліків та пошуку шляхів їх усунення, враховуючи концепції розвитку сучасного верстатобудування.

Основні тенденції створення технологічного обладнання нового покоління наступні:

- багатофункціональність – використання механізмів, які мають можливість виконання технологічних, транспортних та допоміжних операцій одним виконавчим органом;

- багатопоточність – застосування механізмів, що дозволяють реалізувати раціональний перерозподіл навантажень між механізмами та його складовими елементами паралельними шляхами.

Наведеним критеріям повністю відповідають механізми паралельної структури, створені на основі стрижневих просторових конструкцій, які при передачі енергетичних потоків паралельними шляхами забезпечують при загальмованих приводах досить жорстку просторову конструкцію верстата.

Таким чином, основним напрямком автоматизації процесів гнучкого багатомоделного серійного виробництва є створення агрегатно-

модульного програмно-керованого швидкопереналагоджуваного технологічного обладнання, побудованого на основі механізмів паралельної структури, яке отримало назву "технологічне обладнання з паралельною кінематикою".

Подібне обладнання слід розглядати не як удосконалення існуючих верстатів традиційної компоновки, а як матеріальне втілення нетрадиційного підходу до побудови технологічних процесів високого рівня інтеграції операцій, а також нових принципів проектування сучасних верстатних систем.

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою має більш широкий спектр технологічних та функціональних можливостей, ніж традиційні верстати внаслідок забезпечення виконавчому органу до шести ступенів вільності, що дозволяє реалізувати майже усі схеми формоутворення поверхонь деталей та інші процеси виготовлення продукції на одному робочому місці, що значно підвищує рівень інтеграції операцій у порівнянні з верстатними системами традиційної компоновки.

Концепція проектування технологічного обладнання з паралельною кінематикою передбачає конструктивне виконання кінематичних ланцюгів у вигляді просторових стрижневих ферм, які мають незначну масу рухомих елементів, що обумовлює застосування надвисоких швидкостей та прискорень виконавчого органа [1]:

- частота обертання шпинделя досягає $120000-150000 \text{ хв}^{-1}$, а при процесах шліфування – $180000-200000 \text{ хв}^{-1}$;

- швидкість лінійних переміщень має величину до 100 м/хв , а прискорень – до 50 м/с^2 .

Подібні режими функціонування технологічних операцій значно підвищують продуктивність обладнання за рахунок суттєвого зменшення основного часу їх виконання.

Специфічною особливістю подібних верстатних систем, що відрізняє їх від технологічного обладнання традиційної компоновки, є реальна можливість виконання різноманітних методів обробки, складання, вимірювання та

випробування виробів на одному робочому місці при відсутності міжопераційних транспортних операцій.

Таким чином, використання технологічного обладнання з паралельною кінематикою, яке має високий рівень мобільності зміни технологічних функцій, є принципово новим вирішенням проблеми підвищення якості та продуктивності виготовлення машинобудівної продукції у специфічних умовах гнучкого багатомономенклатурного серійного виробництва.

1.2. Історія розвитку верстатів з паралельною кінематикою

Перша офіційна інформація про створення просторового паралельного механізму з'явилася у 1928 р. Д.Е. Гвиннетт (США) запропонував просторовий сферичний механізм для атракціонів індустрії розваг, побудований на принципах паралельного (одночасного) функціонування декількох кінематичних ланцюгів, які зв'язують рухомий та нерухомий елементи механізму з метою отримання заданого переміщення його ВО у просторі.

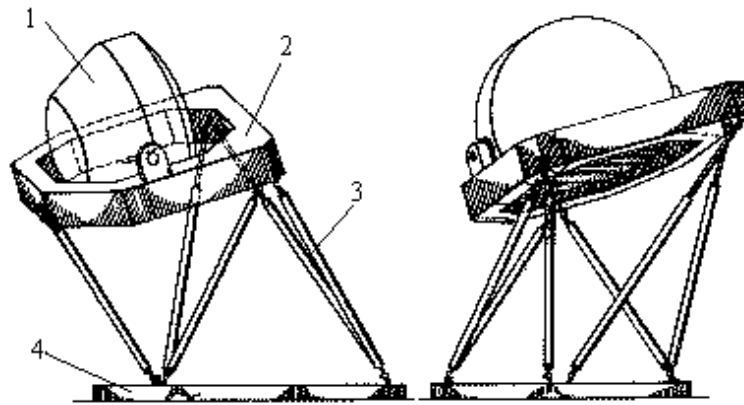
У 1934 р. У.Л.Г. Поллард (США) пропонує оригінальну конструкцію просторового механізму для розпилення фарби, який можна віднести до класу механізмів паралельної структури.

Інженер Ерік Гауф у 1947 р. побудував просторовий МПС з шістьма кінематичними ланцюгами для дослідження та випробування пневматичних коліс під дією навантажень. Відмінність цього механізму від уже існуючих на той час механізмів позиціонування з трьома горизонтальними та трьома вертикальними штангами змінної довжини полягає у їх симетричному розташуванні.

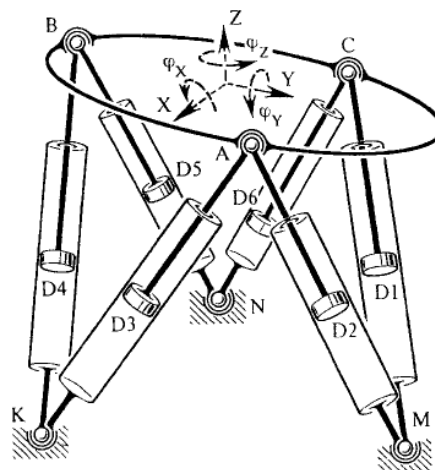
У 1964 р. К. Каппел запропонував механізм (рис. 1.1, а), побудований за принципом паралельного функціонування кінематичних ланцюгів, який складається з виконавчого органу 1, рухомої платформи 2, яка з'єднана з нерухомим стаціонарним блоком 4 за допомогою шести кінематичних ланцюгів 3, кожний з яких має індивідуальний лінійний привод. Задане положення ВО

реалізується шляхом зміни довжини кінематичних ланцюгів по відповідному закону.

У роботі Д. Стюарта (1965 р.) наведена конструкція та теоретичні дослідження просторового МПС (рис. 1.1, б). Задане положення ВО у ньому реалізується шляхом узгодженої зміни довжини кожного кінематичного ланцюга по відповідному закону.



а)



б)

Рис. 1.1. Шестикоординатні механізми паралельної структури: а) платформа Каппела; б) платформа Стюарта

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

ланки. Кожна кінематична ланка складається з відповідного механізму лінійних переміщень (пневмо-, гідро- або лінійний електропривід) та двох шарнірів (сферичного або універсального).

Фіксовані довжини кінематичних ланок однозначно визначають відносне положення усіх складових елементів механізму, які створюють досить жорстку просторову конструкцію. Змінюючи довжини (l) кінематичних ланок, можна змінювати відносне положення ВО у просторі, а також реалізувати будь-який заданий закон його переміщень шляхом математичного програмування.

Інтенсивний розвиток наукових досліджень та розробок конструкцій МПС розпочався з 80-х рр. минулого століття багатьма науковими центрами світу. МПС внаслідок своїх специфічних властивостей широко впроваджуються у різноманітне технологічне обладнання, космічну і ракетну техніку, робототехнічні системи, механізми орієнтації і позиціонування, застосовуються у медичній техніці, авіаційних та спортивних тренажерах та у індустрії розваг.

Концепція створення багатофункціональних та багатопоточних механізмів обумовлює створення МПС, що передбачає перехід до більш сучасних верстатних систем. Впровадження подібних механізмів у матеріалообробних верстатах надає їм нові якості: реалізація більшості технологічних операцій на одному верстаті одним ВО, змінюючи лише відповідний інструмент, та можливість отримання заданої геометричної форми поверхні за рахунок математичного програмування його рухів.

У 1986 р. вченими Новосибірського електротехнічного інституту створено дослідний верстат з ЧПУ [], побудований на основі механізму паралельної структури, з шістьма кінематичними ланками змінної довжини (гексапода) (рис. 1.2).

До складу верстата входять: шпиндельний вузол 1, шість електричних механізмів поступального руху, рухома платформа 2, основа 8, стіл. Електричні механізми поступального руху складаються з корпусу 6 та висувного елемента 5, з'єднаних шарнірами 3 та 9 відповідно з основою 8 та платформою 2, на якій

закріплено шпиндельний вузол 1. Основа 8 та тумба 7 стола, на якому закріплюється оброблювана деталь 4, виконані із армованого бетону. Шість приводів одночасно є механізмами подачу та несучими елементами, що працюють лише на розтяг-стискання, не зазнаючи навантажень згину.

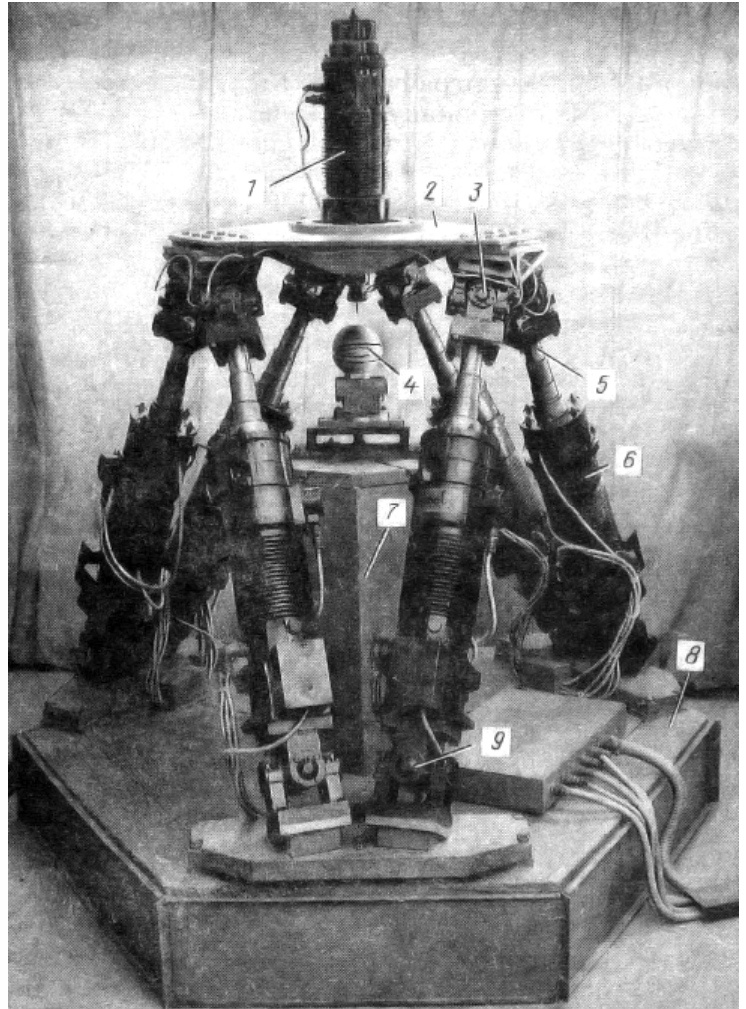
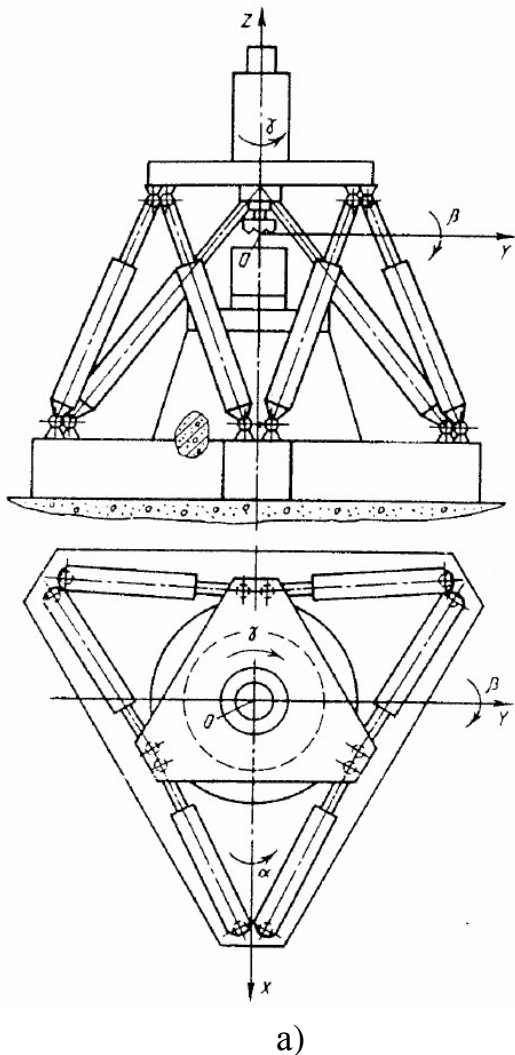


Рис. 1.2. Дослідний верстат Новосибірського електротехнічного інституту:
а) схема; б) зовнішній вигляд

Переміщення шпиндельного вузла здійснюється шляхом зміни довжин штанг за допомогою системи ЧПУ “УНІКОН-20”. Задана траєкторія шпинделя програмується у системі координат деталі, а його положення у будь-якій точці траєкторії може бути задано трьома лінійними координатами кінця інструмента та двома кутовими координатами, які визначають кут нахилу осі інструмента.

Таким чином, верстат може виконувати п'ятикоординатну обробку деталей складної конфігурації.

Технічні характеристики верстата

Найбільша маса оброблюваного виробу, кг 500

Найбільший розмір оброблюваної деталі,

що має форму, мм:

куба 250×250×250

призми 120×450×450

циліндра Ø600×120

Конус для кріплення інструмента в шпинделі за ГОСТ 15945-82.

.40

Хід гвинта штанги, мм 400

Максимальне переміщення шпинделя, мм:

по осям X та Y 760

по осям Z. 460

Максимальне зусилля подачі при лінійних переміщеннях, кН:

по осям X та Y 25

по осям Z. 40

Діапазон зміни робочої подачі:

лінійної по осям X та Y, мм/хв. 1.6-16000

те ж по осі Z, мм/хв 1.1-11000

кутової, градус/с 0,002-30

Кількість координат, що управляються одночасно. 6

Точність лінійного позиціонування, мкм 30

Точність кутового позиціонування, кут. с 20

Розміри верстата, мм 2000×2200×2300

Пізніше, у 1987 р. аналогічні розробки почала фірма Ingersoll (США), а фірми Gidding&Lewis (США) та Geodetic Technology International (Швейцарія) звернули увагу на подібне технологічне обладнання у 1988 р.

У 1994 році на International Manufacturing Technology Show у Чикаго фірмою Gidding&Lewis (США) представлено перший промисловий зразок верстата VARIAX (рис. 1.3). Верстат побудований у вигляді октаедра, що забезпечує високу міцність штанг та жорсткість верстата у цілому.

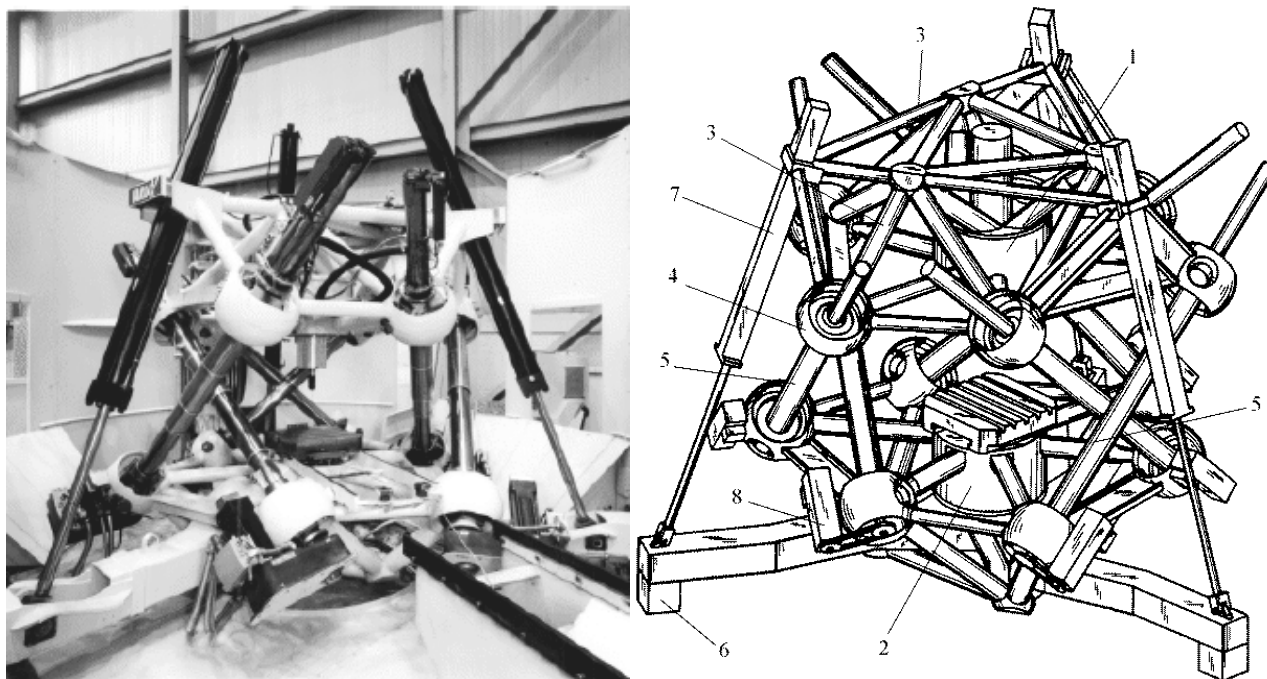


Рис. 1.3. Верстат мод. VARIAX фірми Giddings&Lewis (США)

Верхня (шпиндельна) 1 та нижня (з вбудованим робочим столом) 2 платформи з'єднані між собою кількома стійками 3. На перетинах цих стійок встановлені карданні шарніри 4, які зв'язують три пари взаємно перетинаючихся телескопічних штанг 5 з верхньою платформою. Верстат змонтований на спеціальних віброізолюючих подушках 6, розташованих на кінцях трьох штанг, виступаючих з нижньої платформи. Верхня платформа може переміщуватися у вертикальному чи горизонтальному напрямку, а також нахилитися на кут до 25° , що дозволяє позиціонувати шпиндель відносно шести осей координат. На нижній платформі верстата розташовані три газових демпфера 7, з'єднаних з верхньою платформою, які виконують роль противаг. У кожен з шести штанг вбудований індивідуальний привід 8 потужністю 6 кВт.

На верстаті можуть бути встановлені пристрої зміни заготовок, розміщені на пристроях-супутниках розміром 630×630 мм (час зміни не більше

як 10 с) та інструментів (час зміни – 6 с), а також 50-позиційний інструментальний магазин з поворотним маніпулятором.

Основною особливістю цього верстата є система обробки даних, яка дозволяє компенсувати зміну деяких його характеристик, що виникають у процесі експлуатації. Наприклад, теплові деформації впливають на довжину штанг. Тому у кожному штангу вбудований лазерний інтерферометр, який постійно контролює її довжину та передає отриману інформацію на ЕОМ системи управління. Після обробки інформації видається команда на збільшення чи зменшення кожної штанги, внаслідок чого шпиндель переміщується по заданій траєкторії. ЕОМ враховує також кінематичні та теплові похибки розмірів деталей верстата, які виникають внаслідок теплових деформацій або їх спрацювання, та вносить у довжини штанг відповідну корекцію.

За інформацією фірми-виробника, точність кожної координатної осі складає 10 мкм, що наближає верстат за цим параметром до координатних вимірювальних машин. Жорсткість верстата складає 175 Н/мкм. Швидкість установчих переміщень – 66 м/хв, а робочих – до 15 м/хв; зусилля подачі досягає 31,5 кН.

З початку 1990-х років розпочалася інтенсивна розробка, виробництво та впровадження технологічного обладнання з паралельною кінематикою у багатьох країнах світу, таких як США, Англія, Німеччина, Японія, Франція, Австрія, Італія та Росія. Вже в 1999 році на виставці ЕМО (Exposition mondiale de la Machine Outil – Міжнародна виставка верстатного обладнання) показано кілька промислових верстатів з паралельною кінематикою, і з того часу їх кількість невпинно зростає.

Науково-дослідні центри та проектні організації у галузі конструювання, проектування та дослідження принципово нового технологічного обладнання сформувалися на виробничих фірмах та в університетах практично усіх індустріально розвинених країн. Ними створені різноманітні за кінематичною

структурою, технологічними можливостями, кількістю ступенів вільності, компоновкою та конструктивним виконанням технологічне обладнання – роботизовані обробні центри, робототехнічні та вимірювальні системи, а також оригінальні конструкції пристроїв для орієнтації, позиціонування та маніпулювання на основі механізмів паралельної структури.

1.3. Механізми паралельної структури

1.3.1. Основні типи механізмів паралельної структури

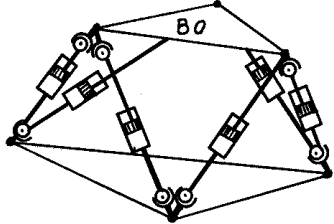
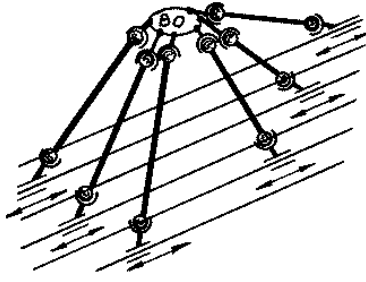
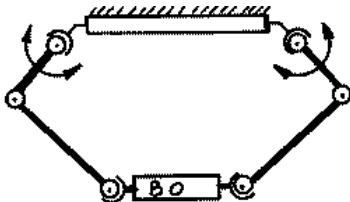
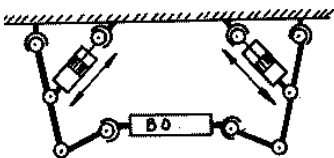
Аналіз наукових публікацій та патентів у галузі досліджень та проектування верстатів з паралельною кінематикою показує, що дослідники різних наукових центрів країн світу використовують різноманітні найменування та визначення, що обумовлює деяку невизначеність і навіть протиріччя у застосованих термінах, що свідчить про відсутність єдиної термінології. Найбільш поширеними найменуваннями подібних механізмів є: з паралельною структурою, платформеного типу, вищого класу, з паралельною топологією, з паралельним приводом, паралельні, паралельної структури, з паралельною кінематикою, з паралельними зв'язками.

Наведені найменування МПС, в основному, визначають їх фізичну сутність, кінематичну структуру та специфічні властивості, але з метою удосконалення термінології доцільно прийняти єдину назву. Термін "механізм паралельної структури" найбільш точно визначає фізичну сутність, взаємне розміщення та зв'язок складових елементів, специфічні властивості і принцип дії подібних механізмів.

Термінологія щодо верстатів з паралельною кінематикою (табл. 1.1).

Основні типи механізмів паралельної структури

Визначення	Схема
1	2
Біпод – двохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання двох штанг змінної довжини	
Біглайд – двохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання двох штанг постійної довжини, опорні шарніри яких переміщуються відносно напрямних	
Трипод – трьохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох штанг змінної довжини	
Тріаглайд – трьохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини, опорні шарніри яких переміщуються відносно напрямних	
Пентапод – п'ятикоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох основних та двох додаткових штанг змінної довжини	
Ортоглайд – трьохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини з ортогональним розташуванням напрямних, відносно яких переміщуються опорні шарніри	

1	2
Гексапод – шестикоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання шести штанг змінної довжини	
Гексаглайд – шестикоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання шести штанг постійної довжини, опорні шарніри яких переміщуються відносно шести напрямних	
Дельта – трьохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного з'єднання штанг, які виконані у вигляді паралелограмного механізму, а перетворення рухів реалізується шляхом примусового обертання опорних шарнірів, змонтованих на нерухомому стаціонарному блоку	
Ножиці – двохкоординатний матеріалообробний верстат з паралельною кінематикою, побудований на основі кінематичного V-подібного з'єднання двох прямокутних пластин, а перетворення рухів реалізується шляхом використання додаткових кінематичних ланок змінної довжини, шарнірно з'єднаних з рухомим та нерухомих елементами механізму	

1.3.2. Механізми з п'ятьма ступенями вільності

Механізми з 5 ступенями вільності також базуються на пасивних обмежувачах, особливій геометрії або конструкції. Вони особливо цікаві для застосування у верстатному обладнанні для п'ятикоординатної обробки,

оскільки 6 ступенів вільності не обов'язково потрібні для різання – обертання шпинделя додає шосту ступінь вільності.

Приклади механізмів з пасивними обмежувальними ланками [] показані на рис. 1.4. Такі механізми досить цікаві з точки зору жорсткості, яка приблизно дорівнює жорсткості відповідного механізму з 6 ступенями вільності, за винятком ступені вільності, обмеженої пасивною ланкою. Але робочий простір обмежується внаслідок взаємодії пасивної ланки з іншими.

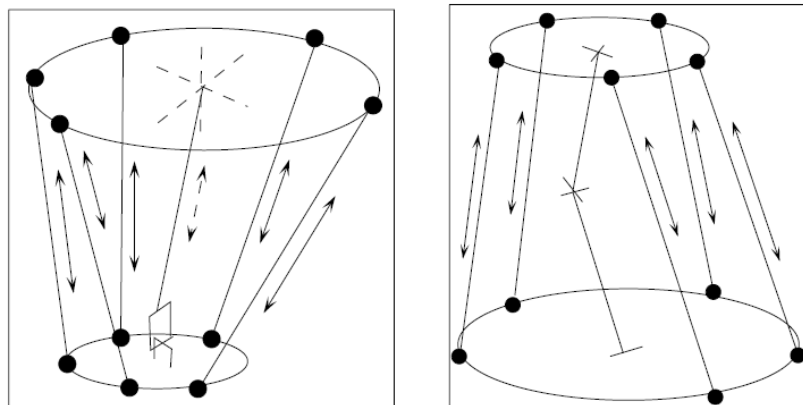


Рис. 1.4. Механізми з пасивними обмежувальними ланками

Інша можливість одержати 5 ступенів вільності – застосування приводної ланки, яка обмежує одну ступінь вільності платформи, як показано на рис. 1.5 [], [], або ж особливе розміщення шарнірів з метою обмежити обертання платформи відносно її осі (рис. 1.6).

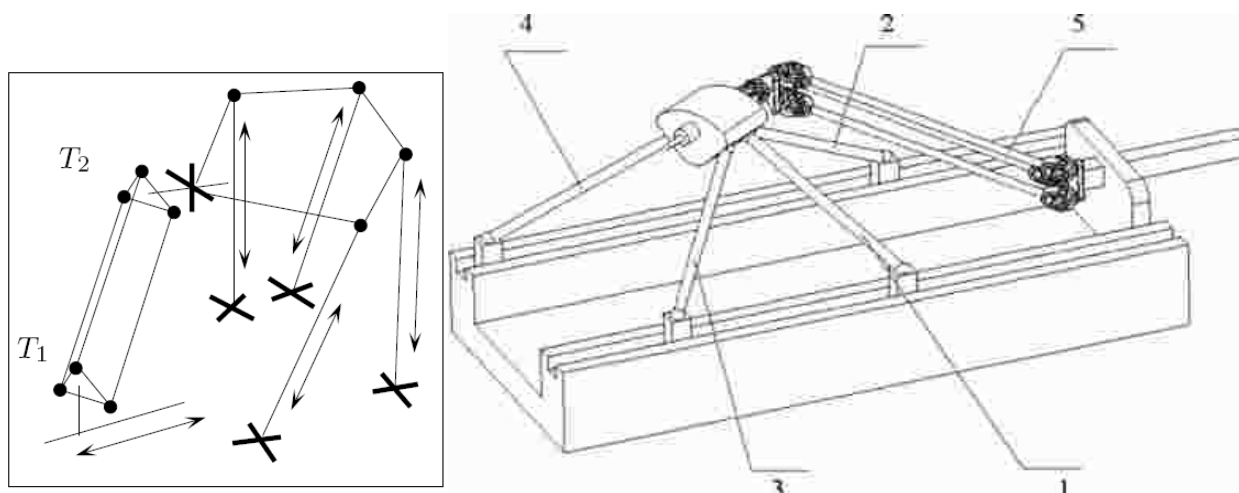


Рис. 1.5. Механізми обмежувальною приводною ланкою:
а) із штангами постійної довжини; б) із штангами змінної довжини

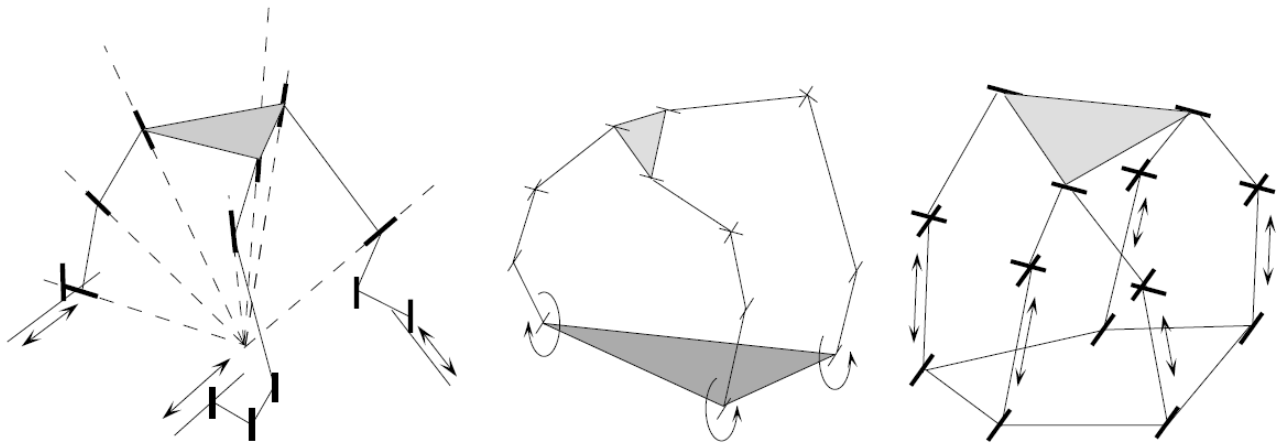


Рис. 1.6. Механізми, у яких особливе розміщення осей поворотних шарнірів виключає обертання платформи навколо її нормальної осі

1.4. Конструкції багатокоординатного обладнання з паралельною кінематикою

У якості прикладів багатокоординатного обладнання з паралельною кінематикою можна навести наступні конструкції верстатів.

В основу побудови технологічного обладнання з паралельною кінематикою та кінематичними ланками (штангами) змінної довжини покладено механізм поступального переміщення. Він складається з прецизійної кульково-гвинтової передачі, електродвигуна, вмонтованих датчиків швидкості і положення та електромагнітних пристроїв гальмування.

Технологічне обладнання з штангами змінної довжини може бути з трьома штангами (триподи), п'ятьма штангами (пентаподи) та з шістьма штангами (гексаподи).

Наприклад, технологічне обладнання з паралельною кінематикою типу гексапод містить чотири основні підсистеми:

1. нижня платформа або жорстка корпусна конструкція (несуча система) з вбудованим робочим столом для установки заготовок;
2. шість регульованих в осьовому напрямку штанг змінної довжини з індивідуальними приводами, які одним кінцем з'єднані з корпусом або нижньою платформою (несучою системою), а іншим – з рухомою інструментальною голівкою або інструментальним блоком;

3. інструментальна головка або шпиндельний блок з індивідуальним приводом головного руху;

4. ЕОМ для одночасного управління усіма координатами (крім того, необхідні системи управління частотою обертання шпинделя, подачею змащувально-охолоджувальної рідини та іншими допоміжними функціями).

В останні роки на міжнародних верстатобудівних виставках демонструється все більша кількість технологічного обладнання з паралельною кінематикою типу гексапод різних фірм. При єдиній концепції побудови технологічне обладнання різних фірм відрізняється компоновкою, конструктивним виконанням та розташуванням штанг у просторі, а також наявністю додаткових пристроїв.

Фрезерний верстат-гексапод моделі 6X фірми MIKROMAT (Німеччина) (рис. 1.7), розроблений спільно з розміщеним у м. Кемніц Фраунгоферовським інститутом верстатів та ковальсько-пресового обладнання, є першим німецьким представником технологічного обладнання з паралельною кінематикою.

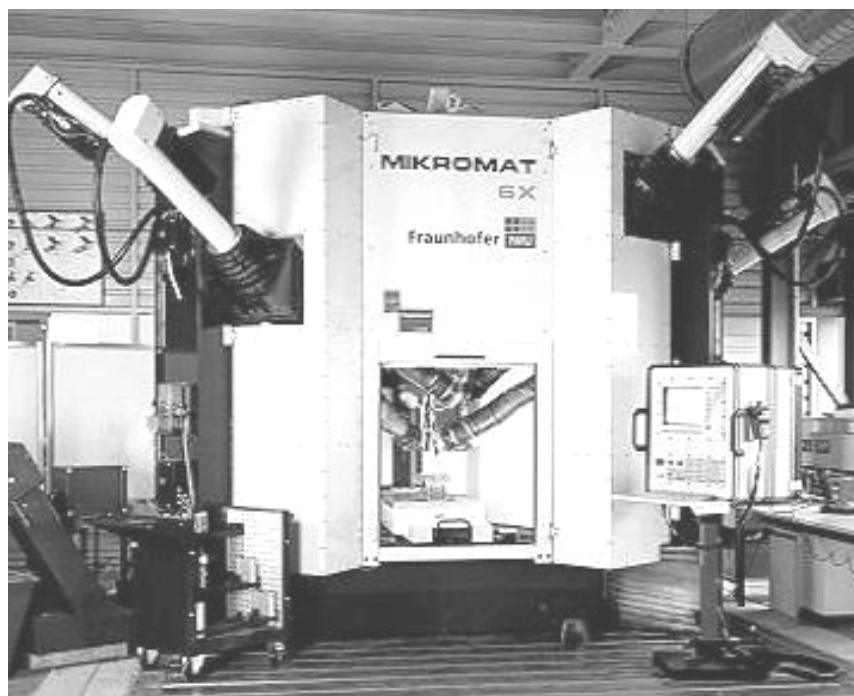


Рис. 1.7. Верстат-гексапод моделі 6X фірми MIKROMAT (Німеччина)

Верстат-гексапод моделі 6X (рис. 1.8) має шість штанг змінної довжини з вмонтованими у них лінійними вимірювальними системами. Регулювання довжини штанг виконується беззасорними кульково-гвинтовими парами від цифрових приводів фірми INDRAMAT. Заготовки зі сталі, чавуну, алюмінієвих та мідних сплавів встановлюються на робочому столі розміром 630×630 мм вантажопід'ємністю 1000 кг.

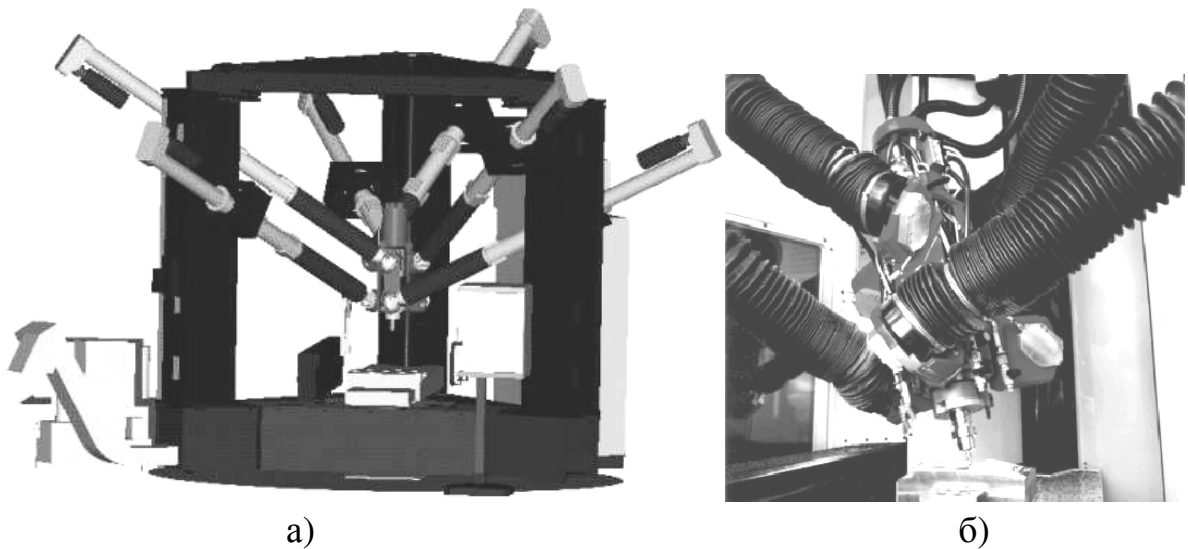


Рис. 1.8. Компонівка верстата-гексапода мод. 6X (а) і його робоча зона (б)

Розміри робочої зони (рис. 1.8, б) по осям X, Y, Z складають 630×630×630 мм. Мотор-шпиндель потужністю 16 кВт має можливість нахилу у середині робочої зони у будь-якому напрямку на кут до 30°, а по її межах – на кут до 15°. Він виготовляється з водяним охолодженням та за 1.5 с досягає максимальної частоти обертання 30 000 хв⁻¹. До частоти обертання 9000 хв⁻¹ крутний момент складає не менше 17 Н·м.

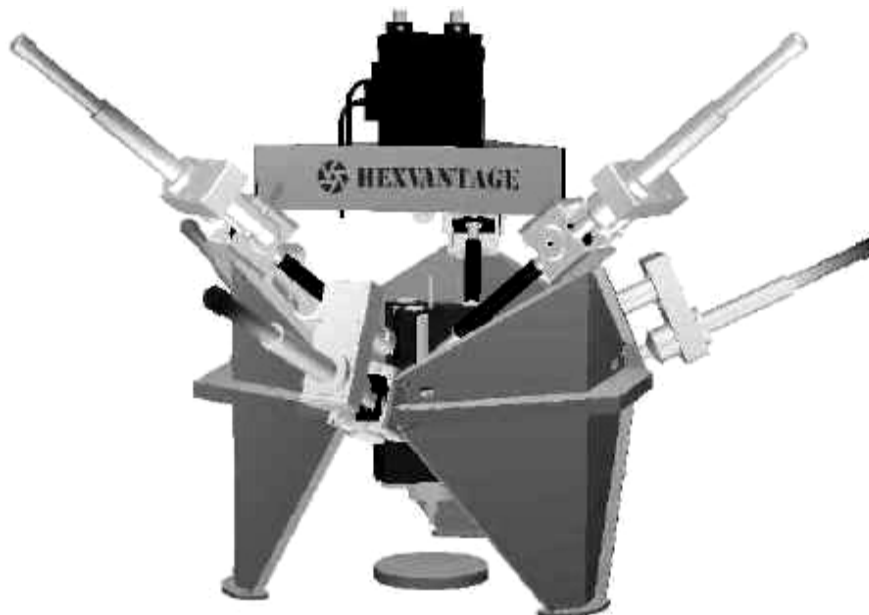
На верстаті встановлено пристрій ЧПУ мод. ANDRONIC 400 фірми ANDRON (Німеччина) з часом зміни кадрів 0.5 мс. Шестипозиційний інструментальний магазин дозволяє здійснювати напівчистову та чистову обробку складних фасонних інструментів, пресформ, штампів та гравюр. Діаметр фрез, які розміщуються у магазині, досягає 70 мм при довжині 200 мм та масі 5 кг. Зміна інструментів виконується за 6 с. Габаритні розміри верстата

(довжина × ширина × висота) становлять 5.4×6.2×4.0 м, а маса його не перевищує 11 т. Сумарна потужність усіх двигунів досягає 100 кВт·А.

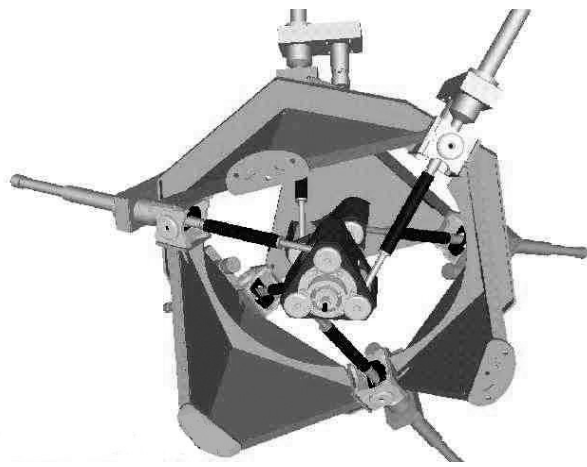
П'ятикоординатний верстат-гексапод мод. HEXVANTAGE фірми PATHFINDERS INCORPORATED (США) (рис. 1.9) призначений для обробки деталей з металу, пластмаси та інших матеріалів.

На верстаті мод. HEXVANTAGE можна оброблювати заготовки діаметром до 160 мм та висотою до 180 мм з точністю $\pm 0,0125$ мм. Максимальний кут нахилу шпинделя від вертикальної осі складає 15° . Максимальна подача виконавчого органу – 75 м/хв. Частота обертання шпинделя до 25000 хв^{-1} . Управління верстатом здійснюється від персонального комп'ютера.

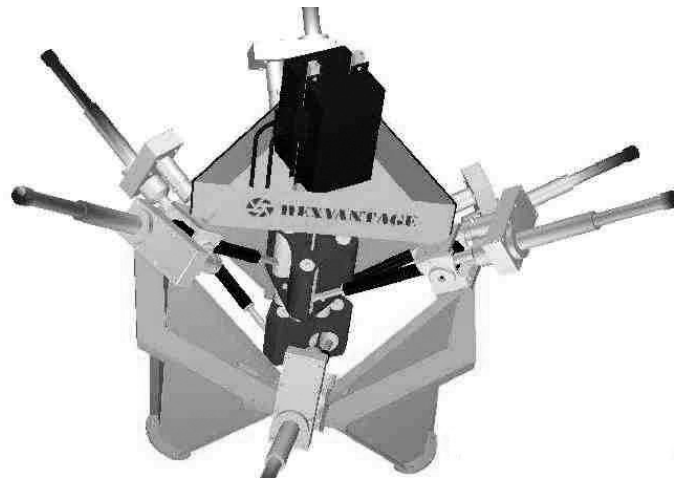
На відміну від верстата мод. VARIAX, у верстата мод. G500 (рис. 1.10) фірми GEODETIC (Великобританія) шпиндель встановлений на платформі значно менших розмірів та шарнірно зв'язаний з кінцями шести штанг, корпуси яких виготовлені з вуглепластика.



а)



б)

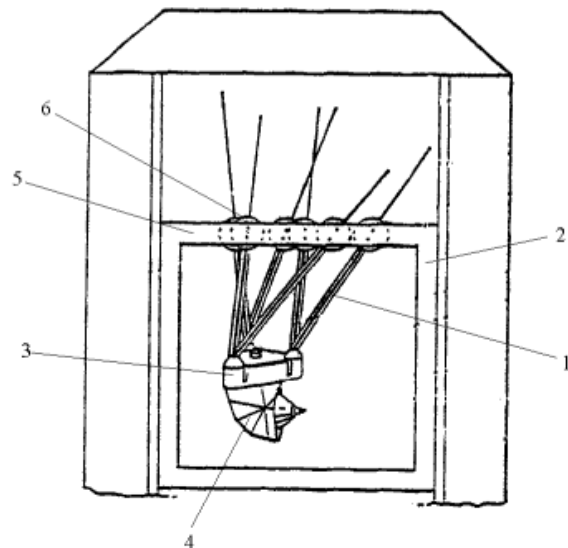


в)

Рис. 1.9. П'ятикоординатний верстат-гексапод мод. HEXVANTAGE фірми PATHFINDERS INCORPORATED (США) (а) і його робоча зона: б – вид знизу; в – вид зверху



а



б

Рис. 1.10. Верстат-гексапод мод. G500 фірми GEODETIC (Великобританія): а – загальний вигляд; б – схема

Штанги 1 (рис. 1.10, б) з'єднані з несучою системою 2 верстату, яка виконана у вигляді рами, а їх кінці виступають за її верхню частину. При функціонуванні верстата штанги входять у робочу зону або виходять з неї, що забезпечує відповідні переміщення шпиндельної платформи 3. Додаткові шарнірні з'єднання 4 забезпечують нахил шпинделя на кут до 90° . Крім того,

шпиндельна платформа також може нахилятися. На рамі, яка може бути встановлена на опорах різних типів, розташовані усі двигуни та механізми для переміщення штанг та шпиндельної платформи. На такому верстаті реалізується 8-координатна обробка деталей.

На верхній платформі 5 розташовані шість приводів 6, за допомогою яких забезпечується переміщення штанг. Кожний привод штанг має спеціальні сферичні втулки, вентильний електродвигун постійного струму, пристрій кодування сигналів управління.

Для з'єднання окремих елементів верстату призначені спеціальні затискувачі. Позиціонування одного елементу верстату відносно іншого забезпечується вводом трьох циліндрів, установлених на одному елементі, у три пари напівсферичних гнізд, розташованих на іншому елементі. Завдяки такій системі монтаж та демонтаж вузлів верстату може здійснюватись з точністю, яка досягає долей мікрометра. Це дозволяє вільно знімати відповідні модулі верстату для обслуговування або ремонту, а потім встановлювати їх практично без налагодження.

На шпиндельній платформі змонтовано декілька змінних шпинделів. Привод такого шпинделя здійснюється від вентильного електродвигуна постійного струму потужністю 4 кВт. Шпиндель має безступінчасте регулювання частоти обертання до 60000 хв^{-1} . Шпиндель установлений у керамічних підшипниках кочення та має примусове повітряне охолодження, яке також забезпечує видалення стружки та змащувально-охолоджувальної рідини з робочої зони.

Для синхронізації частоти обертання шпинделів передбачені два зубчастих редуктора, для взаємного навантаження яких служить спеціальний пристрій. Система управління верстатом складається з блоку управління переміщеннями виконавчих органів фірми DELTA TAU (Великобританія). Для забезпечення одночасного переміщення виконавчого органу відносно усіх осей

координат з точністю 25 мкм та прискоренням до 3g використовуються спеціальні алгоритми.

1.5. Мета і задачі роботи

Метою даної роботи є підвищення ефективності багатокоординатних верстатів комбінованої структури шляхом вибору раціональної компоновки на основі показників об'єму робочого простору.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні **задачі**:

1. розробка компоновки та кінематичної схеми багатокоординатного верстата комбінованої структури;
2. аналіз зворотних кінематичних залежностей механізму комбінованої структури;
3. дослідження впливу розташування карданних шарнірів на величину робочого простору;
4. аналіз роботи приводів при різних траєкторіях руху робочого органу.

Елементи наукової новизни роботи:

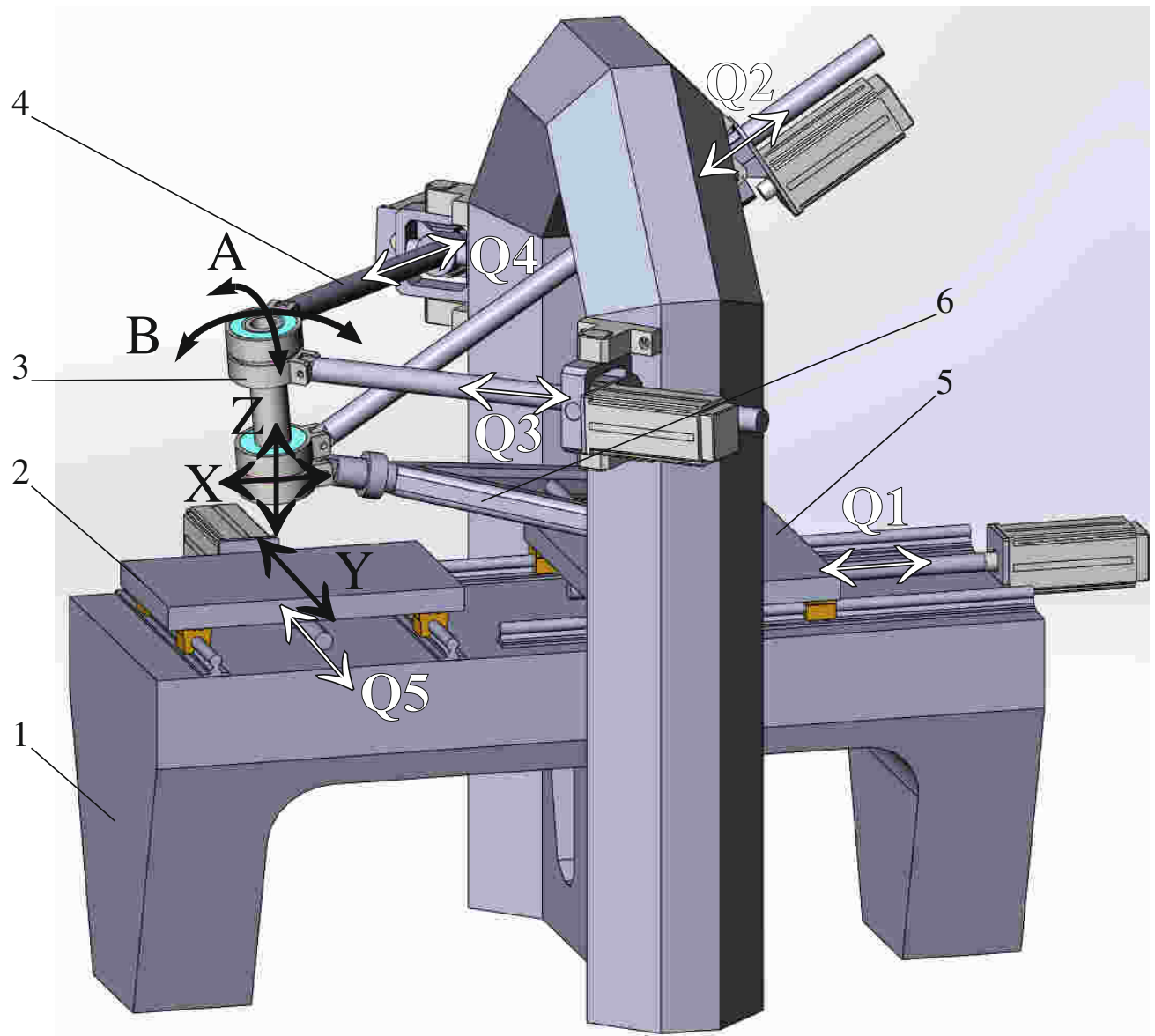
- проаналізовано роботу приводів при різних траєкторіях руху робочого органу;
- встановлено вплив конструктивних параметрів верстата комбінованої структури на величину робочого простору

2. КОНСТРУКЦІЯ І КІНЕМАТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ КОМБІНОВАНОГО МЕХАНІЗМУ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

2.1. Конструкція верстата з комбінованим механізмом паралельної структури

Спрощена модель п'ятикоординатного верстата з комбінованим механізмом паралельної структури зображена на рис. 2.1. Механізм складається з основи 1, по напрямним якої переміщується стіл 2 із заготовкою. Робочий орган 3 має чотири співвісні осі шпинделя шарнірні опори, три з яких під'єднані до штанг змінної довжини 4, шарнірно з'єднаних з основою, а четверта – до штанги постійної довжини 6, шарнірно приєднаної до повзуна 5.

Конструкція є подальшим розвитком пентапода, в якому робочий орган містить 5 шарнірів з співвісними осями. В даній конструкції використання штанг постійної довжини дозволяє відібрати в робочого органа додаткову ступінь вільності. Таким чином, механізм паралельної структури забезпечує чотирма приводами Q1-Q4 чотири ступені вільності робочого органа: дві поступальні X, Z та дві обертальні A, B. Поступальне переміщення заготовки по осі Z забезпечується за рахунок переміщення столу Q5.



1 - основа; 2 - стіл; 3 - робочий орган; 4 - штанга змінної довжини; 5 - повзун; 6 - штанга постійної довжини

Рис. 2.1. Схема верстата з комбінованим механізмом паралельної структури

2.2. Кінематичні залежності механізму

Розрахункова схема механізму зображена на рис. 2.2. З основою механізму зв'язана абсолютна система координат з початком координат у точці O , а з робочим органом з'єднана відносна рухома система координат з початком у точці O' .

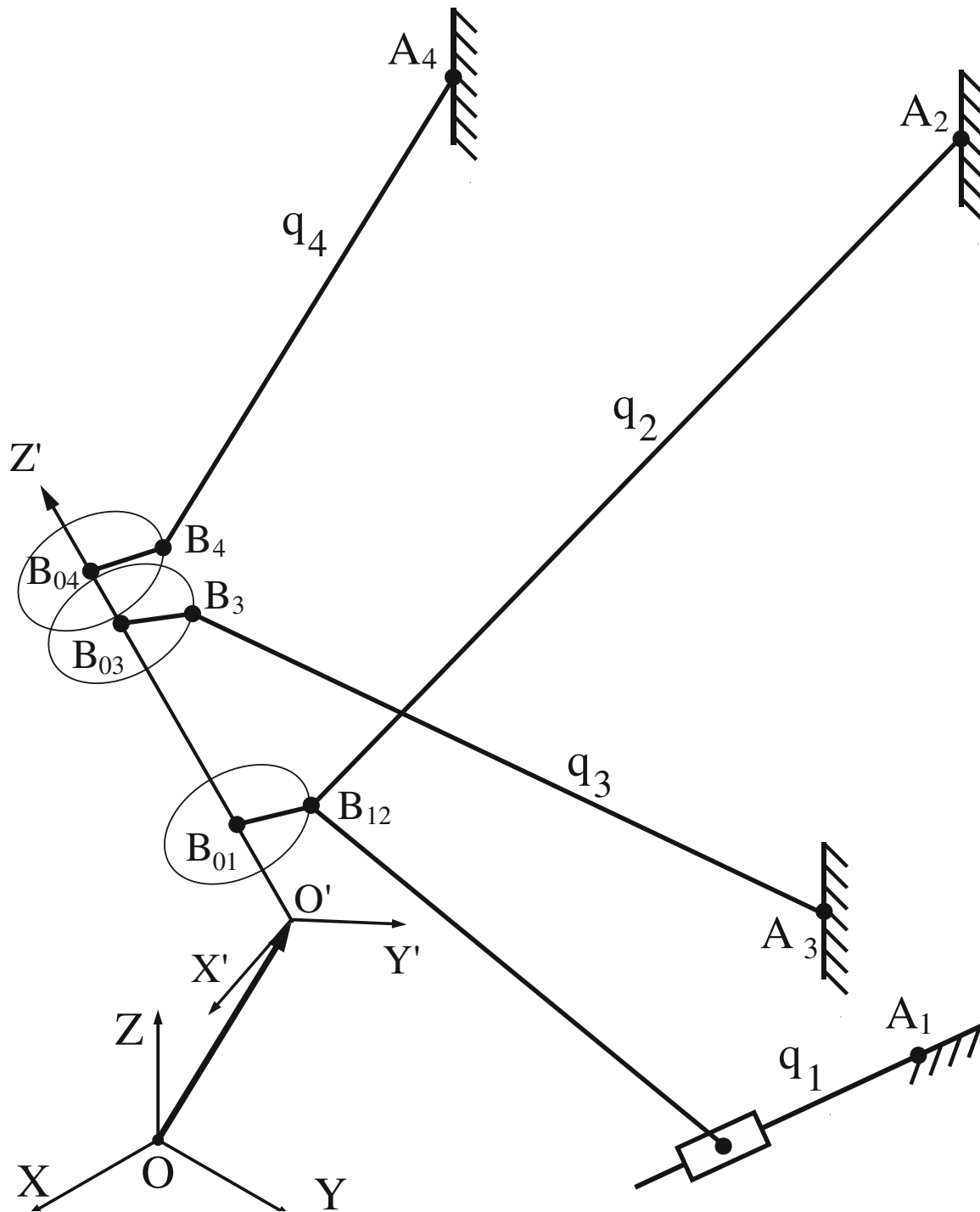


Рис. 2.2. Розрахункова схема механізму

Центри шарнірів основи розміщені в точках A_i , центри шарнірів рухомої платформи (робочого органа) – в точках B_i . Довжина штанг позначається l_i . Радіус-вектори точок A_i в абсолютній системі координат основи дорівнюють $\mathbf{ra}_i = (xa_i, ya_i, za_i)$, радіус-вектори точок B_{0i} у системі координат робочого органа дорівнюють $\mathbf{rb0}'_i = (0, 0, zb0_i)$, радіус-вектори точок B_i у відносній системі координат робочого органа дорівнюють $\mathbf{rb}'_i = (xb'_i, yb'_i, zb'_i)$, радіус-вектор початку координат робочого органа в системі координат основи $\mathbf{r0} = (x_0, y_0, z_0)$.

Координати шарнірів основи A_i в системі координат робочого органа можна визначити з векторного рівняння

$$\mathbf{ra}'_i = R^{-1} (\mathbf{ra}_i - \mathbf{r0}), \quad (2.1)$$

де $\mathbf{ra}'_i$ – радіус-вектор центра шарніра основи в системі координат робочого органа; $\mathbf{ra}_i$ – радіус-вектор центра шарніра основи в системі координат основи; R – матриця повороту системи координат робочого органа відносно системи координат основи (матриця напрямних косинусів, що встановлює зв'язок вектора в рухомій системі координат з цим самим вектором в нерухомій системі)

$$R = \begin{pmatrix} v1 & v2 & v3 \\ v4 & v5 & v6 \\ v7 & v8 & v9 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Матриця повороту є ортонормованою, тобто відповідає наступним умовам: сума квадратів елементів будь якого рядка матриці напрямних косинусів дорівнює одиниці; сума попарних добутків елементів двох рядків матриці напрямних косинусів дорівнює нулю. Будь-який елемент матриці

напрямних косинусів дорівнює власному алгебраїчному доповненню. Тільки три з напрямних косинусів можуть бути довільними, решта однозначно визначається ними.

Матриця повороту є ортонормованою, тобто відповідає наступним умовам: сума квадратів елементів будь якого рядка матриці напрямних косинусів дорівнює одиниці; сума попарних добутків елементів двох рядків матриці напрямних косинусів дорівнює нулю. Будь-який елемент матриці напрямних косинусів дорівнює власному алгебраїчному доповненню. Тільки три з напрямних косинусів можуть бути довільними, решта однозначно визначається ними.

Для визначення відносного просторового положення рухомої платформи можна скористатися кількома відомими варіантами кутів орієнтації. Наприклад, кутами Ейлера (рис. 2.3, а), які мають назву ψ – прецесії, ϑ – нутації, а φ – ротації.

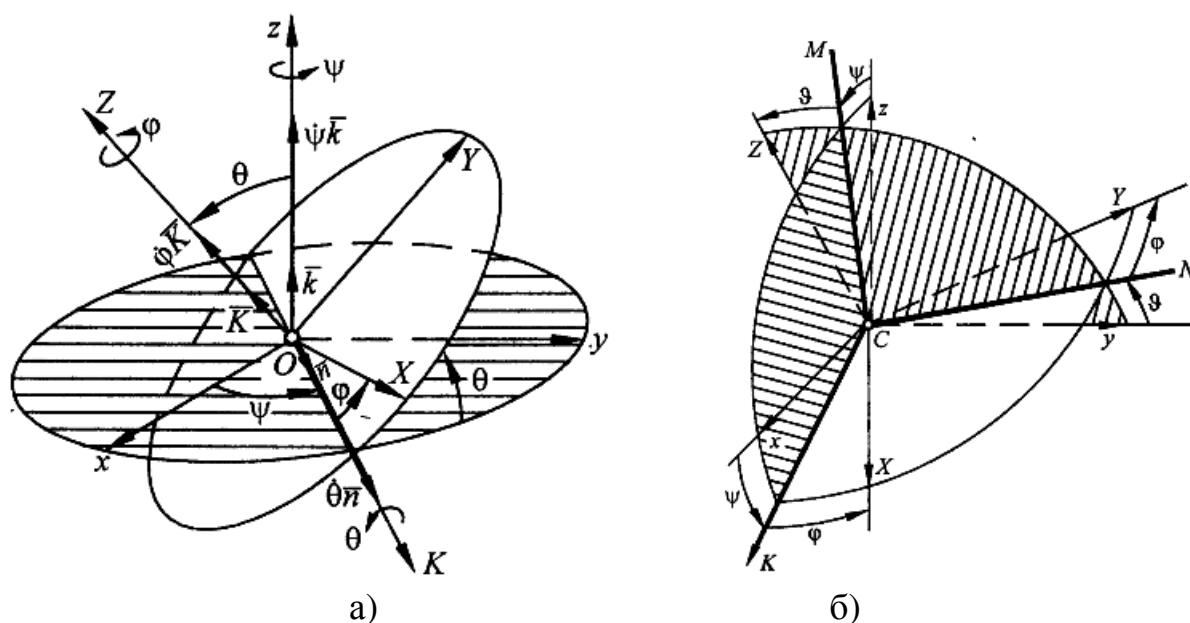


Рис. 2.3. Послідовність кутів орієнтації: а) Ейлера; б) Крилова

У прикладній механіці та теорії гіроскопів більше застосування знайшов інший тип послідовних поворотів – навколо кожної із трьох координатних осей, що характеризуються кутами Крилова (рис. 2.3, б). Перевагою кутів Крилова є симетричність. На відміну від кутів Ейлера, малому відхиленню від початкового положення завжди відповідають малі значення кутів Крилова.

Нехай система координат OXYZ, жорстко зв'язана з робочим органом, у початковому положенні співпадає своїми осями з осями нерухомої системи координат Oxyz. Тоді кути Крилова визначаються наступним чином: кут ψ – кут між віссю Cx та лінією ОК перетину координатних площин Oxz та OXY; кут φ – кут між лінією ОК та віссю OX; кут ϑ – кут між віссю OZ та лінією OM перетину площин Oxz та OZy.

Якщо OX – поздовжня вісь рухомого об'єкта, то кут φ характеризує поворот об'єкта у площині горизонту і називається кутом рискання, кут ψ визначає нахил поздовжньої осі об'єкта до площини горизонту і називається кутом тангажу (у літаках), або диференту (у надводних та підводних суднах), а кут ϑ визначає поворот об'єкта навколо поздовжньої осі і називається кутом крену.

Кути Ейлера відповідають наступній матриці повороту

$$R_E = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \cos \theta \sin \psi & -\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \theta \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \cos \theta \sin \psi & \cos \varphi \cos \theta \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi & -\cos \varphi \sin \theta \\ \sin \theta \sin \psi & \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

а кути Крилова

$$R_K = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \varphi & -\cos \vartheta \sin \varphi & \sin \vartheta \\ \cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \cos \varphi \sin \vartheta & \cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \sin \vartheta & -\sin \psi \cos \vartheta \\ \sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \sin \vartheta & \sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \sin \vartheta & \cos \psi \cos \vartheta \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Матриця повороту R має своїми стовпчиками одиничні вектори осей першої системи координат у другій системі координат. Строки матриці R – одиничні вектори осей другої системи координат у першій системі. Внаслідок цього зворотна матриця обертання дорівнює транспонованій $R^{-1} = R^T$. Визначник матриці повороту дорівнює нулю $|R| = 0$.

Знаючи координати точок A_i та B_{0i} в системі координат робочого органа, відповідно до схеми (рис. 2.4) можна визначити довжину штанги A_iB_i наступним чином

$$l_1 = \sqrt{\left(\sqrt{x_{Ai}^2 + y_{Ai}^2} - r\right)^2 + \left(z_{Ai} - z_{Bi}\right)^2}. \quad (2.5)$$

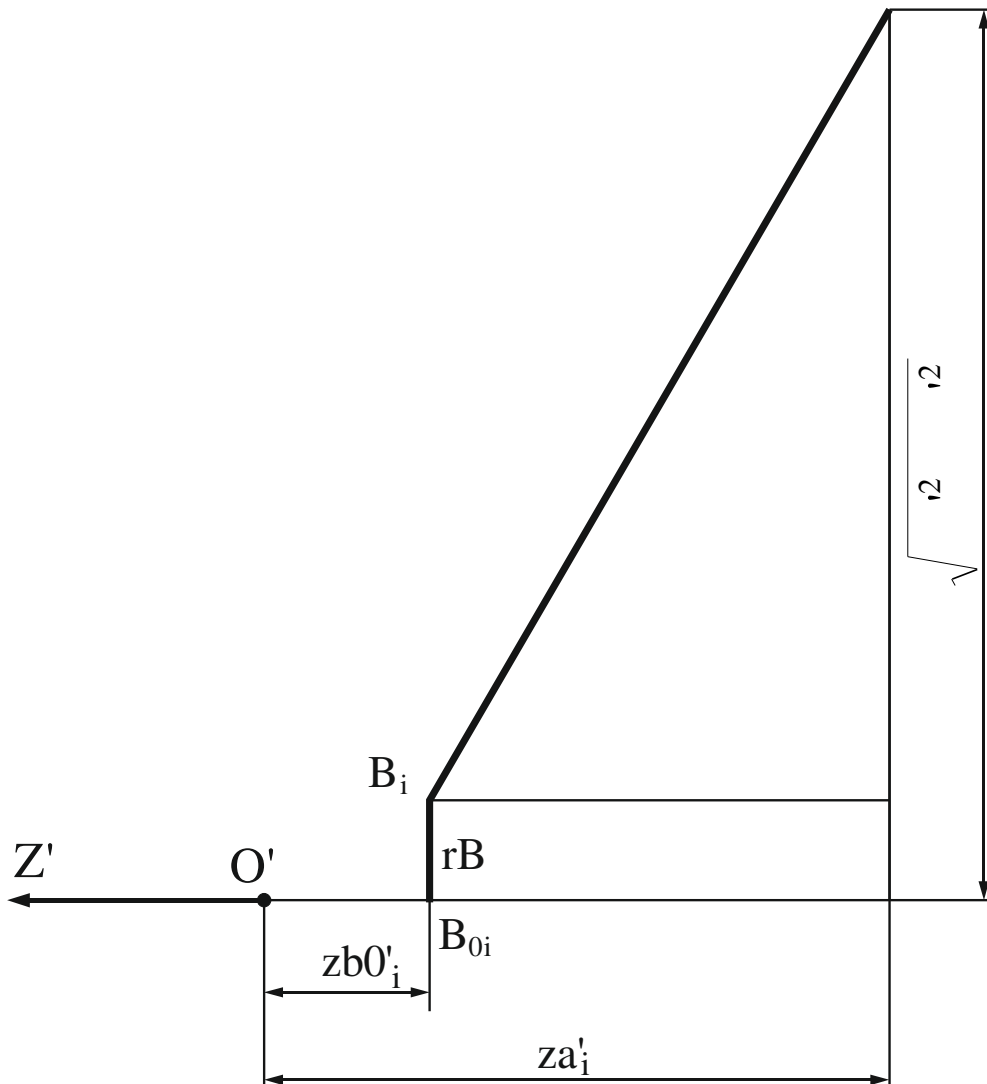


Рис. 2.4. Схема ланки змінної довжини

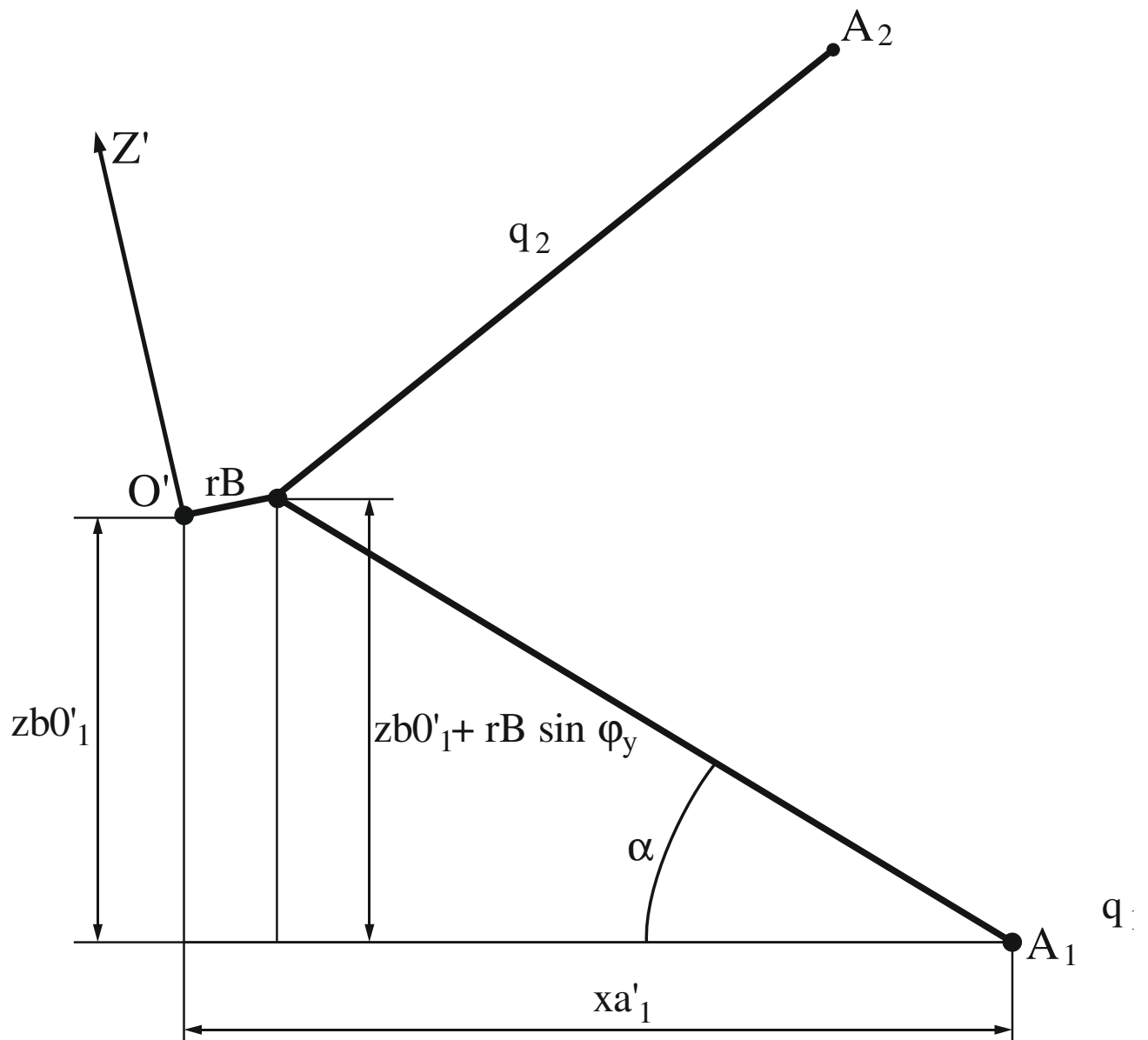


Рис. 2.5. Схема ланки постійної довжини

З пропорційності трикутників можна встановити, що

$$zb1'_i = zb_i - \frac{(za_i - zb_i) \cdot rB}{\sqrt{x_{Ai}^2 + y_{Ai}^2} - rB}. \quad (2.6)$$

Тоді радіус-вектор точки перетину осі штанги з віссю $O'z'$

$$\mathbf{rb1}'_i = (0, 0, zb1_i). \quad (2.7)$$

В системі координат основи він приймає вигляд

$$\mathbf{rb1}_i = R\mathbf{rb1}'_i + \mathbf{r0}. \quad (2.8)$$

Тоді одиничний вектор осі штанги дорівнює

$$\mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{rb1}_i - \mathbf{ra}_i}{|\mathbf{rb1}_i - \mathbf{ra}_i|}. \quad (2.9)$$

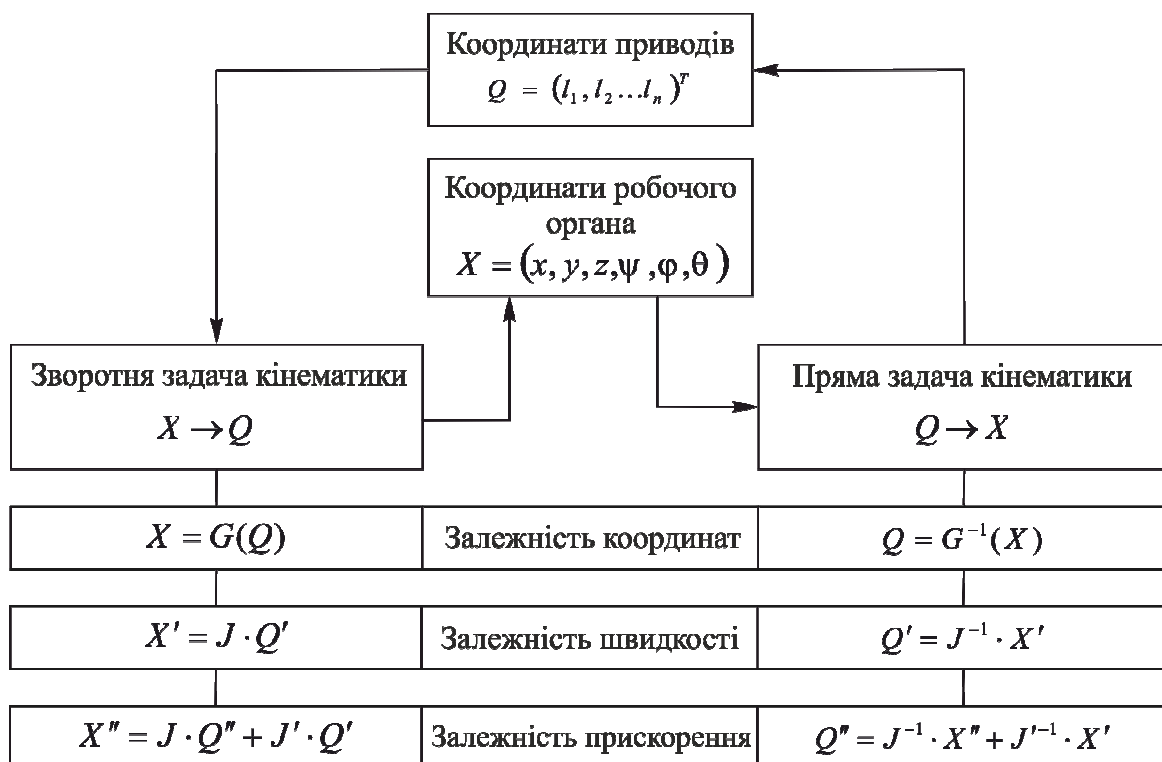
Визначення величини переміщення приводу штанги постійної довжини зводиться до розв'язку прямокутного трикутника (рис. 2.5):

$$l_2 = rA + \sqrt{q_1^2 - \left(\left(z - zb1 \right) + rA \cdot \sin \left(\varphi \right) \right)^2} - x \quad (2.10)$$

3. АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ

3.1. Основні положення

Внаслідок специфічної побудови обладнання з механізмами паралельної структури йому властива нелінійна залежність між положенням приводів та робочого органа. У зв'язку з цим виникають задачі визначення координат робочого органа за відомим положенням приводів (пряма задача кінематики) та визначення координат приводів за відомими координатами робочого органа (зворотна задача кінематики) (рис. 3.1).



J - яacobіан кінематичних залежностей; J^{-1} - зворотний яacobіан.

Рис. 3.1. Кінематичні залежності

Просторові координати робочого органа у загальному випадку представляють собою вектор узагальнених координат $\mathbf{X} = (x, y, z, \varphi, \psi, \theta)^T$, що задає положення та орієнтацію робочого органа, а координати приводів

звичайно задаються у вигляді вектора $\mathbf{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$, що містить положення кожного приводу.

3.2. Зворотні кінематичні залежності

Графіки залежностей довжини штанг від координатних переміщень робочого органа, побудовані у відповідності до залежностей (2.5 та 2.10), показані на рис. 3.2 – 3.5.

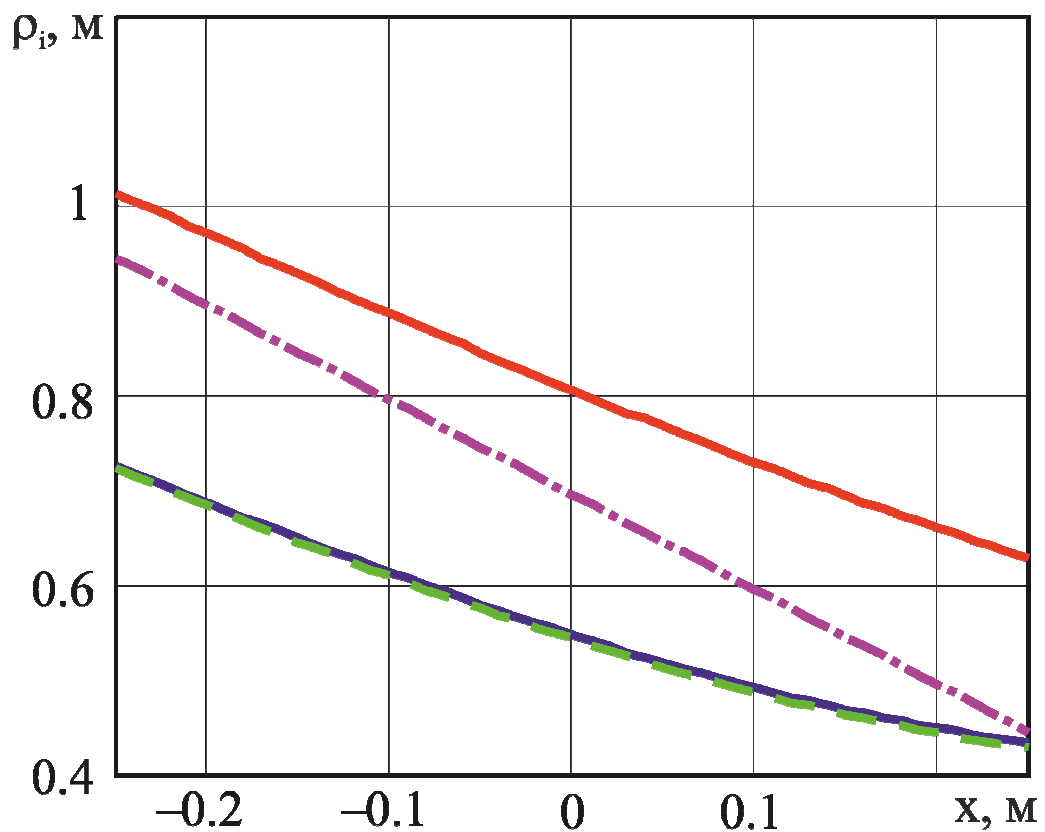


Рис. 3.2. Залежність довжини ланок від переміщення робочого органа по координаті X

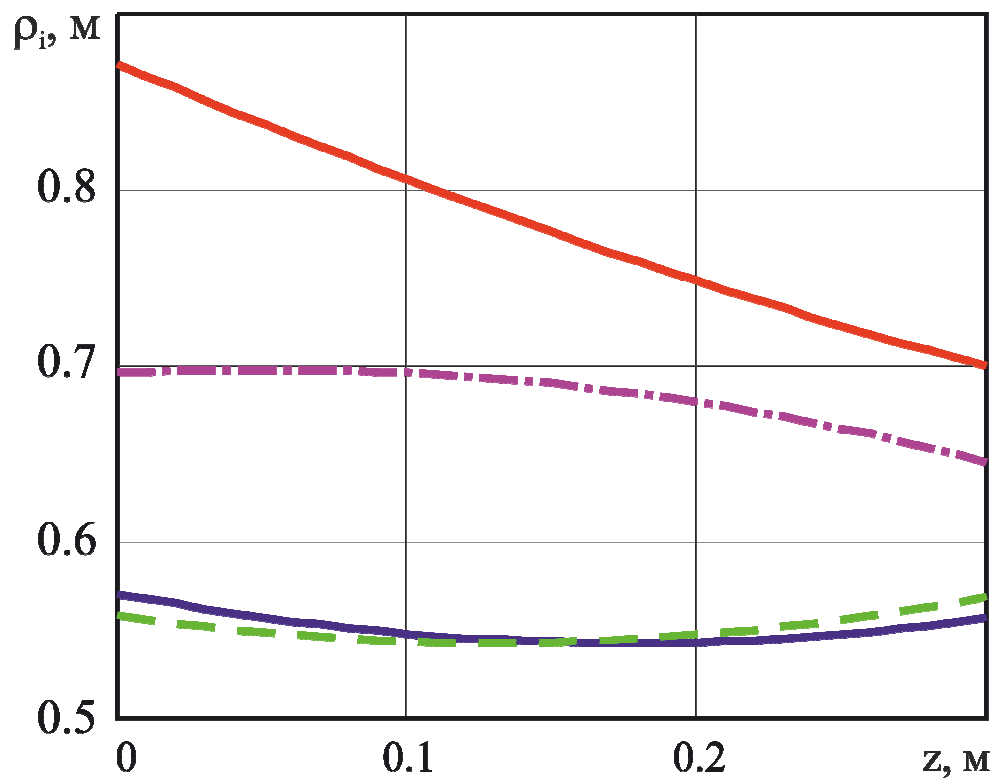


Рис. 3.3. Залежність довжини ланок від переміщення робочого органа по координаті Z

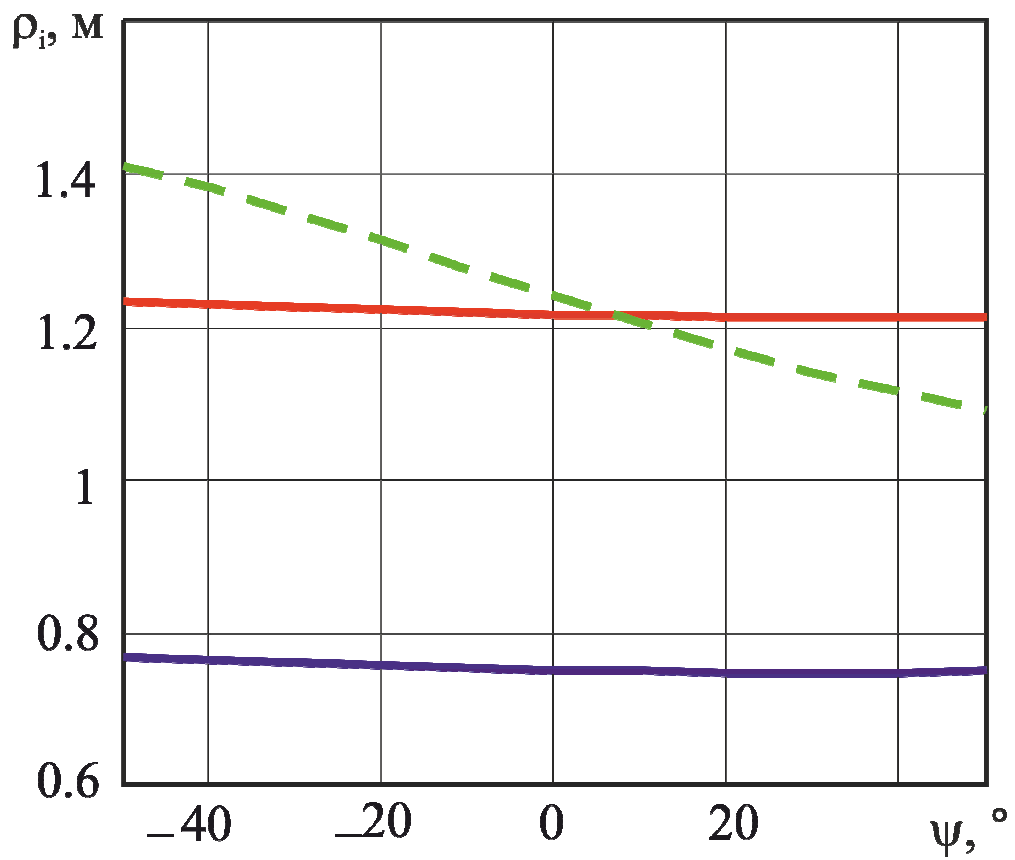


Рис. 3.4. Залежність довжини ланок від повороту робочого органа навколо осі X

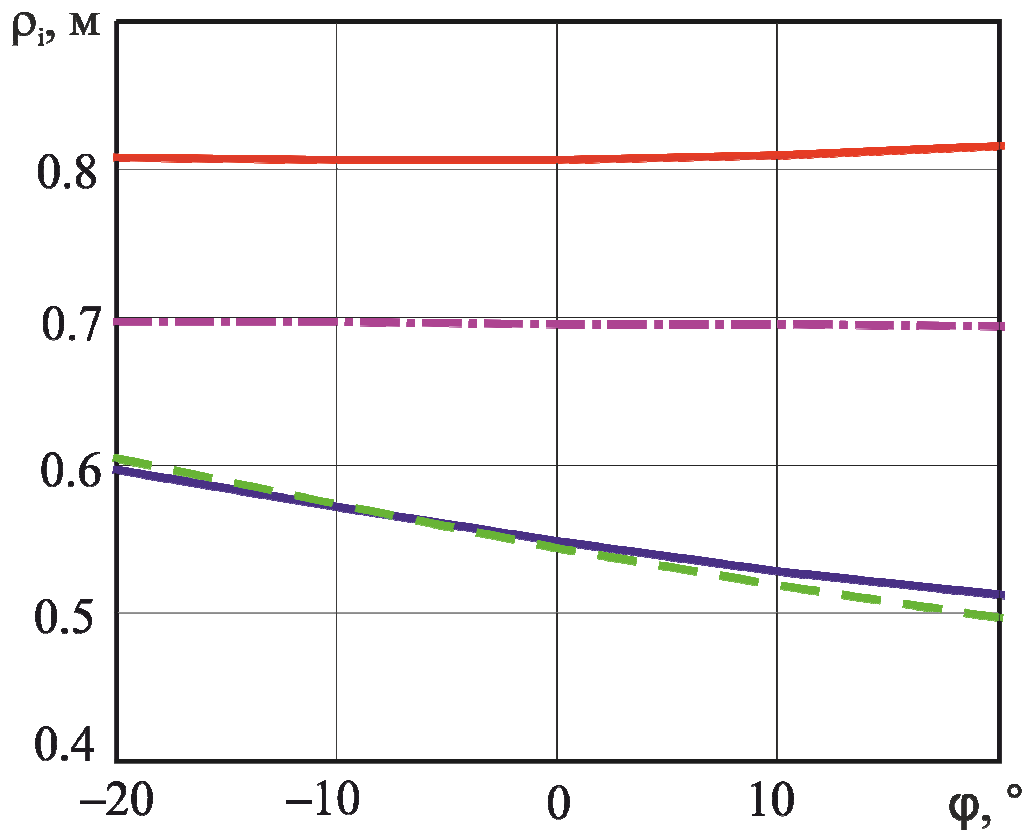


Рис. 3.5. Залежність довжини ланок від повороту робочого органа навколо осі Y

Аналіз наведених залежностей показує, що максимальна зміна довжини штанг спостерігається при переміщенні робочого органа у напрямку координати X, а мінімальна зміна довжини штанг відповідає повороту навколо осі Y.

3.3. Аналіз робочого простору багатокоординатних верстатів комбінованої структури

При конструюванні верстату, одним з основних критеріїв є габарит оброблюваної деталі, в залежності від її величини визначається величина потрібного робочого простору. На відміну від технологічного обладнання традиційної компоновки, форма робочого простору технологічних машин з паралельними приводами представляє собою складну об'ємну фігуру [1]. Особливості робочого простору обладнання з комбінованою кінематикою: неправильна геометрична форма; залежність від розміщення полюсу

інструмента відносно шарнірних опор робочого органа; залежність від просторової орієнтації робочого органа.

До основних факторів, що обмежують робочий простір можна віднести:

- геометрія механізму паралельної структури;
- передача сил та швидкостей;
- особливі положення;
- жорсткість.

Відомі наступні види робочого простору [10]:

- з постійною орієнтацією (руховий простір) – усі можливі положення центру інструмента із заданою орієнтацією робочого органа;
- орієнтувальний – усі орієнтації робочого органа при заданому положенні центру інструмента;
- максимальний робочий простір – усі положення центру інструмента, які можуть бути досягнуті хоча б при одній орієнтації робочого органа;
- включний орієнтаційний – усі положення центру інструмента, які можуть бути досягнуті хоча б з одною орієнтацією серед набору, заданого діапазонами кутів орієнтації;
- сукупний орієнтаційний – усі положення центру інструмента, які можуть бути досягнуті з усіма орієнтаціями серед набору, заданого діапазонами кутів орієнтації;
- спритний – усі положення центру інструмента, для яких можлива будь-яка орієнтація робочого органа;
- скорочений сукупний орієнтаційний – усі положення центру інструмента, які можуть бути досягнуті з кутами орієнтації, що лежать у певних межах, при довільних значеннях інших.

Для верстатів з комбінованою кінематикою найбільш важливими є робочий простір з постійною орієнтацією (руховий простір) та сукупний орієнтаційний простір.

Задача визначення робочого простору обладнання з паралельною та комбінованою кінематикою вирішується кількома шляхами [1]:

1. Математичне формулювання рівнянь кривих та поверхонь, які обмежують робочий простір;
2. Чисельне дискретне визначення граничних точок або усіх точок робочого простору за допомогою перевірки точок з певним кроком у заданому об'ємі.
3. Графічна побудова робочого простору як ліній перетину певних поверхонь.

Робочий простір з постійною орієнтацією може бути одержаний будь-яким з цих методів, але скорочений сукупний орієнтаційний простір багатокоординатного обладнання на сьогодні можливо визначити лише другим методом. Для одержання високої точності потрібно вибирати малий інтервал дискретизації, що призводить до необхідності перевірки належності до робочого простору десятків і сотень тисяч точок. Оскільки перевірку у кожній точці необхідно провести для заданого набору орієнтацій робочого органа (десятки наборів), загальне обчислення вимагає виконання мільйонів операцій і потребує значних витрат часу навіть на потужних ЕОМ.

В той же час, сучасні пакети САПР (наприклад, КОМПАС-3D фірми Аскон, Solidworks, CATIA фірми Dassault Systemes) забезпечують широкі можливості геометричного моделювання просторових тіл довільної форми, їх перетворення та деформації, логічних операцій перетину, віднімання, додавання тощо. Використання цих засобів для визначення робочого простору підвищить зручність розробки обладнання з механізмами паралельної структури.

В роботі [11] наведений простий метод побудови робочого простору обладнання з механізмами паралельної структури за допомогою сучасних пакетів САПР, з врахуванням геометричних обмежень на довжину ланок та кути повороту шарнірних опор, який дозволяє одержати робочий простір з постійною

орієнтацією робочого органа, а також сукупний орієнтаційний простір для обладнання з кількістю ступенів вільності більше трьох.

Для встановлення кращого варіанту по проектуванню багатокоординатних верстатів комбінованої структури було розглянуто кілька компоновок з різним розташуванням шарнірів на нерухомій платформі. Дані конструкції будуть досліджуватися по об'єму робочого простору із застосуванням графічного методу.

Перший варіант компоновки багатокоординатного верстата комбінованої структури зображено на рис. 3.6.

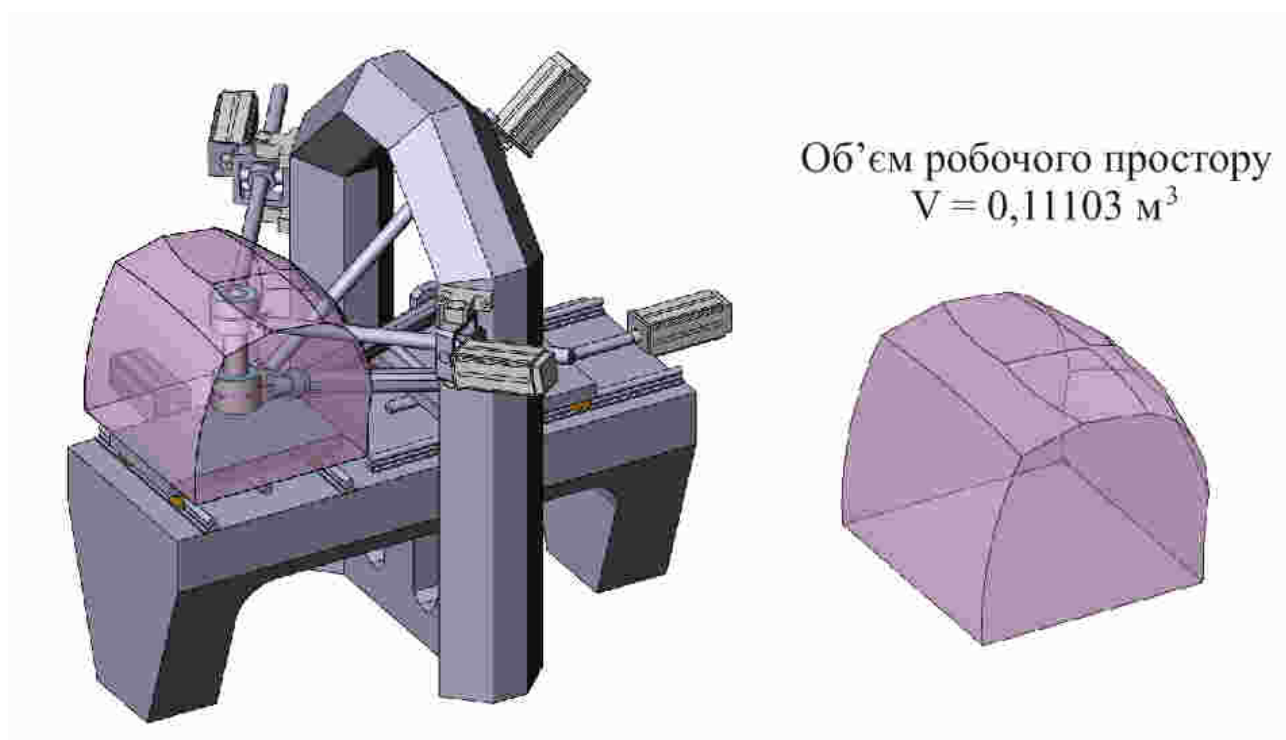


Рис.3.6. Перший варіант компоновки

Другий варіант компоновки багатокоординатного верстата комбінованої структури зображено на рис. 3.7.

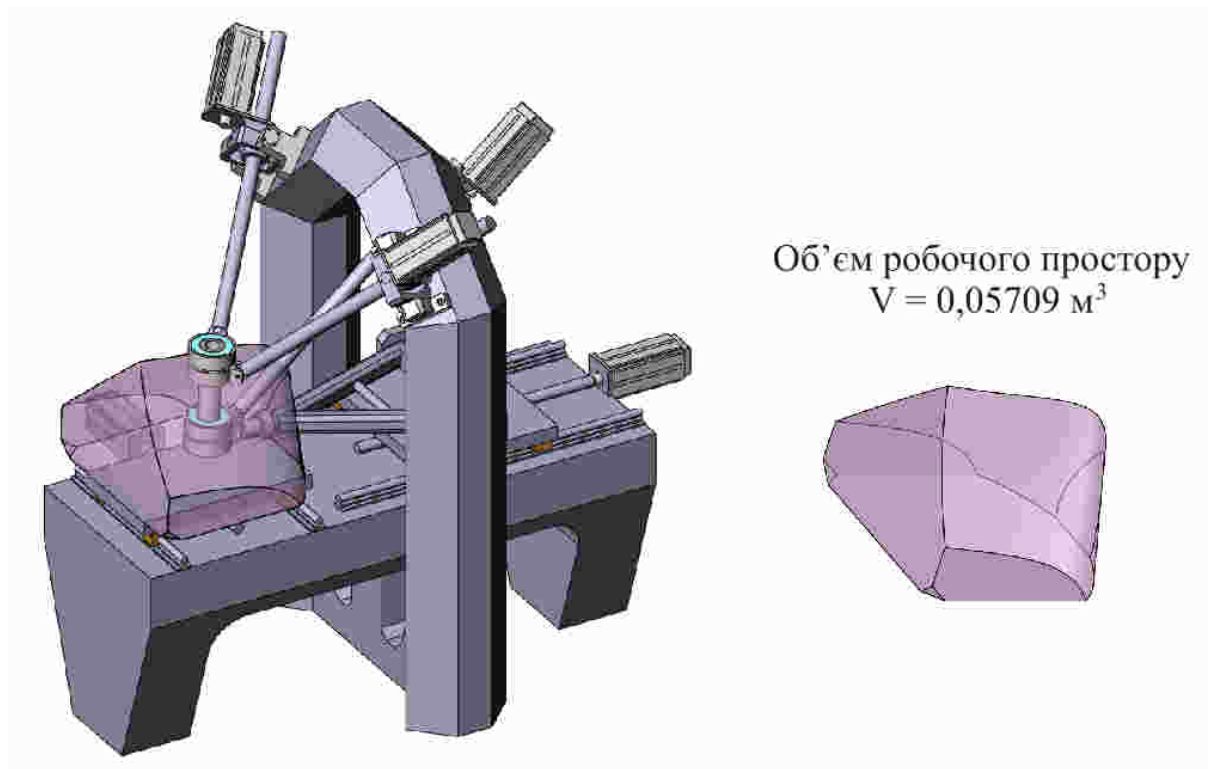


Рис.3.7. Другий варіант компоновки

Третій варіант компоновки багатокординатного верстата комбінованої структури зображено на рис. 3.8.

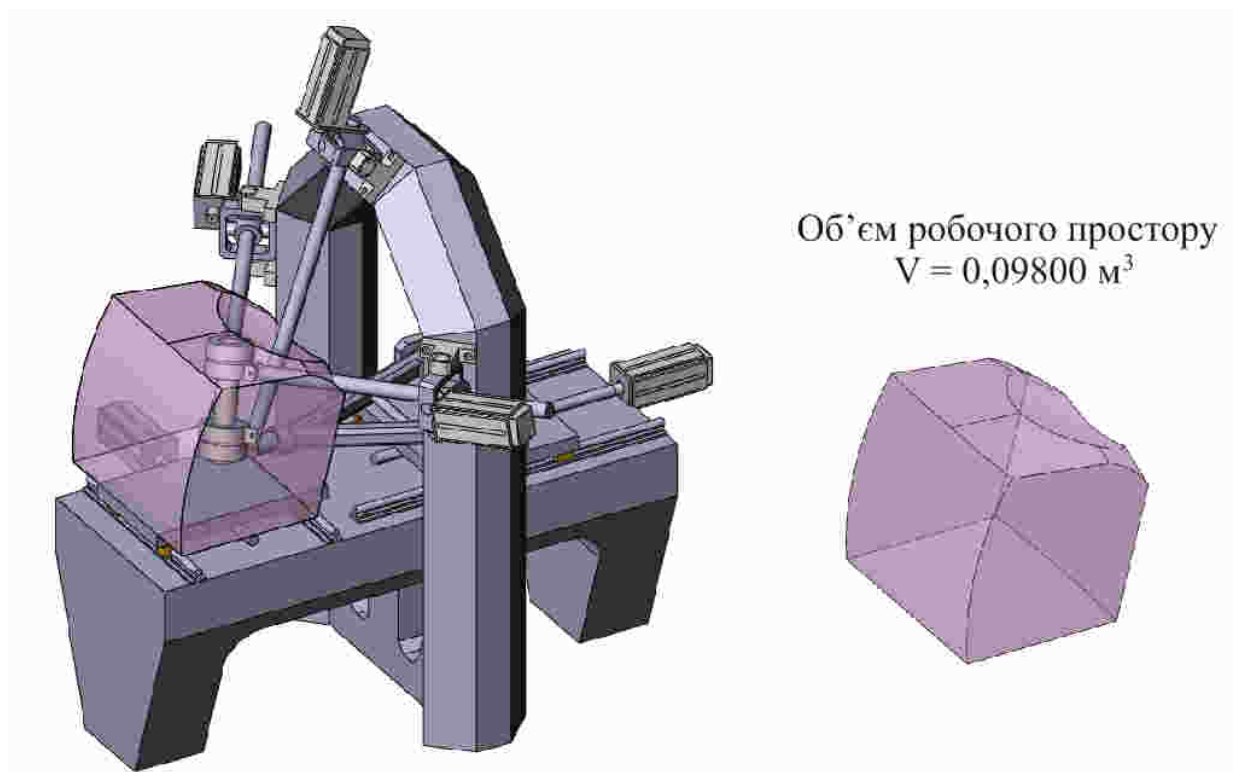


Рис.3.8. Третій варіант компоновки

Аналіз приведених результатів показує, що за величиною робочого простору кращою конструкцією є перша, що в порівнянні з конструкцією 2 та 3 дозволить обробку більш габаритних деталей.

Таким чином, для виготовлення дослідного зразка багатокоординатного верстата комбінованої структури доцільно використовувати варіант компоновки 1, що має кращі характеристики робочого простору.

3.4. Моделювання роботи верстата

Для оцінки точності відпрацювання координатних переміщень робочого органу за заданими траєкторіями руху проведено моделювання за допомогою пакету COSMOS Motion. Тобто, на основі отриманих зворотних кінематичних залежностей, в програмному середовищі для математичних розрахунків розроблено відповідні програми, які через формати сумісності з пакетом COSMOS Motion, задають відповідні траєкторії переміщення робочого органу.

За результатами проведеного моделювання отримано траєкторії руху робочого органу і графіки залежності роботи приводів від переміщення робочого органу по заданим траєкторіям.

3.4.1. Колові траєкторії

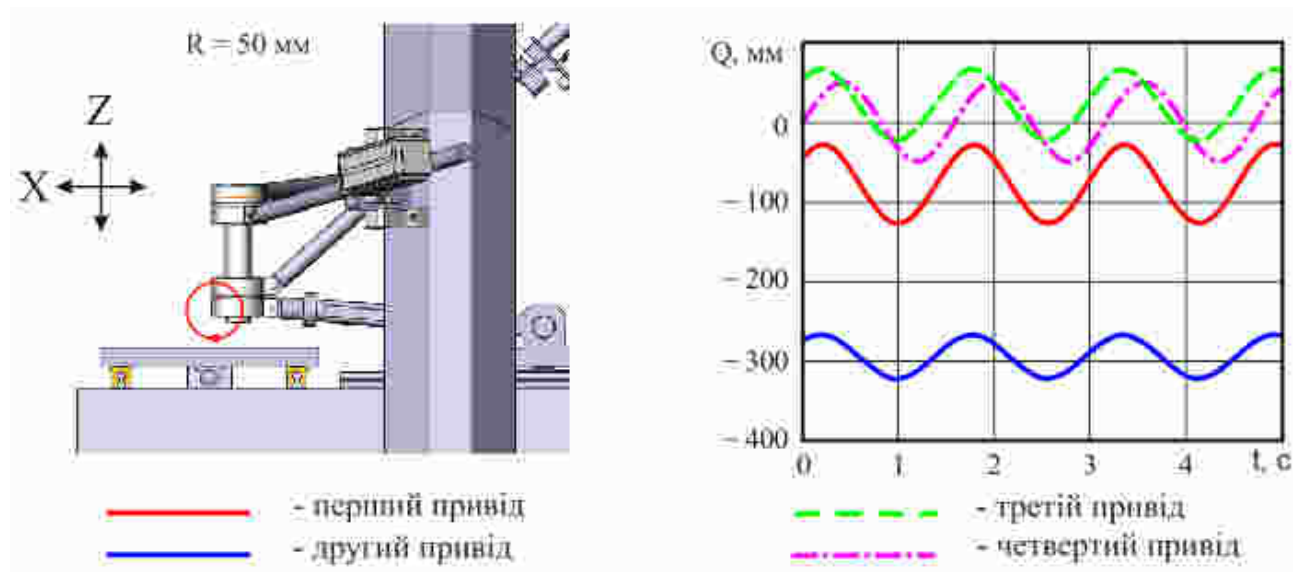


Рис. 3.9. Залежність роботи приводів від переміщення робочого органу по коловій траєкторії $R = 50 \text{ mm}$.

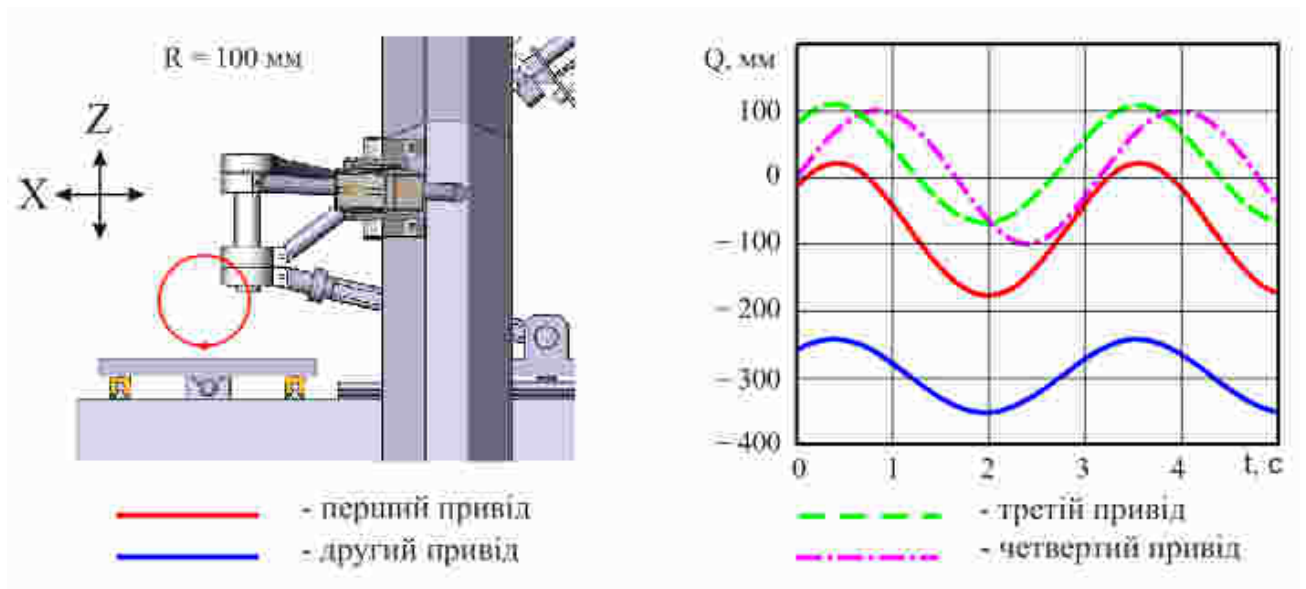


Рис. 3.10. Залежність роботи приводів від переміщення робочого органа по коловій траєкторії $R = 100 \text{ mm}$.

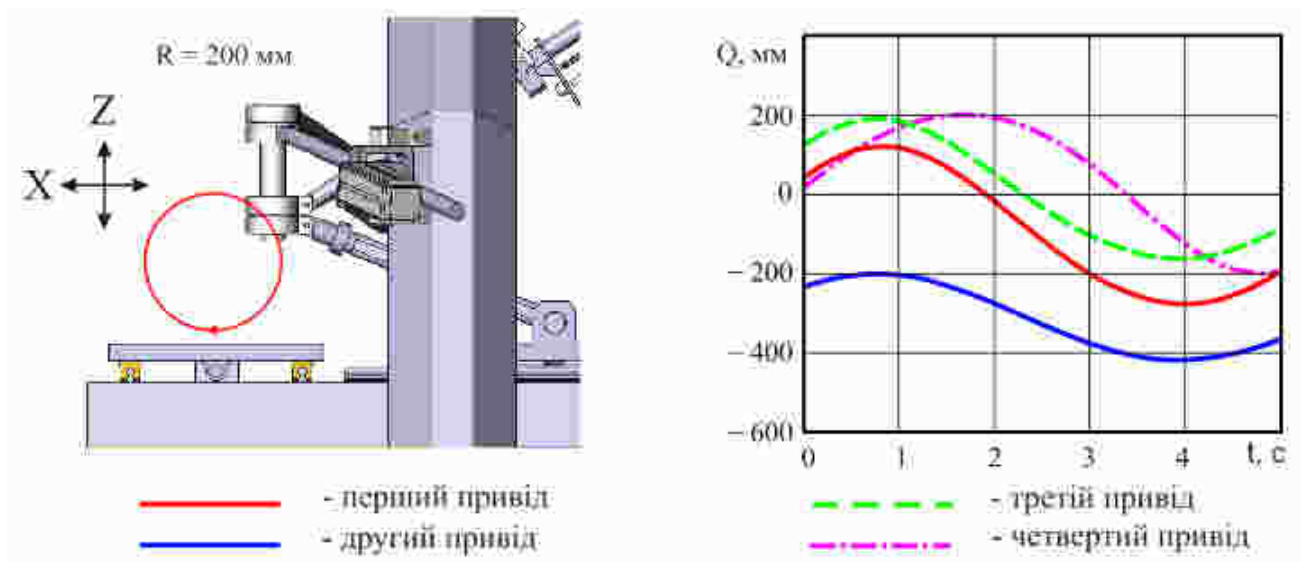


Рис. 3.11. Залежність роботи приводів від переміщення робочого органа по коловій траєкторії $R = 200 \text{ mm}$.

В результаті отриманих залежностей видно, що при відпрацюванні колових траєкторій робочого органу амплітуда роботи третього та четвертого приводів наближається до величини радіуса. Амплітуда другого привода на 10% менше, а першого привода на 10% перевищує величину радіуса траєкторії робочого органу.

3.4.2. Лінійні траєкторії

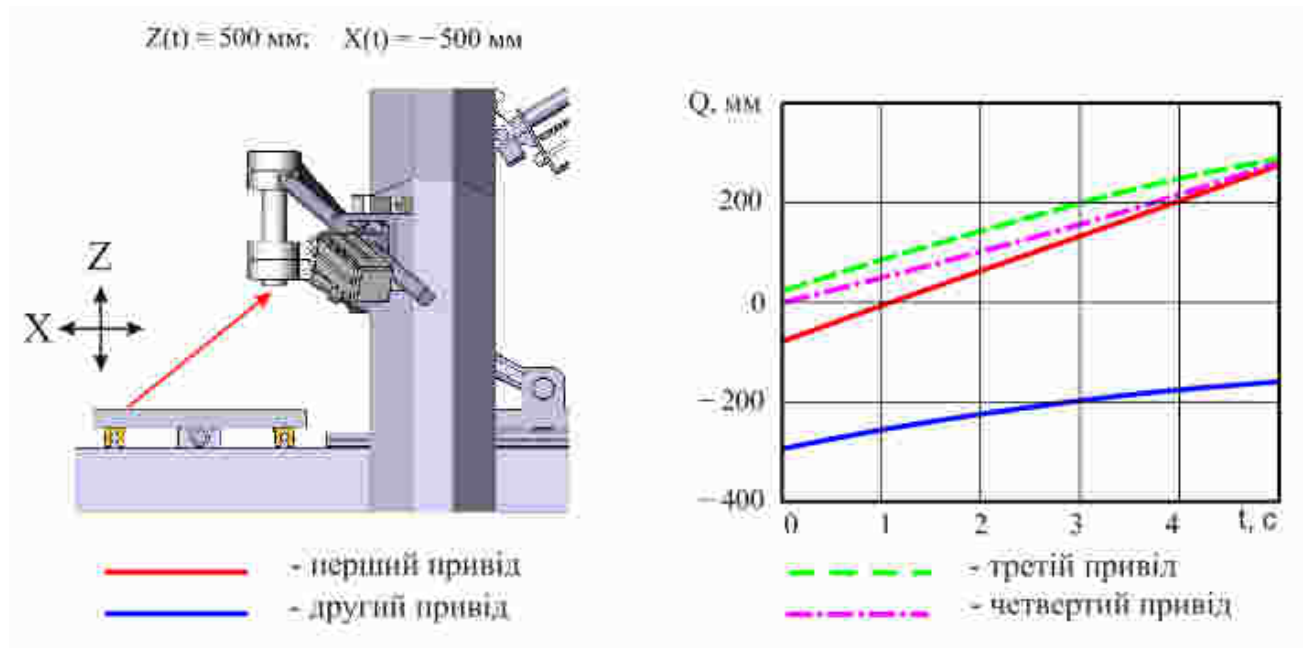


Рис. 3.12. Залежність роботи приводів від переміщення робочого органа по лінійній траєкторії $Z(t) = 500 \text{ мм}; X(t) = -500 \text{ мм}$

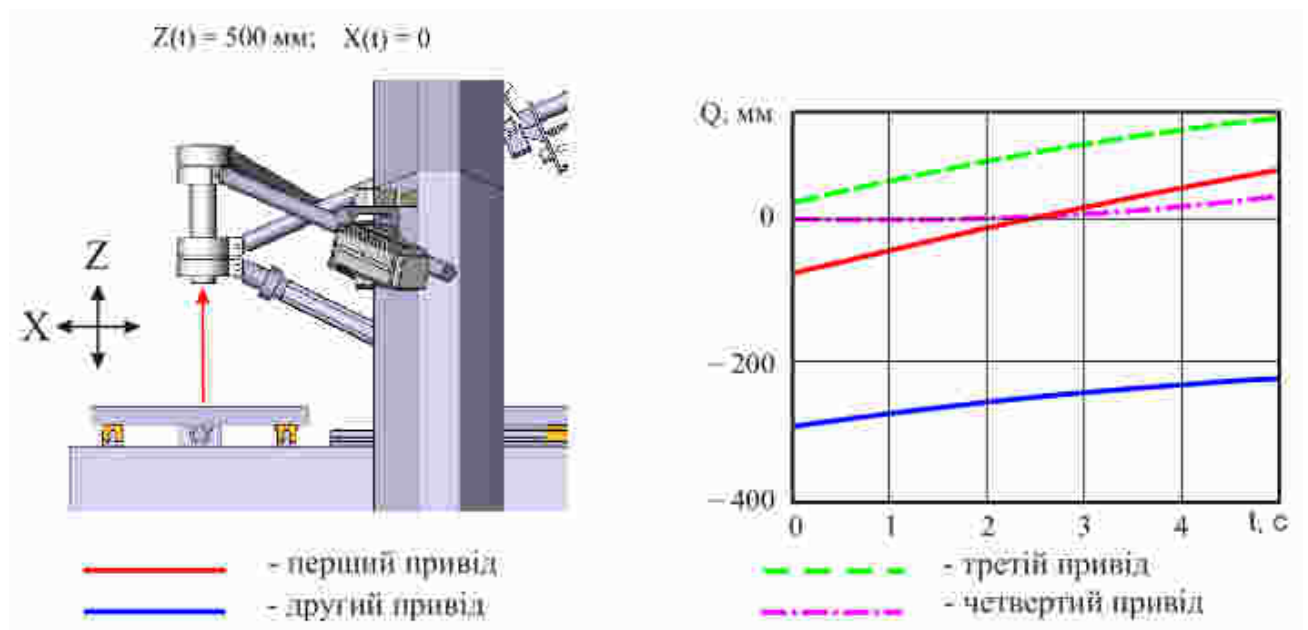


Рис. 3.13. Залежність роботи приводів від переміщення робочого органа по лінійній траєкторії $Z(t) = 500 \text{ мм}; X(t) = 0$

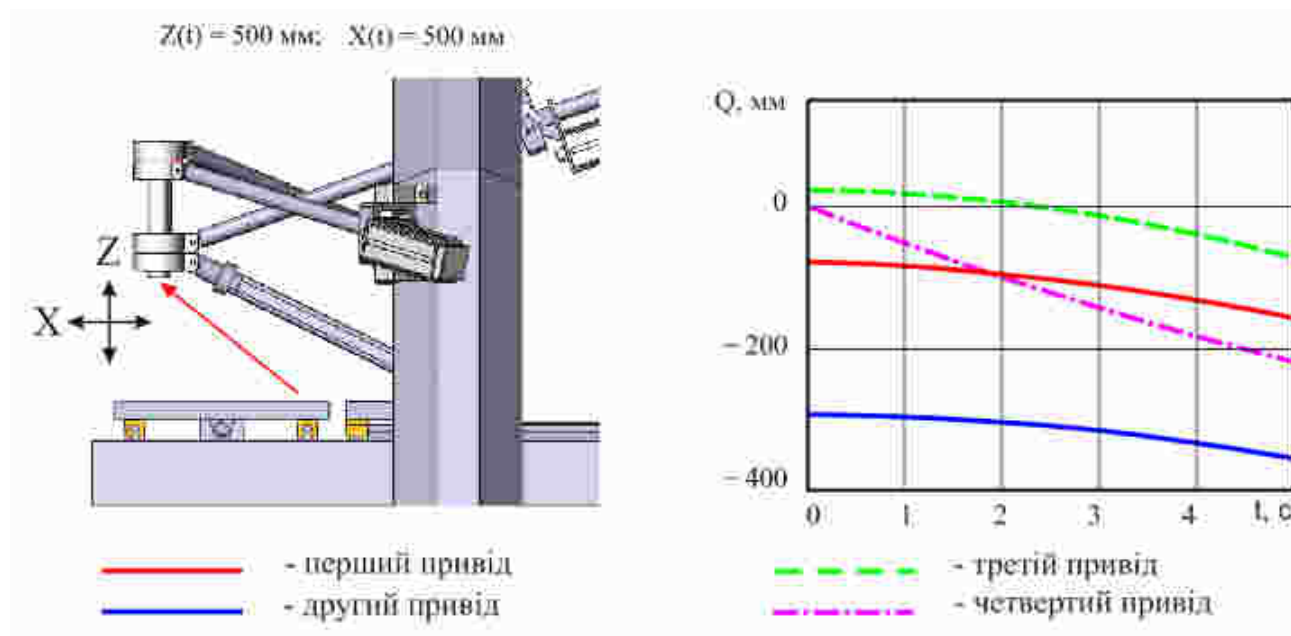


Рис. 3.14. Залежність роботи приводів від переміщення робочого органа по лінійній траєкторії $Z(t) = 500 \text{ мм}; X(t) = 500 \text{ мм}$

В результаті отриманих залежностей видно, що при відпрацюванні лінійних траєкторій робочого органу $Z(t) = 500 \text{ мм}; X(t) = -500 \text{ мм}$, перший та четвертий приводи працюють за лінійною залежністю в додатньому напрямку з постійною швидкістю, а другий та третій працюють в додотньому напрямку з поступовим зниженням швидкості.

Для траєкторії $Z(t) = 500 \text{ мм}; X(t) = 0$ за лінійною залежністю в додатньому напрямку працює лише перший привід. Другий та третій працюють аналогічно залежності $Z(t) = 500 \text{ мм}; X(t) = -500 \text{ мм}$. Четвертий привід починає переміщуватись у додатньому напрямку наприкінці відпрацювання траєкторії.

Для траєкторії $Z(t) = 500 \text{ мм}; X(t) = 500 \text{ мм}$. четвертий привід працює за лінійною залежністю у від'ємному напрямку з найбільшим діапазоном переміщення. Перший, другий та третій приводи майже ідентично плавно працюють у від'ємному напрямку.

3.5. Висновки

1. Розроблені залежності та програма у середовищі для математичних розрахунків для розрахунку зворотних кінематичних залежностей.

2. Проаналізовані зворотні кінематичні залежності дозволили встановити, що максимальна зміна довжини штанг спостерігається при переміщенні робочого органа у напрямку координати X , а мінімальна зміна довжини штанг відповідає повороту навколо осі Y .

3. Встановлені раціональні конструктивні параметри багатокоординатних верстатів комбінованої структури за критеріями робочого простору.

4. Моделювання відпрацювання координатних переміщень робочого органа за заданими траєкторіями руху дає чітке уявлення про поведінку приводів.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ВЕРСТАТА

4.1. Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність нової конструкції необхідно обрати базу, яку приймають за основу для виявлення техніко-економічних переваг нового конструкторського рішення і визначення економічного ефекту впровадження спроектованої конструкції у виробництво.

В якості бази для порівняння приймаємо зарубіжний аналог проектного верстата, також призначений для фрезерування металовиробів. Але, на відміну від базового, новий верстат вітчизняного виробництва, при тих же масо-габаритних розмірах, є значно дешевшим та більш продуктивнішим.

Застосування у верстаті, розробленому в даному дипломному проекті, підвищеної швидкості переміщень і подачі дозволить збільшити продуктивність обробки, знизити експлуатаційні витрати на виготовлення продукції та зекономити чисельність операторів.

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

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного верстатів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Програма випуску деталей	шт./рік	10000	10000
2.	Програма виробництва верстатів	шт./рік	–	10
2.	Штучний час обробки	хв.	2,8	1,45
3.	Площа, яку займає верстат	м ²	6,5	6,7
4.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	13,5	12,0
6.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частин	УРО	25/18	21/13
7.	Розряд роботи верстатника	розряд	4	4
8.	Оптова ціна верстата	грн.	3221300	-

4.2. Конструкторська підготовка виробництва

Конструкторська підготовка виробництва складається з етапів проектування верстату з послідовним розвитком та уточненням окремих розрахунків та конструкторських рішень. Роботи виконуємо в такій послідовності.

1) Встановлюємо етапи конструкторської підготовки виробництва: технічне завдання; технічна позиція; ескізний, технічний, та робочий проекти.

2) Визначаємо кількість деталей, які підлягають розробці, диференціюючи їх за видами. За допомогою коефіцієнтів переводу [1] деталі різних видів переводимо в "умовні деталі".

3) Трудомісткість технічного і робочого проектів визначаємо як добуток відповідної загальної кількості "умовних деталей" на трудомісткість однієї умовної деталі [1] в залежності від групи новизни та складності верстату, який конструюється.

4) Трудомісткість технічного завдання, технічної пропозиції, ескізного проекту визначаємо відповідно групі новизни та складності верстата [1].

5) Трудомісткість проектування електричних принципової та монтажної схем, які входять до складу робочого проекту верстата, визначаємо в залежності від їхньої новизни та складності [1].

6) Використовуючи дані трудомісткості етапів робіт конструкторської підготовки виробництва, розроблюємо сітьовий графік, який дозволяє організувати процес проектування так, щоб виконати його в найкоротший термін. Оскільки розрахунки сітьового графіка відносяться до організаційно-планових, доцільно винести їх в окремий розділ, після закінчення економічного обґрунтування.

7) Після визначення трудомісткості робіт розраховуємо витрати на конструкторську підготовку виробництва.

8) Всі отримані результати зводимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Результати розрахунку трудомісткості та витрат конструкторської підготовки виробництва

№ п.п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Технічне завдання	Технічна пропозиція	Ескізний проект	Технічний проект	Робочий проект	Всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Група новизни	гр.	III					
2.	Група складності	гр.	III					
3.	Клас точності	кл.	II					
4.	Кількість деталей×коефіцієнт переводу в "умовні деталі": а) корпусних масою більш ніж 100 кг б) литі і зварні в) оригінальних, які не є литими та корпусними г) застосовані з іншого виробу д) уніфікованих у вузли е) стандартних нормалізованих ж) покупних	шт.				1×5 4×2 145×1 9×0,5 4×7 258×0,15 10×0,5	1×10 4×4 145×1 9×0,2 4×3,5 258×0,15 10×0,15	
5.	Кількість умовних деталей	шт.				234,2	227,0	

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6.	Норма на умовну деталь	нормо-год				3,4	4,3	
7.	Трудомісткість виконання етапу робіт	нормо-год	40	370	405	796,28	976,1	2587,38
8.	Середньогодинна заробітна плата конструктора	грн./год	69,949	63,41	60,245	61,019	52,12	
9.	Зарплата основна (Z_o)	грн.	2797,96	23461,7	24399,2	48588,21	50874,33	150121,4 3
10.	Зарплата додаткова (Z_d): 10% від Z_o	грн.	279,80	2346,17	2439,92	4858,82	5087,43	15012,14
11.	Відрахування у соціальні фонди: 22% від (Z_o+Z_d)	грн.	677,11	5677,73	5904,61	11758,35	12311,59	36329,39
12.	Витрати на відрядження: 5% від Z_o	грн.	139,90	1173,09	1219,96	2429,41	2543,72	7506,07
13.	Накладні витрати: 45% від Z_o	грн.	1259,08	10557,8	10979,7	21864,69	22893,45	67554,64
14.	Всього вартість проекту $B_{пк}$	грн.	5153,84	43216,5	44943,4	89499,48	93710,52	276524,0

4.3. Технологічна підготовка виробництва

Технологічну підготовку виробництва здійснюємо відповідно до вимог "Єдиної системи технологічної підготовки виробництва", яка встановлює такі етапи:

- технологічний контроль креслень, їх відладка та розмноження;
- розробка технологічних процесів:
 - а) виготовлення деталей;
 - б) складання окремих вузлів;
- конструювання оснастки й нестандартних засобів механізації та автоматизації;
- виготовлення оснастки й нестандартних засобів механізації та автоматизації.

Визначаємо трудомісткість технологічної підготовки виробництва в такій послідовності:

1) В залежності від кількості деталей та вузлів різної технологічної складності, враховуючи диференційні норми часу, визначаємо трудомісткість проектування технологічних процесів виготовлення деталей та складання вузлів [1].

2) Трудомісткість останніх етапів робіт технологічної підготовки виробництва визначаємо в процентах від трудомісткості проектування технологічних процесів обробки деталей та складання вузлів [3].

Після визначення трудомісткості виконання етапів робіт з технологічної підготовки виробництва визначаємо вартість проекту – B_r .

Всі виконання розрахунки зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 3

Витрати на технологічну підготовку виробництва

№ п.п	Показники та етапи робіт	Одиниця	Кількість	Кількість нормо-годин на одиницю	Загальна кількість нормо- годин	Середньогодинна зарплата, грн/год	Зарплата основна Z_o , грн	Додаткова зарплата Z_d , грн, (10% від Z_o)	Відрахування у соціальні фонди, грн 22% від (Z_o+Z_d)	Накладні витрати, грн 45% від Z_o	Витрати на відрядження, грн. 5% від Z_o	Загальна вартість B_r , грн
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	Технологічний контроль крес- лень, їх відладка, розмноження	нормо- годин			27,5	65,55	1802,63	180,26	436,24	811,18	90,13	3320,44
2.	Розробка техпроцесів виготовлення деталей:											
	а) загальна кількість деталей, б) в т.ч. по групах технологічної складності:	шт.	150		1557,5		85899,7	85810	20787,7	47244,8	4295	166817,2
	I		45	4,5	202,5	52,12	10554,3					
	II		70	9,0	630	52,12	32835,6					
	III		22	17,0	374	56,93	21291,8					
	IV		13	27,0	351	60,45	21218					

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3.	Розробка техпроцесів складання вузлів:											
	а) загальна кількість вузлів б) в т.ч. по групах технологічної складності:	шт.	6		78,7		4458,73	445,87	1079,01	2452,30	222,94	8658,86
	II		2	5,6	11,2	52,12	583,74					
	III		1	12,5	12,5	52,12	651,50					
	IV		1	14,9	14,9	52,12	776,59					
	V		1	17,8	17,8	61,02	1086,16					
	VII		1	31,8	31,8	61,02	1360,75					
4.	Проектування спеціального оснащення, нестандартних засобів механізації та автоматизації	нормо-годин			105,4	61,02	6431,51	643,15	1556,42	4180,48	321,58	13133,1
5.	Виготовлення спеціального оснащення, нестандартних засобів механізації та автоматизації	нормо-годин			84,1	52,12	4383,29	438,33	1060,76	5479,12	219,16	11580,7
6.	Інші витрати	нормо-годин			159,8	52,12	8328,78	832,88	2015,56	4580,83	416,44	16174,5
7.	Всього вартість проекту $B_{\text{пт}}$				2022,5		111304,6	11130,5	26935,71	64748,73	5565,23	219685

4.4. Визначення повної собівартості та оптової ціни верстата

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного верстату розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{\text{op}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{r}_i} \cdot T_i, \quad (4.1)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

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

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на ливарних роботах:

$$Z_{\text{op}}^{\text{л}} = 75 \cdot 63,835 = 4787,63 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{\text{op}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{во}_i}}{100}, \quad (4.2)$$

де $\Pi_{\text{во}}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

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

$$B_o = 4787,63 \cdot \frac{230}{100} = 11011,54 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n Z_{\text{op}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{цв}_i}}{100}, \quad (4.3)$$

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

Для ливарних робіт:

$$B_{\text{цех}}^{\text{л}} = 4787,63 \cdot \frac{142}{100} = 6798,43 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені до собівартості виготовлення верстата

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн		Загальноцехові витрати $K_{цех}$, грн	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	75,0	3	63,835	4787,63	230	11011,54	142	6798,43
Ковальсько-штампувальні	76,1	3	57,643	4386,63	245	13598,56	123	9782,19
Зварювально-заготівельні	64,0	3	66,354	4246,66	245	10404,31	132	5605,59
Механічні	585,6	4	57,185	33487,54	240	95439,48	132	44203,55
Термічні	128,7	3	58,032	7468,72	260	23153,03	150	13593,07
Гальванічні	26,8	3	57,643	1544,83	280	4325,53	150	2317,25
Слюсарсько-складальні	890,0	4	57,185	50894,65	210	106878,8	142	72270,40
Електромонтажні роботи	88,0	4	57,185	5032,28	215	10819,40	132	6642,61
Фарбувальні	5,0	2	45,319	226,60	110	249,25	120	271,91
Пакувальні	12,8	2	41,935	536,77	110	590,44	120	644,12
Інші	58,0	3	51,466	2985,03	220	6567,06	140	4179,04
Всього	2010	—	—	115597,32	—	283037,37	—	166308,15

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

$$C_{\text{вир}} = M_o + M_d + \Pi_n + B_n + T_v - B_{\text{зв}} + E_{\text{тех}} + \Pi_{\text{тех}} + \\ + Z_{\text{ор}} + Z_{\text{др}} + B_{\text{сс}} + Z_{\text{цп}} + K_{\text{цех}} + K_{\text{зав}} + B_{\text{ін}}, \quad (4.4)$$

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

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

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні напівфабрикати зведено до табл. 4.5.

$T_{\text{в}}$ – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$B_{\text{н}}$ – напівфабрикати власного виробництва, грн.;

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

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

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

$B_{\text{сс}}$ – відрахування в фонд соціального страхування, грн.;

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

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

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

$K_{\text{пв}}$ – позавиробничі витрати, грн.

Таблиця 4.5

Склад матеріальних витрат на верстат

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1	Сталь 45	кг	1015	24,30	24664,50
2	Чавун СЧ20	кг	680	35,20	23936,00
3	Сталь 3	кг	346	23,01	7961,46
4	Алюміній	кг	28	118,27	3311,56
5	Сталь легована	кг	496,2	30,01	14890,96
6	Інші основні матеріали	—	—	—	645,00
	Всього	—	—	—	75409,48
Покупні комплектуючі вироби					
1	Кульково-гвинтова передача	шт.	6	26295	105180,0
2	Електродвигун 10 кВт	шт.	1	10989	7326,0
3	Електродвигун 1 кВт	шт.	6	3250,5	13002,0
4	Шарнір	шт.	12	952,5	7620,0
5	Система ЧПК	шт.	1	30360	20240,0
6	Підшипники				351,0
7	Інші покупні	—	—	—	3045,0
	Всього	—	—	—	233448,00

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Повна собівартість виготовлення верстата та його оптова ціна

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.5	75409,48
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	3016,38
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	$П_n$	табл. 4.5	233448,00
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	6% від M_o	4524,57
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_b	5% від $(M_o + M_d + П_n)$	12474,95
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}, E_{тех}$	53,8% від $З_{ор}$	62191,36
7.	Всього матеріальні витрати			382015,61
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.4	115597,32
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	11559,73
10.	Відрахування в фонд соціального страхування	$B_{сс}$	22% від $(З_{ор} + З_{др})$	27974,55
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	8,5% від $З_{ор}$	8438,60
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.4	283037,37
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 4.4	166308,15
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	141% від $З_{ор}$	162992,22
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	1,4% від $З_{ор}$	1618,36
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	$\Sigma(7 \div 15)$	1159541,92
17.	Позавиробничі витрати	$K_{пв}$	1% від $C_{вир}$	11595,42
18.	Повна собівартість	$C_{пов}$	$C_{вир} + K_{пв}$	1171166,67
19.	Прибуток	$П_n$	20% від $C_{пов}$	234233,33
20.	Оптова ціна	$Ц_{опт}$	$C_{пов} + П_n$	1405400,00

Оптову ціну верстата розраховуємо за формулою:

$$C_{\text{опт}} = C_{\text{пов}} + \Pi_{\text{н}}, \quad (4.5)$$

де $\Pi_{\text{н}}$ – нормативний прибуток, грн.

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{P_{\text{с}} \cdot C_{\text{пов}}}{100}, \quad (4.6)$$

де $P_{\text{с}}$ – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{20 \cdot 1171166,67}{100} = 234233,33 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{опт}} = 1171166,67 + 234233,33 = 1405400 \text{ грн.}$$

4.5. Визначення експлуатаційних витрат, які припадають на одиницю продукції

Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_{\text{е}} = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (4.8)$$

де $B_{\text{з}}$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування основних робітників, грн.;

$B_{\text{е}}$ – витрати на силову електроенергію, грн.;

$B_{\text{мд}}$ – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

$B_{\text{р}}$ – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$B_{\text{п}}$ – витрати на утримання приміщення, грн.;

$B_{\text{іп}}$ – витрати на універсальний різальний інструмент, грн.;

$B_{\text{а}}$ – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування:

$$B_{\text{з}} = C_{\text{г}} \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_{\text{д}}) \cdot (1 + K_{\text{с}}), \quad (4.9)$$

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

$C_{\text{г}}$ – годинна тарифна ставка робітника, грн./год.;

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

В базовому варіанті:

$$B_{\text{баз}} = 57,185 \cdot \frac{2,8}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 4,0216 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$B_{\text{пр}} = 57,185 \cdot \frac{1,45}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 2,0826 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_e = \frac{N_b \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{\text{шт}}}{60} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (4.10)$$

де N_b – встановлена потужність електродвигунів верстата, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи моторів (приймають 0,65...0,8);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для фрезерних верстатів – 0,6...0,7);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом (приймають 0,4);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів – 0,86;

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства – 0,92;

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

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{13,5 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot \frac{2,8}{60} \cdot 4,21 = 0,6662 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{12 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot \frac{1,45}{60} \cdot 4,21 = 0,2862 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{шт}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.11)$$

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 $K_{\text{п}} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{28,5 \cdot 25 \cdot 2,8}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,3325 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{28,5 \cdot 21 \cdot 1,45}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,1446 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot \Gamma_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.12)$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{ве}}$ – 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.).

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{25 \cdot 680 + 18 \cdot 520}{3950} \cdot \frac{2,8}{60} = 0,3114 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{21 \cdot 680 + 13 \cdot 520}{3950} \cdot \frac{1,45}{60} = 0,1287 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_o \cdot K_d \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.13)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2 ;

K_d – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [1]:

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м^2 виробничого приміщення, грн/м^2 .

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{6,5 \cdot 2,5 \cdot 2,8}{3950 \cdot 60} \cdot 480 = 0,0922 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{6,7 \cdot 2,5 \cdot 24,5 \cdot 480}{3950 \cdot 60} = 0,0492 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.14)$$

де H_a – норма амортизації, %;

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

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (4.15)$$

де $\Pi_{\text{опт}}$ – оптова ціна верстата, 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).

Таким чином, балансова вартість:

– базового верстата:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 3221300 \cdot (1 + 0,06 + 0,05 + 0,05) = 3736708 \text{ грн.},$$

– проектного верстата:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} = 1405400 \cdot (1 + 0,06 + 0,05 + 0,05) = 1630264 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{баз}} = \frac{3736708 \cdot 15 \cdot 2,8}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 6,6220 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{пр}} = \frac{1630264 \cdot 15 \cdot 1,45}{3950 \cdot 60 \cdot 100} = 1,4961 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального різучого інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + p \cdot S_{\text{пер}}) \cdot \gamma \cdot T_{\text{нор}}}{t_e (p + 1)} K_{\text{вт}}, \quad (4.16)$$

де S_u – первісна вартість універсального різучого інструменту, грн.;

p – кількість переточувань різучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру різучої грані;

$S_{\text{пер}}$ – вартість однієї переточувань, грн.;

γ – питоме значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи;

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

$K_{\text{вт}}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ip}^{\text{б}} = \frac{(690,5 + 20 \cdot 43,38) \cdot 0,6 \cdot 2,8}{480 \cdot (1 + 20)} \cdot 1,01 = 0,2624 \text{ грн.}$$

$$B_{ip}^{\text{пр}} = \frac{(503,46 + 20 \cdot 40,53) \cdot 0,6 \cdot 1,45}{480 \cdot (1 + 20)} \cdot 1,01 = 0,1359 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.7.

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями в фонд соціального страхування	B_z	4,0216	2,0826
2.	Силовa електроенергія	$B_{ел}$	0,6662	0,2862
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,3325	0,1446
4.	Ремонт обладнання	B_p	0,3114	0,1287
5.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,0922	0,0492
6.	Універсальний інструмент	B_{ip}	2,7061	1,5713
7.	Амортизація обладнання	B_a	6,6220	1,4961
Загальна сума		B_e	12,3084	4,3234

4.6. Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект, який отримує виробник верстата, розраховуємо за формулою:

$$E_{pv} = (C_{опт}^{пр} - C_{пов}^{пр}) \cdot P_v - E_n \cdot K_v, \quad (4.17)$$

де $C_{опт}^{пр}$ – вартість оптова проектного верстата, грн.;

$C_{пов}^{пр}$ – повна собівартість проектного верстата, грн.;

P_v – програма виробництва верстатів, шт./рік;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ($E_n = 0,16$);

K_v – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_e = B_{пк} + B_t, \quad (4.18)$$

де $B_{пк}$, B_t – відповідно вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$K_{\varepsilon} = 276524 + 219685 = 496209 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рв}} = (1405400 - 1171166,67) \cdot 1 - 0,16 \cdot 496209 = 154840 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект у споживача розрахуємо за формулою:

$$E_{\text{рсп}} = (B_{\text{е}}^{\text{баз}} - B_{\text{е}}^{\text{пр}}) \cdot N_{\text{д}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сп}}, \quad (4.19)$$

де $B_{\text{е}}^{\text{баз}}, B_{\text{е}}^{\text{пр}}$ – експлуатаційні витрати відповідно в базовому та проектному варіантах, грн.;

$N_{\text{д}}$ – річна програма обробки деталі на верстаті;

$K_{\text{сп}}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{\text{сп}} = \Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} \cdot Q_{\text{пр}} - \Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} \cdot Q_{\text{баз}}, \quad (4.20)$$

$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}}, \Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}}$ – відповідно балансова вартість проектного та базових верстатів, грн.

$$K_{\text{сп}} = 1630264 \cdot 1 - 3736708 \cdot 1 = -2106444 \text{ грн.},$$

$$E_{\text{рсп}} = (12,3084 - 4,3234) \cdot 10000 - 0,16 \cdot (-2106444) = 416900 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника

$$T_{\text{окв}} = \frac{K_{\varepsilon}}{(C_{\text{опт}}^{\text{пр}} - C_{\text{пов}}^{\text{пр}}) \cdot \Pi_{\text{в}}} = \frac{496209}{(1405400 - 1171167) \cdot 1} = 2,1 \text{ роки.}, \quad (4.21)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 4.8).

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного верстатів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проектний варіант	Зміна, % (+, -)
1	2	3	4	5	6
1.	Програма виробництва верстатів	шт./рік	–	1	–
2.	Річний випуск виробів	шт./рік	10000	10000	–
3.	Штучний час обробки виробу	хв.	2,8	1,45	–51,8
4.	Повна собівартість виготовлення верстату	грн.	–	1171167	–
5.	Оптова ціна верстату	грн.	3221300	1405400	–56,4
6.	Собівартість одиниці обробки із застосуванням об'єкта	грн.	12,308	4,323	–64,9
7.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	–	496209	–
8.	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	років	–	2,1	–
9.	Річний економічний ефект:				
	а) у виробника	грн.	–	154840	–
	б) у споживача	грн.	–	416900	–

4.7. Організаційно-планові розрахунки

4.7.1. Розробка плану виконання комплексу робіт з конструкторської підготовки виробництва

Складання плану виконання комплексу робіт виконуємо з використанням сітьових методів планування й організації виробництва. Комплекс робіт, на який необхідно розробити оптимізований план, представимо у вигляді сітьової моделі (рис. 4.1). Дані про тривалість виконання кожної роботи та попередньо прийняту кількість виконавців зводимо до табл. 4.9.

Дані про комплекс робіт з проектування верстату

Номер роботи	Шифр роботи	Зміст роботи	Тривалість виконання, роб. дні	Кількість виконавців, чол
1	2	3	4	5
1.	1–2	Розробка технічного завдання	2	2
2.	2–3	Аналіз науково-технічної літератури	2–3	4
3.	2–4	Аналіз патентної літератури	6–10	6
4.	4–5	Розробка електричної схеми верстата	4	3
5.	4–6	Попередні розрахунки робочих параметрів	3–4	4
6.	4–7	Аналіз кінематичної структури	2	2
7.	7–8	Розробка спеціального пристосування	9–13	1
8.	7–9	Розрахунок режимів різання	2	2
9.	8–9	Деталювання спеціального пристосування	1	1
10.	9–10	Вибір нормалізованих вузлів	2–3	2
11.	10–11	Розробка компоновальної схеми верстата	1–2	2
12.	11–12	Розробка станини	9–12	1
13.	11–13	Розробка шпиндельного вузла	10–13	1
14.	11–14	Розробка приводу подачі	10–12	1
15.	12–15	Деталювання станини	1	1
16.	13–15	Деталювання шпиндельного вузла	1	1
17.	14–15	Деталювання приводу подачі	1	1
18.	15–16	Перевірочні розрахунки по вузлах	9–11	1
19.	15–17	Розробка столу	8–10	1
20.	15–18	Розробка карт налагоджень	5–9	2
21.	18–19	Розробка креслень загального вигляду верстата	2–3	5
22.	18–20	Перевірка креслень складальних одиниць на технологічність	1–2	1
23.	18–26	Перевірка конструкції на патентну частоту	8–13	5

1	2	3	4	5
24.	19–21	Перевірка креслень загального вигляду на технологічність	1–2	1
25.	19–22	Розробка відомостей специфікацій	1–2	2
26.	19–26	Перевірка конструкції на відповідність вимогам техніки безпеки та промисловості	2–4	2
27.	20–23	Коректування креслень складальних одиниць по зауваженням техконтролю	2–3	1
28.	21–24	Коректування креслень загального виду по зауваженням техконтролю	2	1
29.	22–25	Розробка відомостей покупних	1	2
30.	23–26	Нормоконтроль креслень складальних одиниць	1	2
31.	24–26	Нормоконтроль креслень загального вигляду верстата	1	2
32.	25–26	Розрахунки показників економічної ефективності	2	4
33.	26–27	Передача комплексу документації на науково-технічну раду (НТР)	1	1
34.	27–28	Доробка креслень по зауваженням НТР	1–2	4
35.	28–29	Розмноження комплектування та передача документації в цех	2	2

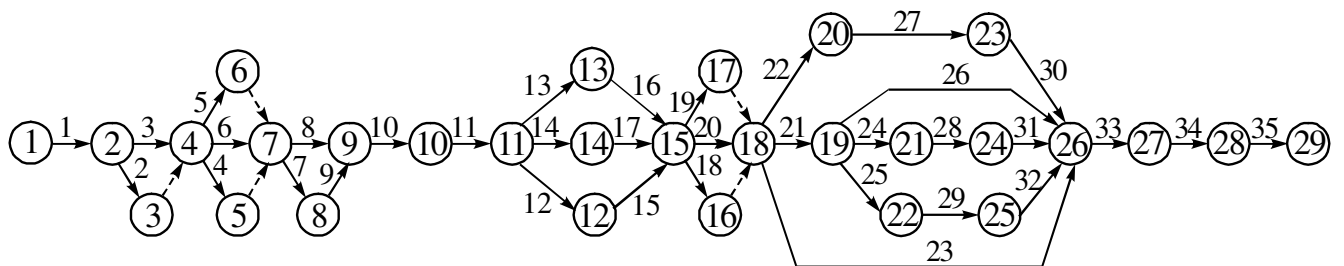


Рис. 4.1. Сітьова модель комплексу робіт

4.7.2. Визначення очікуваної тривалості робіт

Тривалість робіт, яка визначається за нормативами, задається однозначно або у вигляді мінімально ($t_{\min}$) та максимально ($t_{\max}$) можливих значень. Для таких робіт очікувану тривалість визначаємо за формулою:

$$t_{\text{оч}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5}. \quad (4.23)$$

Так, наприклад, для роботи 2–4:

$$t_{\text{оч}_{2-4}} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 10}{5} = 8 \text{ роб. днів}$$

Результати розрахунків округляємо до цілих чисел і записуємо до табл. 4.10, а також наносимо на вихідну сітьову модель (рис. 4.2). При цьому тривалість роботи вказуємо над стрілкою, кількість виконавців – під нею.

4.7.3. Розрахунок параметрів сітьового графіка

До основних параметрів сітьового графіка відносяться ранні T_p та пізні T_n строки здійснення подій, резерви часу подій P_n та робіт P_p , коефіцієнти напруженості робіт K_n , тривалість критичного шляху.

Ранній строк здійснення i -тої події визначається тривалістю максимального шляху від початкової події до даної (табл. 4.11).

Ранній строк здійснення кінцевої події дорівнює тривалості критичного шляху $L_{\text{кр}}$. В даному випадку він складає 64 робочих днів.

Пізні строки здійснення подій розраховуємо за наступною формулою, а отримані величини заносимо до табл. 4.11.

$$T_{n_i} = L_{\text{кр}} - L_{\text{max}_{i-c}}, \quad (4.24)$$

де $L_{\text{max}_{i-c}}$ – тривалість максимального шляху від даної i -тої події до кінцевої c -тої події.

Наприклад:

$$T_{п20} = 64 - 7 = 57 \text{ роб.днів} .$$

Резерви часу здійснення подій визначаємо за наступною формулою, а отримані величини заносимо до табл. 4.11.

$$P_{п_i} = T_{п_i} - T_{р_i} . \quad (4.25)$$

Наприклад:

$$P_{п16} = 57 - 51 = 6 \text{ роб. днів} .$$

Кількісна оцінка рівня напруженості некритичних робіт відносно лімітуючих робіт критичного шляху проводиться за допомогою коефіцієнтів напруженості робіт K_n . Цей коефіцієнт для робіт, які лежать на критичному шляху, дорівнює одиниці, а для фіктивних робіт він дорівнює нулю.

Для некритичних робіт коефіцієнт напруженості менше одиниці. Його визначають за формулою:

$$K_{нi-k} = \frac{L_{\max} - L_{кр.с}}{L_{кр} - L_{кр.с}} , \quad (4.26)$$

де $L_{\max}$ – тривалість максимально повного шляху, який проходить через дану роботу;

$L_{кр.с}$ – відрізок цього шляху, який співпадає з критичним шляхом.

Отриманні величини K_n заносимо до табл. 10.

Наприклад, для роботи 18–20:

$$K_{н18-20} = \frac{58 - 54}{64 - 54} = 0,4 .$$

Таблиця 4.10

Параметри робіт

Шифр роботи	Тривалість виконання, роб. дні				Кількість виконавців, чел		Коефіцієнт напруженості		σ ² , роб. дні
	t _{min}	t _{max}	Очікувана (t _{оч})						
			до оптимізації	після оптимізації	до опти-мізації	після оп-тимізації	до опти-мізації	після оп-тимізації	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1–2	2	2	2	2	2	2	1	1	0,64
2–3	2	3	2	4	4	2	0,25	0,67	
2–4	6	10	8	6	6	8	1	1	
3–4	Фіктивна Робота		0	0	0	0	0	0	
4–5	4	4	4	4	3	3	1	1	
4–6	3	4	3	3	4	4	0,5	0,5	
4–7	2	2	2	2	2	2	0,75	0,75	
5–7	Фіктивна Робота		0	0	0	0	0	0	0,64
6–7	Фіктивна Робота		0	0	0	0	0	0	
7–8	9	13	10	10	1	1	1	1	
7–9	2	2	2	2	2	2	0,18	0,18	
8–9	1	1	1	1	1	1	1	1	
9–10	2	3	2	2	2	2	1	1	
10–11	1	1	1	1	2	2	1	1	
11–12	9	12	10	10	1	1	0,92	0,92	0,36
11–13	10	13	11	11	1	1	1	1	
11–14	10	12	11	1	1	1	1	1	
12–15		1	1	1	1	1	0,92	0,92	0,16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13-15	1	1	1	1	1	1	1	1	0,16
14-15	1	1	1	1	1	1	1	1	
15-16	9	11	10	10	1	1	4	4	
15-17	8	10	9	9	1	1	0,9	0,9	
15-18	5	9	7	7	2	2	0,7	0,7	
16-18	Фіктивна Робота		0	0	0	0	0	0	0,04
17-18	Фіктивна Робота		0	0	0	0	0	0	
18-19	2	3	2	2	5	5	0,6	1	
18-20	1	2	1	1	1	1	0,4	0,5	
18-26	8	13	10	8	5	6	1	1	
19-21	1	2	1	1	1	1	0,6	0,67	1,00
19-22	1	2	1	1	2	2	0,6	0,67	
19-26	2	4	3	6	2	1	0,5	1	
20-23	2	3	2	2	1	1	0,4	0,5	
21-24	2	2	2	2	1	1	0,6	0,67	
22-25	1	1	1	1	2	2	0,6	0,67	0,16
23-26	1	1	1	1	2	2	0,4	0,5	
24-26	1	1	1	1	2	2	0,6	0,67	
25-26	2	2	2	2	4	4	0,6	0,67	
26-27	1	1	1	1	1	1	1	1	
27-28	1	2	1	1	4	4	1	1	0,04
28-29	2	2	2	2	2	2	1	1	

Таблиця 4.11

Параметри подій (роб. дні)

Шифр подій	До оптимізації			Після оптимізації		
	T_p	T_n	P_n	T_p	T_n	P_n
1	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	2	2	0
3	4	10	6	6	8	2
4	10	10	0	8	8	0
5	14	14	0	12	12	0
6	12	14	2	10	12	2
7	14	14	0	12	12	0
8	24	24	0	22	22	0
9	25	25	0	23	23	0
10	27	27	0	25	25	0
11	28	28	0	26	26	0
12	38	39	1	36	37	1
13	39	39	0	37	37	0
14	39	39	0	37	37	0
15	40	40	0	38	38	0
16	50	50	0	48	48	0
17	49	50	1	47	48	1
18	50	50	0	48	48	0
19	52	56	4	50	50	0
20	51	57	6	49	53	4
21	53	57	4	51	53	2
22	53	57	4	51	53	2
23	53	59	6	51	55	6
24	54	58	4	52	54	2
25	54	58	4	52	54	2
26	60	60	0	56	56	0
27	61	61	0	57	57	0
28	62	62	0	58	58	0
29	64	64	0	60	60	0

4.7.4. Оптимізація сітьового графіка

Для скорочення тривалості критичного шляху та забезпечення рівномірного завантаження виконавців, переведемо два виконавця з роботи 2–3 на роботу 2–4 та одного виконавця з роботи 19–26 на роботу 18–26. При переводі виконавців з однієї роботи на іншу, змінюється їх тривалість. Нова тривалість роботи:

$$t'_{оч_{i-k}} = \frac{t_{оч_{i-k}} \cdot K_{вик_{i-k}}}{K'_{вик_{i-k}}}, \quad (4.27)$$

де $t_{оч_{i-k}}$, $K_{вик_{i=k}}$ – відповідно очікувана тривалість роботи $i-k$ та кількість її виконавців до оптимізації;

$K'_{вик_{i=k}}$ – кількість виконавців, яка запланована для виконання роботи $i-k$ після їх перерозподілу.

Так, для роботи 19–26 після перерозподілу виконавців нова тривалість:

$$t'_{оч_{19-26}} = \frac{3 \cdot 2}{1} = 6 \text{ роб. днів.}$$

Отримані нові значення очікуваної тривалості робіт та їх виконавців заносимо до табл. 4.10 і наносимо на сітьовий графік. Такий графік показано на рис. 4.3, а розрахунки його параметрів у табл. 4.10, 4.11.

Тривалість критичного шляху сітьового графіку після оптимізації складає 60 робочий день. В порівнянні з вихідним графіком вона скоротилася на 4 робочі дні.

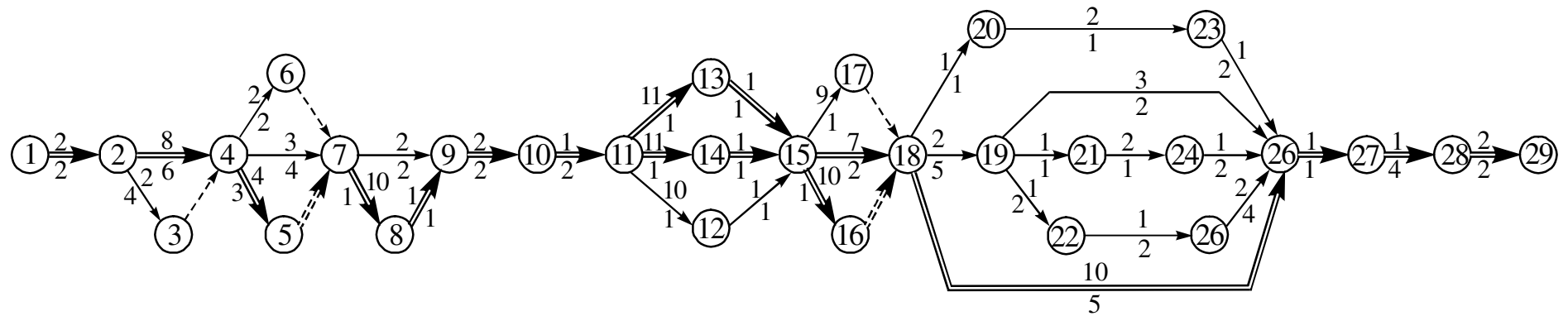


Рис. 4.2. Вихідний сітьовий графік

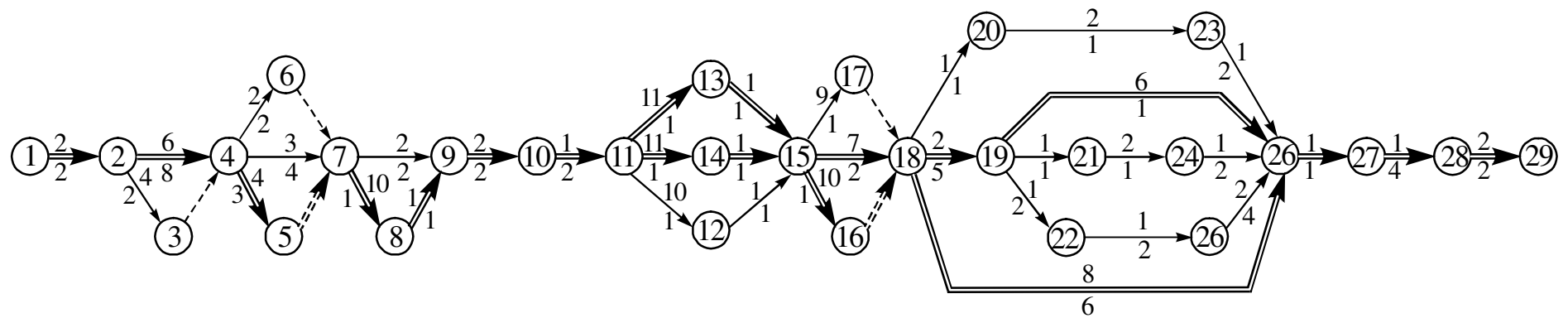


Рис. 4.3. Оптимізований сітьовий графік

4.7.5. Розробка карти проекту

Для досягнення мінімізації потреби в одночасно необхідних виконавцях будують карту проекту. При цьому сітьовий графік перетворюють в лінійний і створюють діаграму зайнятості виконавців (рис. 4.4).

Як видно з побудованої діаграми, потрібна кількість виконавців коливається від 1 до 13 чоловік. Зменшити потрібну кількість виконавців і раціонально їх завантажити в окремі проміжки часу можливо за рахунок переміщення вправо некритичних робіт, що мають резерви часу. Для цього зміщуємо роботи 18–20–23–26, 25–26, вправо, в межах їх резервів, що дає можливість зменшити максимальну кількість одночасно зайнятих виконавців з 13 до 11 чоловік. Нове положення робіт на графіку та діаграмі зображуємо суцільною лінією, а початкове положення цих робіт – пунктирною лінією.

4.7.6. Оцінка можливих відхилень тривалості критичного шляху

Тривалість ряду робіт, які лежать на критичному шляху, задана ймовірними оцінками, а розрахунок шляхів виконано за середніми значеннями. В результаті фактична тривалість критичного шляху може виявитися більше або менше розрахованої.

Встановлення максимальної та мінімальної тривалості критичного шляху визначається із врахуванням середньоквадратичного відхилення. Для цього спочатку розраховуємо дисперсії тривалості виконання робіт, які лежать на критичному шляху, за формулою:

$$\sigma_{i-k}^2 = 0,04(t_{\max_{i-k}} - t_{\min_{i-k}})^2. \quad (4.28)$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 4.10. Наприклад, дисперсія тривалості роботи 2–4

$$\sigma_{2-4}^2 = 0,04(10 - 6)^2 = 0,64 \text{ роб.днів} .$$

Середньо квадратичне відхилення тривалості критичного шляху:

$$\sigma_{кр} = \pm \sqrt{\sum \sigma_{i-k}^2} , \quad (4.29)$$

$$\sigma_{кр} = \pm \sqrt{3,28} = \pm 1,81 \text{ роб. дні} .$$

З врахуванням розрахованого відхилення планова тривалість критичного шляху складає:

$$L_{кр} = 60 \pm 2 \text{ роб. дня} .$$

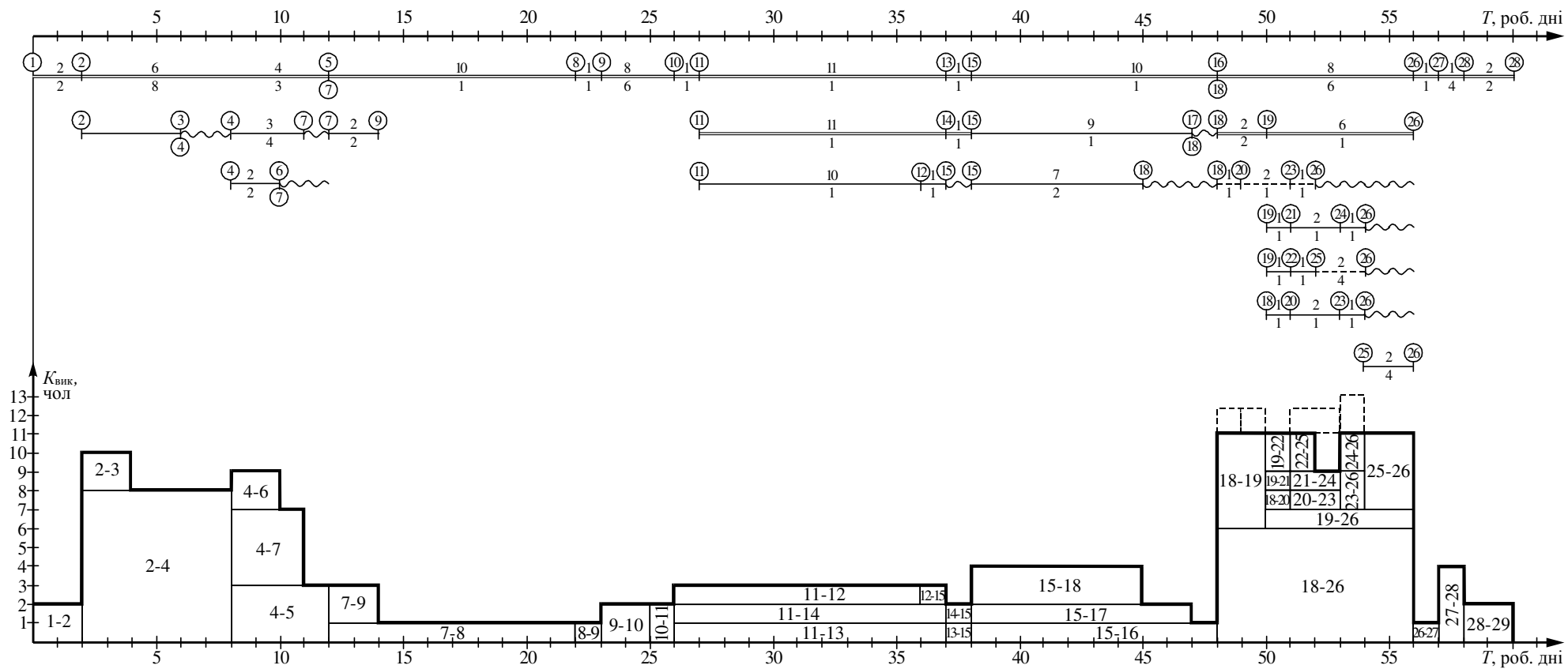


Рис. 4.4. Карта проекту: а) лінійний графік комплексу робіт; б) діаграма завантаження виконавців

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу компонок багатокоординатних верстатів з паралельною кінематикою запропонована компоновка п'ятикоординатного верстата на основі комбінованого механізму паралельної структури з 4 ступенями вільності та додаткового приводу столу з заготовкою.

2. Проаналізовані зворотні кінематичні залежності дозволили встановити, що максимальна зміна довжини штанг спостерігається при переміщенні робочого органа у напрямку координати X , а мінімальна зміна довжини штанг відповідає повороту навколо осі Y .

3. Встановлені раціональні конструктивні параметри багатокоординатних верстатів комбінованої структури за критеріями робочого простору.

4. Моделювання відпрацювання координатних переміщень робочого органу за заданими траєкторіями руху дає чітке уявлення про поведінку приводів.

5. Проведені техніко-економічні розрахунки ефективності розробки та застосування верстата з комбінованим механізмом паралельної структури. Економічний ефект складає 154840 грн. у виробника і 416900 грн. у споживача, що досягається за рахунок зниження вартості та підвищення продуктивності обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Математичне моделювання положення вихідного органу l -координатного механізму // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Збірник наук. праць – Кіровоград: КДТУ. – 2003. – Вип. 12. – с. 223-229.
2. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Тенденції розвитку верстатів паралельної структури // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – №2(48). – с. 18-22
3. Валявський І.А., Кропівний В.М. Класифікація технологічного обладнання з паралельною кінематикою / Вісник КДПУ. Кременчук: КДПУ, 2005. Випуск 1(30), 2005 – С. 74-77.
4. Воробьев Е.И., Диментберг Ф.М. Пространственные шарнирные механизмы. – М.: Наука, 1991. – 264 с.
5. Глазунов В.А., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.:Наука, 1991. – 95 с.
6. ДСТУ 2752 – 94.
7. ДСТУ 2807 – 94.
8. Кириченко А.М. Дослідження робочого простору верстатів-гексаподів / А.М. Кириченко, І.А. Валявський // Вісник Житомирського державного технологічного університету / Технічні науки. – Житомир, 2008. – Вип. 3(46). – С. 10-15.
9. Кириченко А.М., Козаченко Ю.А. Аналіз компоновок верстатного обладнання з комбінованою кінематикою // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – вип. 16. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – С. 162-169.

10. Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. Під ред. Ю.М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
11. Методичні вказівки з організаційно-планових розрахунків при розробці нових виробів / Кіровоград, КДТУ, 1999.
12. Обрабатывающее оборудование нового поколения / Под ред. В.Л. Афонина. – М.: Машиностроение, 2001. – 256 с.
13. Потапов В.А. Станки с параллельной кинематикой на выставке ЕМО-2001: концепции, реальность и перспективы // Приводная техника. – 2002. – № 2. – С. 50-57.
14. Расчеты экономической эффективности новой техники. Справочник (2-е издание - дополненное и переработанное. Под ред. К.М. Великанова) – Л., Машиностроение, 1990.
15. Сітьові методи в плануванні та організації виробництва. Укл.: В.М. Глух, І.В. Склярєнко, Л.М. Романюк, - Кіровоград, КІСМ, 1998.